



**KALSİT OCAĞI FİLTRE ATIKLARININ TEK
BİLEŞENLİ VE LİFLİ GEOPOLİMERLERİN
PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Zehra GÜRBÜZ

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KALSİT OCAĞI FİLTRE ATIKLARININ TEK BİLEŞENLİ VE LİFLİ
GEOPOLİMERLERİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

(Effect of Calcite Quarry Filter Wastes on The Performance Properties of One Part and Fiber-Reinforced Geopolymers)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zehra GÜRBÜZ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KAPLAN

Erzurum
Ocak, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Zehra GÜRBÜZ tarafından hazırlanan “KALSİT OCAĞI FİLTRE ATIKLARININ TEK BİLEŞENLİ VE LİFLİ GEOPOLİMERLERİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı çalışması 21 / 01 / 2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Haluk Görkem ALCAN <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Gökhan KAPLAN danışmanlığında sunulan “KALSİT OCAĞI FİLTRE ATIKLARININ TEK BİLEŞENLİ VE LİFLİ GEOPOLİMERLERİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	9	30
Materyal ve Metot	7	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	6	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Zehra GÜRBÜZ	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN
21.01.2025	21.01.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, maddi ve manevi her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, sabrı ve hoşgörüsüyle kendimi geliştirmeme rehberlik eden değerli tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Gökhan KAPLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmama verdiği değerli destek ve katkılarından dolayı Arş. Gör. Ahmet Mecit IŞIK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince tüm olanakları sağlayarak destek veren Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne minnettarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her daim güvendiklerini ve yanımda olduklarını hissettiren çok kıymetli babam Selahattin GÜRBÜZ'e, annem Miyase GÜRBÜZ'e ve aileme teşekkür ederim. Ayrıca, bu süreçte yanımda olan, destekleri ve motivasyonlarıyla bana güç veren değerli arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Zehra GÜRBÜZ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KALSİT OCAĞI FİLTRE ATIKLARININ TEK BİLEŞENLİ VE LİFLİ GEOPOLİMERLERİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Zehra GÜRBÜZ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KAPLAN

Amaç: Geopolimer üretiminde ana bağlayıcı yüksek fırın cürufuna (YFC) kalsit ocağı filtre atığı (KOFA) ikame edilerek, agrega yerine atık mermer tozu kullanımı ve polivinil alkol (PVA), polipropilen (PP) ve hibrit (HL) liflerin katkısıyla üretilen tek bileşenli geopolimer kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini araştırmak ve atık malzemeleri geopolimer üretiminde kullanmaktır.

Yöntem: Tek bileşenli geopolimer kompozit üretimi yöntemi ile ana bağlayıcı olarak YFC, YFC yerine ikame malzeme olarak %5, %10, %20 oranlarında KOFA, lifli ve liffsiz farklı kombinasyonlarda tasarlanmıştır. Numuneler, 80°C’de 24 saat ısıtma işlemine tabi tutulmuş, taze hal, porozite, se emme, yoğunluk, mekanik özellikler (basınç ve eğilme dayanımı), kuruma büzülme, taşınım ve durabilite (sülfat, asit, tuz ve donma çözülme etkileri) deneyleri uygulanmıştır.

Bulgular: Bu çalışmada, KOFA ve farklı lif türlerinin geopolimer kompozitlerin dayanım ve dayanıklılık performansları incelenmiştir. %10 KOFA oranı genel olarak optimum sonuçlar sağlarken, işlenebilirlik, asit etkisi ve donma çözülme etkisinde ise %20 KOFA oranı daha etkili sonuçlar vermiştir. Islanma kuruma deneyinde lif katkılarının etkisi yeterli olmamıştır. Liffsiz numunelerin KOFA katkısı ile dayanım ve dayanıklılık performanslarını iyileştirmiştir. PVA lifleri ise KOFA ile sinerjik etki sağlayarak fiziksel özelliklerin iyileşmesine katkı sağlamıştır. HL lifleri düşük maliyet nedeniyle alternatif olarak düşünülebilir.

Sonuç: %10 KOFA oranı, geopolimer kompozitlerin genel dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde olumlu etkiler sağlamıştır. Liffsiz numuneler dayanım açısından üstün performans sergilerken, PVA ve HL lifli numuneler dayanıklılık özelliklerini iyileştirmiş ve çevresel etkilere karşı destekleyici bir rol üstlenmiştir. KOFA oranı ve lif türü seçimi, geopolimerin kullanım alanı için önemlidir.

Anahtar Kelimeler: basınç dayanımı, durabilite, kalsit ocağı filtre atığı, polimer lifler, sürdürülebilirlik.

Ocak 2025, 118 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

EFFECT OF CALCITE QUARRY FILTER WASTES ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF ONE PART AND FIBER-REINFORCED GEOPOLYMERS

Zehra GÜRBÜZ

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan KAPLAN

Purpose: This study aims to investigate the strength and durability properties of one-part geopolymer composites produced by partially replacing the primary binder, ground granulated blast furnace slag (GGBFS), with calcite quarry filter waste (CQFV), utilizing waste marble powder as a fine aggregate substitute, and incorporating polyvinyl alcohol (PVA), polypropylene (PP), and hybrid (HL) fibers. Additionally, it seeks to explore the feasibility of integrating waste materials into geopolymer production.

Method: One-part geopolymer composites were designed using GGBFS as the primary binder, with CQFV incorporated at replacement levels of 5%, 10%, and 20%. Both fiber-reinforced and non-fiber-reinforced mixtures were considered. The specimens underwent a thermal curing process at 80°C for 24 hours. Various tests were conducted, including fresh-state properties, porosity, water absorption, density, mechanical properties (compressive and flexural strength), drying shrinkage, transport properties, and durability assessments (sulfate, acid, salt, and freeze-thaw resistance).

Findings: In this study, the effects of CQFV and different fiber types on the strength and durability performance of geopolymer composites were investigated. While a 10% CQFV replacement generally provided optimal results, a 20% CQFV content exhibited better performance in terms of workability, acid resistance, and freeze-thaw durability. The contribution of fiber reinforcement was found to be insufficient in the wetting-drying test. The incorporation of CQFV improved the strength and durability performance of non-fiber-reinforced specimens. PVA fibers demonstrated a synergistic effect with CQFV, contributing to the enhancement of physical properties. HL fibers, due to their lower cost, may be considered as an alternative reinforcement.

Results: A 10% CQFV replacement positively influenced the overall strength and durability of geopolymer composites. While non-fiber-reinforced specimens exhibited superior strength performance, PVA- and HL-reinforced samples enhanced durability characteristics and provided resistance to environmental effects. The selection of CQFV content and fiber type is crucial for tailoring the material to specific application requirements.

Keywords: compressive strength, durability, calcite quarry filter waste, polymer fibers, sustainability.

January 2025, 118 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	1
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Geopolimer	3
Geopolimer tarihçesi ve çevresel etkileri	3
Geopolimerizasyon mekanizması.....	5
Geopolimerlerde kür tipi ve kür sıcaklığı.....	8
Karışım yöntemleri.....	10
Geopolimerin dayanıklılık özellikleri.....	15
Geopolimerde mekanik dayanım.....	19
Lif takviyeli geopolimer kompozitler.....	20
Polivinilalkol (PVA) lif	21
Polipropilen (PP) lif.....	23
Atık mermer tozu (MT)	26
Kalsit (CaCO ₃).....	26
Yüksek fırın cürufu (YFC)	32
MATERYAL VE METOT	34
Materyal.....	34
Deneylerde kullanılan malzemeler	34
Deneysel Metotlar.....	40
Geopolimer kompozit tasarımı	40
Geopolimer numunelerin üretilmesi.....	41
Karışımların kodlandırılması.....	43
Mini çökme yayılma deneyi	44
Görünür porozite ve su emme deneyi.....	45
Basınç dayanımı	46

Eğilme dayanımı.....	47
Kuruma büzülmesi.....	47
Kapilerite (kılcal su emme) deneyi.....	48
Sülfat etkisi deneyi	48
Asit etkisi deneyi	49
Islanma kuruma etkisi deneyi	49
Donma çözülme dayanıklılığı.....	50
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	51
Taze Hal Özellikleri.....	51
Görünür Porozite Deney Sonuçları.....	53
Su Emme Deney Sonuçları.....	55
Etüv Kurusu Yoğunluk Deney Sonuçları	57
Mekanik Özellikler	58
Basınç dayanımı sonuçları.....	58
Basınç dayanımı, porozite ve etüv kurusu yoğunluk ilişkisi.....	61
Eğilme dayanımı sonuçları	62
Kuruma Büzülme Deney Sonuçları	65
Kapilerite (Kılcal Su Emme) Özellikleri	67
Durabilite Özellikleri	71
MgSO ₄ etkisi.....	71
H ₂ SO ₄ etkisi	75
Islanma kuruma etkisi.....	78
Donma çözülme etkisi	82
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	104

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Gerekli Enerji İhtiyacı (MJ/ton) (Davidovits, 2005).....	4
Tablo 2. Sera Gazı Emisyonu (CO ₂) (ton/ton) (Davidovits, 2005)	4
Tablo 3. Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri	34
Tablo 4. Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri (%).....	35
Tablo 5. Kalsit Ocağı Filtre Atık Özellikleri	36
Tablo 6. Atık Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri	37
Tablo 7. Atık Mermer Tozu Kimyasal Özellikleri (%).....	38
Tablo 8. Tez Kapsamında Kullanılacak Liflerin Teknik Özellikleri	38
Tablo 9. Malzeme Ağırlıkları (kg/m ³) ve Karışım Oranları	40
Tablo 10. MgSO ₄ Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları	73
Tablo 11. H ₂ SO ₄ Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları.....	77
Tablo 12. İslanma Kuruma Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları	80
Tablo 13. Donma Çözölme Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Geopolimerizasyon süreci (Davidovits, 1994).....	5
Şekil 2. Davidovits'e göre geopolimerlerin polimerizasyonunun molekül ağ yapısı.....	6
Şekil 3. Katı bir alüminosilikat kaynağının sentetik alkali alüminosilikata dönüşümü için basitleştirilmiş kavramsal model (geopolimerizasyon) (Duxson et al. 2007).....	7
Şekil 4. İki bileşenli karışım yöntemiyle geopolimer oluşumunun şeması (Ren et al. 2021)..	11
Şekil 5. Tek bileşenli geopolimer hazırlamanın genel prosedürü (Luukkonen et al. 2018).....	12
Şekil 6. Lif takviyeli betonda (FRC) enerji yutma mekanizması (Zollo, 1997).	20
Şekil 7. Yüksek fırın cürufu görüntüsü.	34
Şekil 8. Toz malzemelerin XRD analizleri.	35
Şekil 9. Toz malzemelerin tane boyutu dağılımı.....	35
Şekil 10. Kalsit ocağı filtre atık görüntüsü.....	36
Şekil 11. Sodyum metasilikat (SMS) tozu görüntüsü.	37
Şekil 12. Atık mermer tozu görüntüsü.	38
Şekil 13. Polivinil alkol (PVA) lif görüntüsü.....	39
Şekil 14. Polipropilen (PP) lif görüntüsü.	39
Şekil 15. Geopolimer kompozit karışım aşamaları.	41
Şekil 16. Malzeme tartımları.	42
Şekil 17. Tek bileşenli geopolimer kompozit üretimi.	42
Şekil 18. Sarsma tablasında sıkıştırılıp yerleştirilen numuneler.	43
Şekil 19. Etüve kaldırılan numuneler.	43
Şekil 20. Mini çökme yayılma deneyi görselleri.....	45
Şekil 21. Basınç dayanımı deneyi.	46
Şekil 22. Eğilme dayanımı deneyi.....	47
Şekil 23. Dijital komparatör.	48
Şekil 24. Tuz etkisi deneyi numuneleri.	50
Şekil 25. KOFA ve lif katkılarının yayılma çapına etkileri.	51
Şekil 26. KOFA ve lif katkılarının görünür poroziteye etkileri.	53
Şekil 27. KOFA ve lif katkılarının su emmeye etkileri.....	55
Şekil 28. KOFA ve lif katkılarının etüv kurusu yoğunluğa etkileri.	57
Şekil 29. 7 günlük basınç dayanımları.	59
Şekil 30. 28 günlük basınç dayanımları.	59

Şekil 31. 90 günlük basınç dayanımları.	60
Şekil 32. Basınç dayanımı, görünür porozite ve etüv kurusu yoğunluk ilişkisi.	62
Şekil 33. 7 günlük eğilme dayanımları.	63
Şekil 34. 28 günlük eğilme dayanımları.	63
Şekil 35. 90 günlük eğilme dayanımları.	64
Şekil 36. KOFA ve lif katkılarının kuruma büzülmesine etkileri.	65
Şekil 37. KOFA ve lif katkılarının kapiler su emme etkileri.	67
Şekil 38. Kapiler su emme, basınç dayanımı ve su emme ilişkisi.	70
Şekil 39. MgSO ₄ etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.	71
Şekil 40. H ₂ SO ₄ etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.	76
Şekil 41. Islanma kuruma etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.	79
Şekil 42. Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.	83
Şekil 43. Geopolimer kompozitin çevresel koşullara verdiği tepkiler.	85

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

CCA	: Çimento klinker agregası
GC	: Geopolimer kompozit
EGC	: Güçlendirilmiş geopolimer kompozit
EDGC	: PVA lif takviyeli geopolimer kompozit
FCT	: Kalsit ilaveli geopolimer kompozit
FRC	: Lif takviyeli beton
GLS	: Geopolimerize edilmiş kireçtaşı tozu
KOFA	: Kalsit ocağı filtre atığı
LS	: Kireçtaşı tozu
MSSC	: Modifiye eğik kayma silindiri
PC	: Portland çimentosu
RCA	: Geri dönüştürülmüş agrega
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
WCM	: Atık kolemanit
MT	: Atık mermer tozu
ASR	: Alkali-silika reaksiyonu
BF	: Bazalt lif
BS	: Bazalt tozu
GF	: Cam lif
HL	: Hibrit lif
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PPL	: Polipropilen lif
PVA	: Polivinilalkol
PVAL	: Polivinilalkol lif
YFC	: Yüksek fırın cürufu
CO₂	: Karbondioksit
CaCO₃	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
Cl₂	: Klor
H₂O	: Su
H₂SO₄	: Sülfirik asit
HCl	: Hidroklorik asit
KOH	: Potasyum hidroksit
MgSO₄	: Magnezyum sülfat
Na₂O	: Sodyum oksit
Na₂SiO₃	: Sodyum metasilikat
Na₂SO₄	: Sodyum sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit

PA	: Poliamid
CAH	: Kalsiyum alüminat hidrat
CH	: Kalsiyum hidrat
CSH	: Kalsiyum-silikat-hidrat
Si-O-Si-O	: Silokso, poli (silokso)
Si-O-Al-O	: Sialat, poli (sialat)
Si-O-Al-O-Si-O	: Sialat-silokso, poli (sialat-silokso)
Si-O-Al-O-Si-O-Si-O	: Sialat-disilokso, poli (sialat-disilokso)
(R)-Si-O-Si-O-(R)	: Organo-silokso, poli-silikon
Al-O-P-O	: Alümino-fosfo, poli (alümino-fosfo)
Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O	: Ferro-sialat, poli (ferro-sialat)
MPa	: Megapascal
°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde

GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe büyük oranlarda ihtiyaç duyulduğu için, çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dünyanın en yaygın kullanılan inşaat malzemesi olan betonun, kişi başına yıllık tüketim miktarı yaklaşık 1 m³'tür (Gartner, 2004). Her bir ton Portland çimentosu üretimi sonucunda atmosfere yaklaşık bir ton CO₂ salındığı bilinmektedir. Küresel ölçekte, çimento endüstrisinin üretilen toplam CO₂ miktarının yaklaşık %7-8'inden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir (Bayrak *et al.* 2025). Günümüzde, yeryüzündeki doğal kaynakların azalması ve sera gazlarının etkisinin daha belirgin hale gelmesi nedeniyle, beton üretimi için tüketilen enerji, ortaya çıkan CO₂ gazı ve diğer çevresel etkilerin en aza indirilmesi daha fazla önem kazanmıştır. Özellikle betonun en önemli bileşenlerinden biri olan çimentonun, üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımının azaltılması büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, hammaddelerin 1400 °C'den yüksek sıcaklıklarda döner fırınlarda ısıtılması gibi üretim süreçleri de yüksek enerji tüketimine neden olmaktadır (Gartner, 2004). Beton üretiminin bir diğer olumsuz etkisi, bu sürecin büyük miktarda suya ihtiyaç duymasıdır. Bu durum, özellikle yeterli tatlı su kaynaklarına sahip olmayan bölgelerde ciddi sorunlar yaratmaktadır. Ayrıca, beton yapıların yıkılması ve imha edilmesi gerektiğinde ortaya çıkan çevresel sorunlar da dikkate değerdir. Portland çimentosu kullanımını mümkün olduğunca azaltarak yerine çevre dostu bir beton üretimi sağlanabilir. Bu amaçla, Portland çimentosunun ikame malzemelerle değiştirilmesi önem arz etmektedir. Sürdürülebilir ve çevre dostu beton üretimi için, doğal kaynaklar yerine geri dönüştürülmüş malzemelerin tercih edilmesi önemlidir (Meyer, 2009).

Kısıtlı doğal kaynaklar ve doğaya verilen zararların giderek artması göz önüne alındığında, ihtiyaçların karşılanabilmesi için yeni yöntemler ve kaynakların araştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, mevcut hammaddelerin kısıtlı bir şekilde kullanılması kritik bir konu haline gelmiştir. Tüm yapıların beklenen en önemli özellikleri dayanım, dayanıklılık, ekonomi, işlevsellik ve estetik olarak sıralanabilir. Bu unsurlar birbirleriyle ilişkilidir ve bu özelliklerin sağlanması, mühendislik açısından kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Ancak yakın geçmişte hem dünyada hem de ülkemizde dayanıklılık kavramına yeterince önem verilmemiştir. Ülkemizde meydana gelen depremler, doğal afetler ve çevresel etkiler, betonda sadece dayanıklılık ve performans kavramlarının hatırlanmasına neden olmuştur. Çimento kullanımının artması, hammaddelerin tükenmesi, enerji israfı ve çevreye verilen zararlar nedeniyle, yeni hammadde arayışına girilmesi ve geri dönüştürülebilir malzemeler ile çeşitli atıkların değerlendirilmesinin önemini artırmıştır. Geçmişte bu tür

çalışmalar genellikle çimentoya ilave malzemeler ile sınırlıydı. Ancak günümüzde birçok endüstriden çeşitli atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar, çevreye zarar vermekle kalmayıp, insan sağlığını da olumsuz etkileyebilmektedir. Bu tür atıkların en kolay ve ekonomik bertaraf yöntemi, beton üretimine dahil edilerek dönüştürülmesidir.

Günümüzde, çimento kullanımını en aza indiren beton türü olan geopolimerler, çevre dostu beton üretiminin önemli bir rolünü üstlenmektedir. Geopolimerler, günümüzde yeni bir yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır (Toniolo and Boccaccini, 2017). Geopolimerler, Portland çimentosunun gerektirdiği gibi dayanım ve matris oluşumu için kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) jeline ihtiyaç duymazlar. Bunun yerine, dayanım elde etmek için silika ve alümina esaslı malzemelerin polikondensasyonunu kullanırlar (Okoye *et al.* 2016; Rakhimova *et al.* 2018; Zribi and Baklouti 2022; Pelisser *et al.* 2023; Willson-Levy *et al.* 2023). Geopolimer üretiminin daha sürdürülebilir olması için atık malzemelerle kullanımının araştırılması çevresel açıdan faydalar sağlayacaktır.

Kalsiyum karbonat, ilk kez 1824 yılında Portland çimentosunun üretiminde önemli bir bileşen olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanımına yönelik çalışmalar daha yenidir ve bu durum küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle ilişkilendirilmektedir (Elgalhud *et al.* 2016). Kireçtaşı tozu, doğal kireçtaşının öğütülmesiyle elde edilen ekonomik ve kolay erişilebilir bir mineral katkı maddesidir. Cüruf ve uçucu küle kıyasla daha uygun maliyetli ve temin edilebilirliği kolaydır (Baron and Douvre, 1987). Beton üretiminde kireçtaşı tozunun alternatif bir katkı maddesi olarak kullanılması, betonun karbon ayak izini %15'e kadar azaltabilir ve çimento hammaddesi tüketiminde %10'a varan tasarruf sağlayabilir (Schneider *et al.* 2011; Elgalhud *et al.* 2016).

Bu tez çalışmasında, geopolimer üretiminde polivinil alkol (PVA) ve polipropilen (PP) liflerinin yanı sıra atık malzemeler kullanılarak çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Atık malzeme olarak, kalsiyum karbonat üretimi sırasında ortaya çıkan ve filtre tozu olarak bilinen mikro boyutlu kalsiyum karbonat (KOFA) kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, kalsit üretiminden artan bu mikro boyutlu atıkların PVA ve PP liflerle güçlendirilmiş tek bileşenli lifli geopolimerlerde değerlendirilmesine ve böylece Portland çimentosu kullanımını azaltarak betonun sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktır. Ayrıca, bu atıkların betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmesi hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, çimento endüstrisinin karbon ayak izini azaltmak ve atık malzemelerin geri kazanımı yoluyla ekonomik fayda sağlamak gibi önemli çevresel ve ekonomik avantajlar sunmayı amaçlamaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

Geopolimer

Geopolimerler, çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemeleri olarak giderek daha fazla ilgi görmektedir. 1978 yılında Prof. J. Davidovits tarafından tanımlanan bu malzemeler, yüksek sıcaklıklara kadar kararlı ve yanmayan inorganik polimerlerdir. Alüminosilikat kaynaklarının alkali çözelti ile aktive edilmesiyle oluşan geopolimerler, Portland çimentosuna benzer dayanım özelliklerine sahipken, CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeli taşımaktadır. Geopolimerlerin kristal ya da amorf yapıda olabilmesi ve doğal kayalara benzer özellikler taşıması, geopolimerleri inşaat sektöründe çeşitli uygulamalar için uygun kılmaktadır.

Geopolimer tarihçesi ve çevresel etkileri

1970'li yıllarda Fransa'da meydana gelen çeşitli yangın felaketlerinin ardından, ısıya dayanıklı yeni malzemeler araştırılmaya başlandı. Bu araştırmanın sonucu olarak "Geopolimer" ifadesi ilk olarak 1970'lerde Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmıştır (Davidovits, 1991). Joseph Davidovits tarafından ortaya atılan geopolimer terimi, alüminosilikat esaslı malzemelerin alkali çözeltilerle tek başlarına veya kombinasyon halinde kullanılmasıyla SiO₄ ve AlO₄ bileşiklerinden oluşan "poli-sialat" (Si-O-Al-O) üç boyutlu polimerik zincir yapısına sahip, sürdürülebilir homojen bir karışım olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1994).

Geopolimerin kullanımı yüzyıllar öncesine dayandığı gözlemlenmiştir. Bu bağlayıcıların Keops Piramidinin yapımında kullanıldığı düşünülmektedir (Demortier, 2000).

Alkali ile aktive edilmiş alüminosilikat bağlayıcıları tanımlamak için geopolimer kelimesini literatüre kazandıran Davidovits olmasına rağmen alkali ile aktive edilen bağlayıcıların geliştirilmesinde 1940'larda Purdon'un sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş YFC ile yaptığı çalışması büyük bir katkı sağlamıştır (Purdon 1940; Davidovits 2008).

Bilimsel araştırma geçmişi 1930'lu yıllara kadar giden alkalilerin, çimentolu malzemelerin bir bileşen olarak ilk kullanımı Kuhl'un priz süresini araştırdığı cüruf ve potasyum hidroksit (KOH) alkali çözeltisi karışımını incelemesine dayanmaktadır. 1930 yılından itibaren alkalilerin rolüyle ilgili birçok çalışma yapılmaya başlanmıştır. Chassevet, 1937 yılında KOH ve NaOH çözeltileriyle cürufun reaktivitesini incelemiştir (C. Shi *et al.* 2003). Ayrıca Purdon 1940 yılında cürufu, NaOH çözeltisiyle aktive edip klinkersiz çimento

üretimi yapıp 25 MPa dayanım elde etmiştir. 1959'da Glukhovsky, alkali aktivatörle bazik ve serbest kalsiyum alümino-silikat kaynağı (kil) kullanarak yeni bir bağlayıcı keşfetmiştir. Bu yeni bağlayıcıları “toprak-çimento” olarak adlandırmıştır (Glukhovsky, 1959).

Yapı sektöründe önemli rol oynayan beton, küresel ısınma üzerinde olumsuz etkisi olan sera gazı emisyonları nedeniyle çevre üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Betonun ana bileşenleri su, çimento, ince agregalar ve iri agregalardır. Betonun ana temel bileşenlerinden olan Portland çimentosu, beton üretiminde gaz emisyonlarının olumsuz ana katkı sağlayıcısı olarak kabul edilmiştir ve Portland çimentosu genel beton karışımlarından yayılan CO₂ miktarının yaklaşık %74-81'inden sorumludur (Flower and Sanjayan, 2007). Geopolimerin, Portland çimentosuna kıyasla en büyük avantajlarından biri de çevresel etkide önemli bir iyileştirme sağlamasıdır. Bu çevresel iyileştirme, esas olarak klinker kalsinasyon sürecinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarına ve PC'nin yüksek tüketilen enerjisine dayanmaktadır (Amer *et al.* 2021).

Davidovits (2005) tarafından hazırlanan Tablo 1'de Portland çimentosu üretimi ve geopolimerin üretimi için gerekli olan enerji ihtiyacı, Tablo 2'de ise bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosu ile geopolimer bağlayıcınının üretimi esnasında atmosfere salınan CO₂ miktarı gösterilmiştir.

Tablo 1. Gerekli Enerji İhtiyacı (MJ/ton) (Davidovits, 2005)

TİP	YAKMA	ÖĞÜTME	TOPLAM
Portland çimentosu	3200	430	3630
Geopolimer	600	390	990

Tablo 2. Sera Gazı Emisyonu (CO₂) (ton/ton) (Davidovits, 2005)

Portland çimentosu	1,00
Geopolimer	0,15-0,20

Geopolimerlerin yaşam döngüsü üzerinde yapılan değerlendirmesine, uçucu kül (FA) kullanılan geopolimerlerin, küresel ısınma etkisi açısından Portland çimentosundan yaklaşık %70 daha düşük olduğu bildirilmiştir (Weil *et al.* 2009).

Van Deventer *et al.* (2007) çalışmasında ise geopolimerin kullanımı ile küresel ısınmanın olumsuz etkilerinin %73 oranla azaltılabileceği belirtilmiştir.

Habert *et al.* (2011), betonun çevresel etkisini ve küresel ısınmaya olan etkisini incelemek için yapılan çalışmada, uçucu kül ve cüruftan üretilen geopolimerlerin etkisini incelemiştir. Üretilen geopolimerin karbon ayak izinin geleneksel çimentodan üretilen betonlara göre daha az olduğu görülmüştür. Geri dönüştürülemeyen endüstriyel atıkların diğer

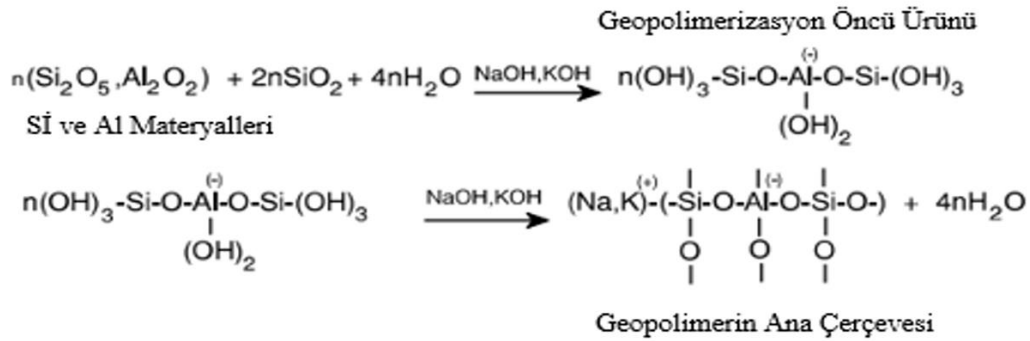
endüstrilerde kullanılması ve YFC ve aktive edilmiş kil karışımı kullanılarak geopolimer beton üretiminin çevresel etkisinin geleneksel betona göre daha aza indirgeyeceği konusunda araştırma konularına dikkat çekmiştir. Ayrıca, geopolimer beton üretimi, kullanılan sodyum silikat çözeltisi miktarını en aza indirmek için uygun bir Si/Al mol oranına sahip atık malzeme kullanmak araştırma sonucu olarak dikkat çekilmiştir.

Zhang *et al.* (2013), geopolimer uygulamalarda daha çok sanayi atıkları değerlendirildiğinde, maliyette %30 ve sera gazı emisyonlarının salınımında ise %80'e varan oranda avantaj sağlanabileceğini belirtmektedir.

Geopolimerizasyon mekanizması

Geopolimerizasyon genel olarak, SiO₂ ve Al₂O₃ içeriğinden zengin inorganik malzemelerin yüksek alkali bir ortamda moleküllerin; Al ve Si'un çözünmesi, taşınması ve polikondenzasyonunu içeren ve 3 boyutlu alüminosilikat ağlarının oluştuğu ekzotermik kimyasal bir mekanizmadır. Geopolimerizasyon süreci Şekil 1'de gösterilmiştir. Geopolimerlerin birleşmesi genel olarak nM₂O·Al₂O₃·xSiO₂·yH₂O şeklindedir.

Burada M alkali metali, n çoklu yoğunlaşma derecesini, y kimyasal olarak bağlı su moleküllerinin sayısını, x 1, 2 veya 3 olan silikon-alüminyum oranını (Si/Al) ifade eder (Silva *et al.* 2007).



Şekil 1. Geopolimerizasyon süreci (Davidovits, 1994).

Davidovits (2017), geopolimerlerin ağ yapısının birim/kimyasal grupları içerdiğini ifade etmiştir:

- Si-O-Si-O- silokso, poli (silokso)
- Si-O-Al-O- sialat, poli (sialat)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialat-silokso, poli (sialat-silokso)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialat-disilokso, poli (sialat-disilokso)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-silokso, poli-silikon

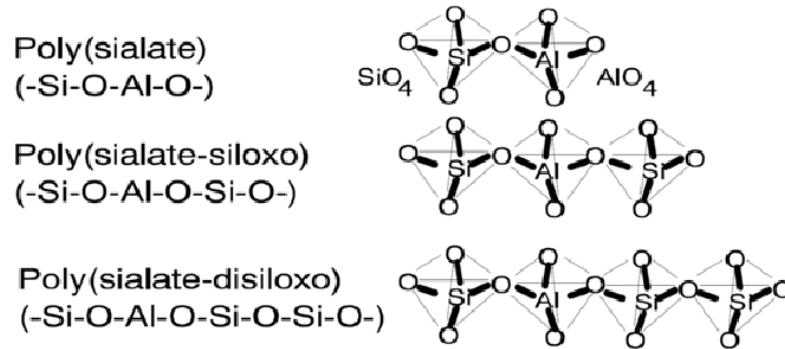
- Al-O-P-O- alümino-fosfo, poli (alümino-fosfo)
- Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O- ferro-sialat, poli (ferro-sialat)

Davidovits (2022), Geopolimerizasyon sonucu ortaya çıkan ürünün Si/Al oranı önemli bir yere sahiptir. Bu oranın 1 olduğu poli-sialat (-Si-O-Al-O-) bağları, zeolit kristaline benzer yangın koruyucu malzemeler, tuğlalar ve seramik benzeri ürünler, 2 olduğunda poli-sialat-siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-) bağları, seramik amorf yapı oluşur ve bağlayıcı yapı elde edilebilir. Oranın 3 olduğu poli-sialat-disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) durumunda ise akışkan polimerik karakteri oldukça artmakta olup yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı malzemeler üretilebilmektedir (Duxson *et al.* 2007; Davidovits, 2022).

Si/Al oranının 3 veya 3'ten küçük olduğu durumlarda sert ve kırılğan özellikli ve üç boyutlu çapraz bağlı ağ yapısında olduğu, Si/Al oranının 3'ten büyük olduğu durumlardaysa yapışkan ve lastiğe benzeyen özellikte ve iki boyutlu lineer bağlara sahip polimerik yapılar oluştuğu sonucuna varılmıştır (Davidovits, 2005; B. Singh *et al.* 2015; Ryu *et al.* 2013).

Geopolimerlerin özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktör ise $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ oranı, $\text{SiO}_2 / \text{R}_2\text{O}$ oranı, $\text{R}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ oranı (R = Na⁺ veya K⁺) ve sıvı/katı oranıdır. Basınç dayanımı ile $\text{SiO}_2 / \text{R}_2\text{O}$ oranından hareketle alkali oranı arttığında basınç dayanımı artmaktadır. Yine silikat oranı azaldığında da aynı etki görülmektedir (B. Singh *et al.* 2015).

Davidovits'e göre geopolimerlerin polimerizasyonunun molekül ağ yapısı Şekil 2'de gösterildiği gibidir.



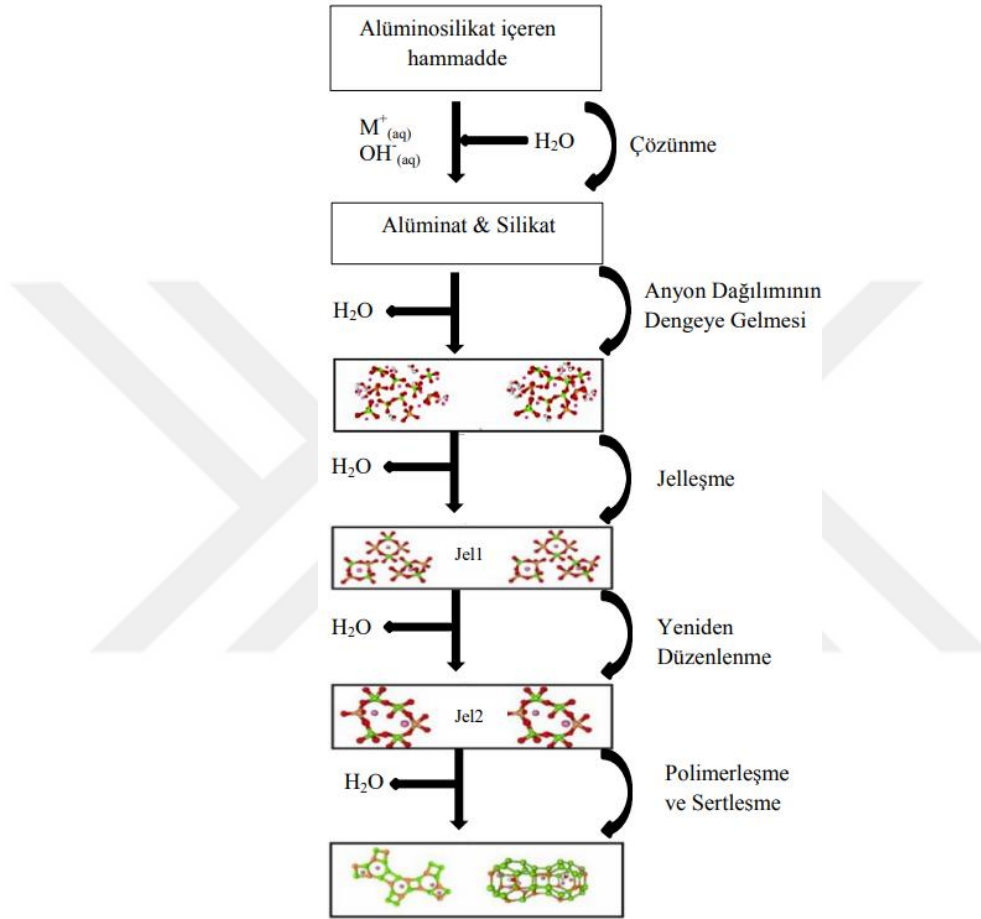
Şekil 2. Davidovits'e göre geopolimerlerin polimerizasyonunun molekül ağ yapısı.

Glukhovsky (1959), geopolimerizasyonla ilgili reaktif alümina ve silika içeren malzemelerin alkali aktivasyonu hakkında 1950 yıllarında genel bir mekanizma modeli önermiştir. Bu model üç aşamadan oluşmaktaydı;

1. Yıkım-koagülasyon; Si ve Al atomlarının alkalın ortamın etkisiyle hidroksit iyonlarının ve çözünmesidir.

2. Koagülasyon-kondensasyon; İyonların monomere taşınmasıdır.
3. Kondensasyon-kristalizasyon; Monomerlerin polimerik molekül yapıya yerleştirilmesidir.

Daha sonra, bazı yazarlar Glukhovsky'nin modelini geliştirmiştir, bu da Duxson ve arkadaşları tarafından önerilen ve Şekil 3'te sunulan oldukça basitleştirilmiş geopolimerizasyon modelini ortaya çıkarmıştır (Duxson *et al.* 2007).



Şekil 3. Katı bir alüminosilikat kaynağının sentetik alkali alüminosilikata dönüşümü için basitleştirilmiş kavramsal model (geopolimerizasyon) (Duxson *et al.* 2007).

Alüminosilikat içeren katı bir kaynağın sentetik alkali alüminosilikat malzemeye dönüşümü sırasında meydana gelen temel süreçler, şekil üzerinde açıklanmaktadır. Bu süreçler, sıralı ve tek aşamalı değil, aynı anda ve birden fazla adımda gerçekleşir. Alkali hidrolizi (su kullanımı) sırasında katı alüminosilikat kaynağı çözülerek alüminat ve silikat bileşikleri meydana gelir. Yüzeyledeki katı parçacıkların çözülmesi sonucu açığa çıkan alüminat ve silikatlar, bu parçacıkların reaksiyon sırasında geopolimere dönüşümünü sağlayan ana mekanizma olarak kabul edilmektedir (Duxson *et al.* 2007).

Çözünme sonucunda, aktivasyon çözeltisinde bulunan silikat grupları sulu faza karışır. Bu süreçte, silikat, alüminat ve alüminosilikat içeren karmaşık bir yapı oluşur. Amorf

alüminosilikatların çözünmesi, yüksek pH seviyelerinde hızla gerçekleşir ve bu da aşırı doygun bir alüminosilikat çözeltisinin oluşumuna yol açar. Bu durum, yüksek konsantrasyonlu çözeltilerde jel oluşumuna neden olur. Bu jel, sulu fazda oligomerlerin kondenzasyonu sürecine benzer şekilde meydana gelir. Çözünme sırasında çok az miktarda su tüketilir ve açığa çıkar. Su, reaksiyon ortamını oluşturmasına rağmen, esas olarak gözeneklere yerleşerek yapı içinde kalır (Duxson *et al.* 2007).

Geopolimerler, temel olarak ince tozlar ve alkali çözeltilerden oluşan iki ana bileşenle üretilir. Alüminosilikat reaksiyonu, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi alkali çözeltilerin uygun oranlarda kullanılmasıyla gerçekleşir ve bu süreç sonucunda geopolimer elde edilir. Geopolimerlerin fiziksel özelliklerine baktığımızda, ayrıştırılmış katı atıkları ve çamur benzeri atıkları kısa sürede yumuşatabilme kabiliyeti öne çıkar. Ayrıca, kimyasal dayanıklılığı, hızlı dayanım kazanma yeteneği ve asidik koşullara karşı gösterdiği yüksek direnç geopolimerlerin önemini artıran başlıca etkenlerdir (Rahier *et al.* 1996; Comrie *et al.* 2022).

Alkali tuzların da etkisiyle geopolimerizasyon ekzotermik bir reaksiyondur. Temel hammadenin incelik modülü, mineral kompozisyonu geopolimerik ürünlerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Uygun oranlarda Al-Si bileşimi ile serbest kalsiyum oranının düşük olduğu mineral kompozisyondaki F tipi uçucu küller ile dayanıklılığı yüksek olan malzemeler elde edilebilir (Hardjito, 2005; Panagiotopoulou *et al.* 2007).

Kullanılacak ham maddedeki Al-Si oranlarına göre geopolimerin fiziksel özellikleri değişiklik göstermektedir. Betonda istenilen özellikleri sağlayabilmek için ham maddenin kimyasal özelliklerini iyi tespit ederek karışımlar oluşturulmalıdır.

Geopolimerlerde kür tipi ve kür sıcaklığı

Geopolimerlerin priz süreleri, geleneksel Portland çimentolu betonlara kıyasla oldukça kısadır ve bu durum erken dayanım kazanmalarını sağlar. Yapılan gözlemler, geopolimerlerin 4 saatlik uygun kürleme koşullarında dayanımın %70'ine ulaşabildiğini göstermektedir. Bu hızlı priz alma özelliği, Portland çimentolu betonlarda priz süresini hızlandırıcı katkı maddeleriyle elde edilen sonuçlara benzerdir; ancak geopolimerlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, hızlı sertleşen betonlara kıyasla daha üstündür (Van Jaarsveld *et al.* 1999; P. Zhang *et al.* 2018).

Geopolimerin kürleme yöntemleri, geleneksel Portland çimentosu gibi su kürü yerine ısıyla kürleme (buhar kürleme) veya ortam şartlarında kürleme (havada) kullanılır (Jindal, 2019). Geopolimerde kür sıcaklığı ve süresi, matrisin mikro yapısını, dayanım özelliklerini ve sıcaklığa bağlı geopolimerizasyon reaksiyonu sonucu oluşan ürünün üzerinde etkisi olmaktadır.

Kürleme miktarı Si ve Al türlerinin geopolimerizasyon reaksiyonu aşamasında tamamen çözünmesi ve yoğunlaşmasını sağlamaktadır (Khale and Chaudhary, 2007; Komnitsas and Zaharaki, 2007). Geopolimerizasyon aktivasyonu kür sıcaklığına bağlıdır (Jindal, 2019). Kür sıcaklığı miktarı geopolimerizasyon reaksiyonunu etkilemektedir (Duxson *et al.* 2007; Khale and Chaudhary, 2007). Kür sıcaklığı 90°C'nin altındaki sıcaklıklarda hazırlanan geopolimerlerin yapısı amorf yapıya, 150-200°C arasından ki sıcaklıklarda hazırlanan geopolimerlerin yapısı ise zeolit benzeri kristal yapıya benzemektedir (Davidovits, 2005; Khale and Chaudhary, 2007; Ferone *et al.* 2013).

Kürleme yöntemlerinin seçimi ise geopolimer üretiminde kullanılan malzemelerin reaktivitesine ve oranlarına bağlıdır. Literatür taramalarında yer alan çalışmalar, kalsiyum miktarı düşük uçucu kül karışımı geopolimerlerin ısıyla kürleme (50 °C–120 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar) işleminde yüksek mekanik özellikler elde edildiğini fakat ortam sıcaklığın da mekanik özelliklerin düşük dayanım gösterdiği gözlemlenmiştir (Neupane, 2016; Jindal, 2018; Nuaklong *et al.* 2018).

Kürleme sıcaklığı, geopolimer betonun asit direncini de etkilemektedir (Yankwa Djobo *et al.* 2016). Volkanik kül esaslı geopolimer numunesinin 27 °C'de ıslı kür işlem görmüş haliyle 80 °C'de ıslı kür işlemi görmüş numunenin sülfürik aside karşı daha yüksek direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Geopolimerin kürleme yöntemlerinden genel olarak üç yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu üç yöntem, ortam kürü, ıslı kür ve buhar kürüdür.

Ortam koşullarında kürleme

Ortam sıcaklığında kürlemede geopolimer karışımlar, genel olarak 25 ile 30 °C arasındaki oda sıcaklığı ortamında 24 saat sonra kalıptan çıkartılır ve test gününe kadar ortam sıcaklığında kürleme işleminde bırakılır (Jindal, 2019).

Isı kürü

Geopolimerle ilgili yapılan çoğu çalışma, ısıyla kürleme üzerinedir. ısıyla kürleme, numunelerin direk veya aşırı buharlaşmayı önlemek için numuneler sıcak hava fırınına, ısıya dayanıklı plastik poşete sararak yerleştirilip belirli sıcaklıkta belirli sürede kürlenmesi işlemidir. Ayrıca araştırmacılar, 24 saatle 36 saat arasındaki sürelerde 60'la 100 °C arasında sıcaklıklarda fırında kürleme yöntemini kullanmışlardır. Geopolimerizasyon reaksiyonu ekzotermik bir işlem olduğu için ısıyla priz alma işlemi polimerizasyon reaksiyonunu etkinleştirmek için kullanılmaktadır (Jindal *et al.* 2017).

Geopolimerizasyon reaksiyonunun sonucunda oluşacak ürünler kürlenme sıcaklığına ve süresine göre değişkenlik göstermektedir. Geopolimerizasyon reaksiyonu için belli derecede sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır. Daha yüksek derecede ve uzun süreli ısı işleminde ise dayanıklılık ve dayanımın artmasını sağlamaktadır (Pangdaeng *et al.* 2015). Isıyla kürlenme işlemindeki önemli faktörlerinden biri, Si ve Al elementlerinin çözülmesine neden olan polikondenzasyon sürecini ve geopolimer beton karışımının dayanım ve dayanıklılık kazanmasını kolaylaştıran sıcaklıktır.

Patankar *et al.* (2014), 3 gün boyunca fırında kürlenmiş geopolimer numunelerinin basınç dayanımının, etüv ısı derecesinin yükseltilmesiyle arttığını ve sürenin 3 günden fazla olması durumunda da dayanımdaki artış hızının azaldığı sonucuna varmıştır.

X. Li, Ma, *et al.* (2013) yapmış oldukları deneysel çalışma da C sınıfı FA içerikle geopolimer numunelerini sıcaklığı 70 °C olan fırında 20 saatlik ısıyla kürlenme işlemi sonrası yüksek basınç dayanımı elde etmiştir.

Buhar kürü

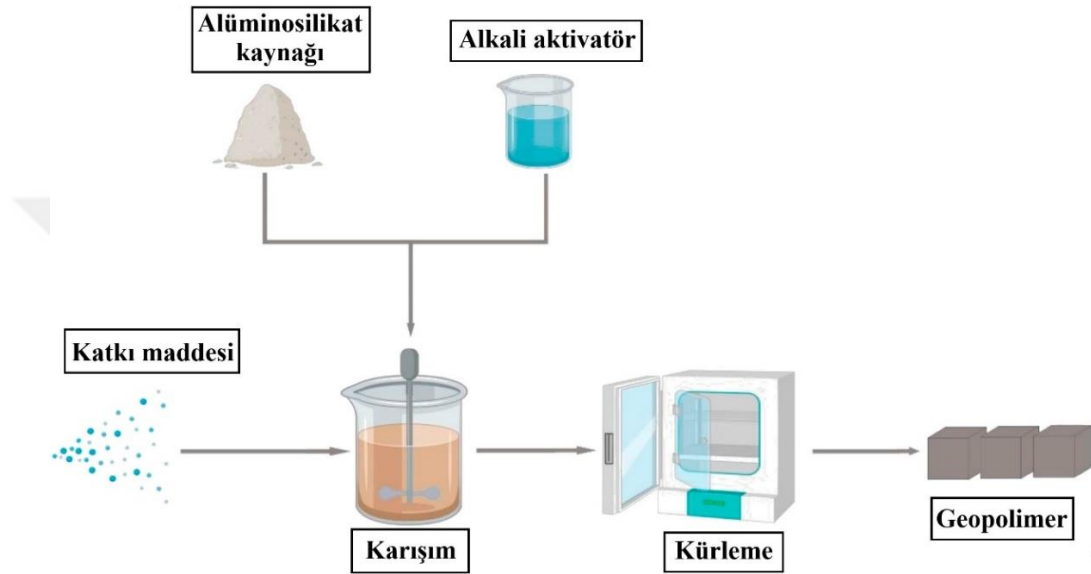
Numune, hızlandırılmış kürlenme tankına yerleştirilip, gerekli sıcaklık seviyesinde buhar üretmek için buhar kürüne bırakılır (Hardjito and Rangan, 2005). İhtiyaç duyulan süre boyunca buhar kürlendikten sonra, numuneler testten önce 24 saat ortam sıcaklığında soğumaya bırakılmalıdır. Buhar sıcaklığı genellikle 60–100°C aralığındadır (Aydın ve Baradan, 2012).

Karışım yöntemleri

İki bileşenli karışım yöntemi

Geopolimerler, Portland çimentosuna alternatif olarak sunulan önemli bir çevreci malzeme olmasına rağmen, kullanımları çok sayıda küçük projelerle sınırlıdır. Geopolimer betondan en iyi şekilde yararlanmak için, geopolimerin inşaat sektöründeki büyük üretim uygulamaları dikkate alınmalıdır. Geleneksel olarak geopolimerler alkali çözeltiler ve katı alüminosilikat malzemelerinin bir araya gelmesiyle oluşan iki aşamalı bir süreçten oluşan iki bileşenli bir karışımdan üretilir (Şekil 4). Bu kullanıcı dostu aktivatör çözeltileri, alüminosilikat kaynak malzemelerini çözme ve geopolimer bağlarının basınç değerleri gibi mekanik özellikleri etkilemek için kullanılır (Lee and Van Deventer, 2002). Sonuç olarak, geopolimerde iki bileşenli karıştırma yöntemi, özellikle mekanik özelliklerin ve kimyasal parçaların optimize edilmesi açısından önem taşır. Bu yöntem, genellikle alkali aktivatörlerin ve alüminosilikatın iki aşamada karıştırılmasını içermektedir. Geopolimer malzemelerin ticari ve seri üretimi, yüksek miktarda aşındırıcı ve genellikle viskoz alkali çözeltilerin işlenmesi nedeniyle zorluklar taşımaktadır, bu durum da geopolimerin büyük ölçekli kullanımını kısıtlamaktadır. Özellikle

alkali kaynağı olarak sodyum kullanılan geopolimer, yapışkan ve yoğun bir macun oluşumu geopolimerin reolojik özelliklerini karmaşık hale getirerek kontrol edilmesini güçleştirebilir (Provis, 2009). Ayrıca geopolimer, alkali ve mevcut silikat oranına oldukça duyarlıdır, bu da özellikle atık malzemelerin silika kaynağı olarak kullanıldığı durumlarda kontrol edilmesini zorlaştırabilir (Criado *et al.* 2007). Son olarak, kürlenme veya kullanım aşamasında, geopolimer yüzeyinde alkali ve su hareketi meydana gelebilir. Eğer geopolimer karışımının su ve alkali içeriği dikkatlice denetlenmezse, bu durum çiçeklenme oluşumu, yüksek geçirgenlik ya da artan su emilimi riskine yol açabilir (Najafi Kani *et al.* 2012).



Şekil 4. İki bileşenli karışım yöntemiyle geopolimer oluşumunun şeması (Ren *et al.* 2021).

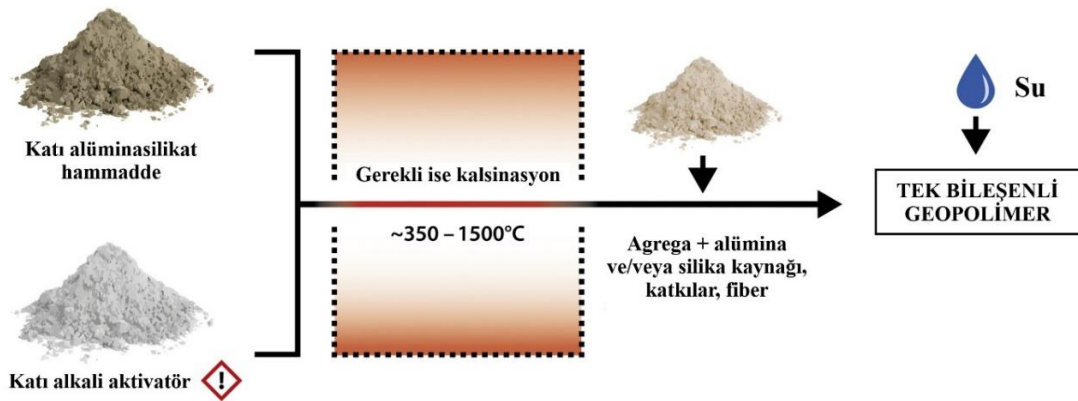
Tek bileşenli karışım yöntemi

İki bileşenli karışım yöntemiyle üretilen geopolimer malzemelerin ticari ve seri üretimi, yüksek miktarda aşındırıcı ve genellikle viskoz alkali çözeltilerin işlenmesi nedeniyle zorluklar taşınması ve bu durumun da geopolimerin büyük ölçekli kullanımını kısıtlamış olması üretimi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, geopolimerin inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılabilmesi için atılması gereken önemli adımlardan biri, geleneksel Portland çimento bazlı malzemelere benzer şekilde, yalnızca su ekleyerek kullanılacak tek bileşenli bir geopolimer karışımı geliştirmektir (Nematollahi *et al.* 2015). Tek bileşenli karışım yöntemi, suyun doğrudan katı bir alüminosilikat kaynağı ve bir katı aktivatör içeren kuru bir karışıma eklenmesi esasına dayanır (Koloušek *et al.* 2007). Bu süreç, malzemenin yapısal özelliklerini değiştirerek daha reaktif hale getirebilir. Katı aktivatörlerin geopolimer üretiminde kullanılması, ticari uygulanabilirliği artırarak geleneksel çimento bazlı malzemelere benzer şekilde tek bileşenli karışımlarının geliştirilmesine katkı sağlar. Bu yöntem, karmaşık aktivatör çözeltilerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırarak, geopolimerin üretim ve kullanımını basitleştirir ve inşaat sektörü için daha uygun hale getirir (Nematollahi *et al.* 2015). Tek bileşenli karışım yöntemi, özellikle inşaat

sektöründe kullanılan çimento üretiminde yaygındır. Bu yöntem, malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılmasını sağlayarak, suyun eklenmesiyle hızlıca reaksiyona girmesini ve istenilen yapısal özelliklere sahip bir karışım elde edilmesini mümkün kılar. Ayrıca, bu yöntem, malzeme hazırlama sürecini basitleştirerek zaman ve maliyetten tasarruf sağlar.

Tek bileşenli geopolimerlerin gelişimi, yapı malzemeleri alanında önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Bu bağlamda, Purdon (1940)'un gerçekleştirdiği çalışma, ilk örneklerden birini temsil etmektedir. Purdon (1940), YFC ile katı sodyum hidroksiti kuru bir şekilde karıştırarak, ardından su ekleyerek bir harç oluşturmuştur. Bu, geopolimer malzemelerin temel prensiplerini ortaya koyan bir yöntemdir ve sonraki araştırmalara ilham vermiştir.

Davidovits, 1994 yılında metakaolin, sodyum veya potasyum silikat ve YFC oluşan tek bileşenli geopolimerin patentini alarak bu alandaki araştırmalarını bir adım öteye taşımıştır. Bu patent, geopolimerlerin potansiyelini vurgulamakla kalmayıp, aynı zamanda farklı hammadde kombinasyonlarının nasıl kullanılacağı konusunda da bir çerçeve sunmuştur. Ancak, Davidovits katı sodyum veya potasyum hidroksit ve silikat kullanımının, büyük ölçekli bulunabilirlik ve üretim sorunları nedeniyle kısıtlayıcı olabileceğine dikkat çekmiştir. Bu nedenle, bu bileşenlerin kısmen sentetik lavlarla değiştirilmesi gerektiğini önermiştir. Sentetik lav, volkanik tüf ve kalsiyum karbonatın belirli oranlarda karıştırılarak, 1200-1350 °C sıcaklık aralığında eritilmesi ve ardından su ile söndürülmesi yoluyla üretilmektedir. Bu süreç, sentetik lavın reaktif özelliklerini artırarak, geopolimer matrisinin etkinliğini ve dayanıklılığını yükseltmektedir (Davidovits J., 2008).



Şekil 5. Tek bileşenli geopolimer hazırlamanın genel prosedürü (Luukkonen *et al.* 2018).

Şekil 5'te görüldüğü üzere, tek bileşenli karışımlarda, suya ek olarak yalnızca kuru bir karışım gereklidir. Kuru karışım, gerekli ise bir kalsinasyon aşaması ile veya kalsinasyon aşaması olmadan, katı alkali aktivatörün katı alüminosilikat malzemesi ile karıştırılmasıyla hazırlanır (Luukkonen *et al.* 2018).

Alüminosilikat bileşenleri

Tek bileşenli geopolimer karışımlarındaki en yaygın katı alüminosilikat malzemesi, kömürün yanmasından veya YFC ile elde edilen uçucu küldür. Malzeme olarak kullanılan uçucu külün çoğu Sınıf F (düşük kalsiyum içeriği) kapsamına girer (K. H. Yang *et al.* 2008; Nematollahi *et al.* 2017). Sınıf C uçucu kül (yüksek kalsiyum içeriği), çok hızlı ayarlanması ve daha sınırlı bulunabilirliği nedeniyle geopolimer bağlayıcılarda daha az sıklıkla kullanılır (Rattanasak *et al.* 2011).

YFC, alkali aktıveli özelliklerde tipik olarak kalsiyum açısından zengin bir alüminosilikat malzemesi olarak kullanılır. Yüksek fırınlarda pik demiri üretiminin bir yan ürünü olan YFC, demir cevheri ve kokta bulunan silikat ve alüminat safsızlıklarından oluşur. YFC genellikle tek bileşenli geopolimer karışımlarında Sınıf F uçucu kül ile karıştırılır, ancak tek başına da kullanılabilir. YFC kullanımı, düşük kalsiyum içerikli uçucu külün reaktivitesini artırır (Duxson and Provis, 2008).

Alkali aktivatörler

Geopolimerizasyon reaksiyonunun başlamasında görev alan alkali aktivatörler, alüminosilikat malzemelerinden sonra önemli olan ikinci bileşendir. Aktivatörler, reaksiyon hızını değiştiren katalizör malzemelerdir. Çözeltide yer alan alüminli ve silisli bileşiklerin çökmesine ve kristalleşmesine olanak sağlamaktadır (Khale and Chaudhary, 2007). Alkali aktivatörler, hammaddenin bileşenlerine de bağlı olarak oluşturduğu jel doğada yarı kristal, amorf şeklinde değişen çeşitli polimerik bileşikler oluşturmak için Al ve Si oksitlerini çözer (D. M. J. Sumajouw *et al.* 2007).

Aktivatörlerin konsantrasyonu, pH değeri, silika modülü, türü, dozajı, karışımının priz almamış haldeki reolojisi ve priz almış haldeki mikro yapısı ve özellikleri üzerinde etkisi vardır (H. Zhang *et al.* 2016). Yüksek miktarda alkali çözeltisi/kül oranı taze geopolimer karışımlarında genellikle işlenebilirliği arttırmıştır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı Na_2SiO_3 'ün viskozitesinin yüksek olmasından dolayı, prizini almamış karışımlarda genellikle işlenebilirlik azalmıştır. Ancak NaOH yüksek konsantrasyondaiken priz sürelerinde artış gözlemlenmiştir (Part *et al.* 2015).

Çoğunlukla kullanılan alkali aktivatörler, potasyum hidroksit, sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum silikat ve çözünebilir silikatlardır (Somna *et al.* 2011). Geopolimer betonun daha iyi dayanım ve dayanıklılık özelliğine sahip olması açısından, geopolimer üretiminde sodyum hidroksit, sodyum silikat, sıvı haldeki potasyum hidroksit ve potasyum silikat karışımları tercih edilen aktivatörlerdir (Lee and van Deventer, 2007). Ekonomik açıdan

sodyum hidroksit, potasyum hidroksitten daha uygun maliyetli olduğu için ve potasyum hidroksitin temin zorluğundan dolayı da genel olarak çoğu çalışmada alkali aktivatör çözelti olarak Na_2SiO_3 ve sodyum hidroksit karışımlarıyla yapılmış alkaliler kullanılmıştır.

Alkali aktivatörler kimyasal bileşimlerine göre 6 grupta değerlendirilmiştir (Glukhovsky *et al.* 1980).

- 1) Kostik alkaliler (Sodyum Hidroksit): MOH
- 2) Silikatsız zayıf asit tuzları: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF
- 3) Silikatlar: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$
- 4) Alüminatlar: $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$
- 5) Alüminosilikatlar: $\text{M}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2-6)\text{SiO}_2$
- 6) Silikatsız kuvvetli asit tuzları: M_2SO

Aktivatörün yoğunluğu, geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi fazladır. Basınç dayanımı serbest OH^- iyonunun miktarından etkilendiği için ideal aktivatör yoğunluğu önemlidir. Geopolimerlerde kürlenme sıcaklığı ve geopolimer yaşı basınç dayanımı üzerinde etkilidir. Fakat bu değişkenlerin etkili olabilmesi içinde yeterli miktarda aktivatör konsantrasyonu olmalıdır. Çünkü geopolimer betonun basınç değerinde NaOH yoğunluğu kürlenme sıcaklığının ve süresinin etkisine göre daha fazla etkiye sahiptir (Bakharev, 2005; De Vargas *et al.* 2011).

Komljenović *et al.* (2010) yapmış olduğu deneysel çalışmasında alkali aktive edilmiş uçucu küllü (F sınıfı) geopolimerlerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini araştırmıştır. Çalışmasında aktivatör olarak KOH, NaOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$ ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. Na_2SiO_3 kullanılan örneklerde en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımının, Si/Al oranına önemli oranda bağlı olduğu ifade edilmiştir. Araştırmada, elde edilen önemli parametrelerin, alkali aktivasyon yönteminde aktivatör özelliği ve yoğunluk, uçucu külden ince öğütülmüştük olduğu belirtilmiştir.

Tigue *et al.* (2018) alkalın aktivatör çözelti olarak kuru halde diğer malzemeler ile karıştırılıp suyun eklenmesi ile geopolimerizasyonun başlaması esasına dayanan yöntem ile, alkalın aktivatörün katı olarak kullanılması ve uçucu kül ve volkanik külün belli oranlarda karışımıyla tek bileşenli geopolimer üretmiştir. Bu yöntemin amacının, zemin iyileştirmelerinde ticari uygulanabilirliği artırmak olarak belirtilmiştir. Uçucu kül parçacıklarının daha ince ve reaktif olması nedeniyle, volkanik kül miktarına göre uçucu kül miktarındaki artış, basınç dayanımında iyileşme sağlamıştır. Alkalın aktivatörlerde sodyum

hidroksit, sodyum alüminat ve sodyum silikat içeriklerinin değişimine göre dayanımda farklılıklar gözlenmiştir. Uçucu kül tabanlı geopolimerlerde, alümina kaynağının artarken silika oranının azalması, yüksek oranda sodyum hidroksit içeren alkalın aktivatörler ile yüksek dayanım sağlanırken, sodyum alüminat oranı yükseldiğinde basınç dayanımının düştüğü görülmüştür.

Dong *et al.* (2020), katı aktivatör (sodyum metasilikat pentahidrat) ile sıvı hibrit aktivatörü (sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi) karşılaştırmıştır. Katı aktivatör, basınç dalgalanmalarına karşı sıvı aktivatöre göre daha iyi performans göstermiş; bunun nedeni, suyun çözünmeyen metasilikat yapısına bağlanarak su-bağlayıcı dalgalanmaları azaltmasıdır. Ancak metasilikat içeriği %6 Na₂O'yu geçtiğinde basınç dayanımı azalmış ve kırılma riski artmıştır. Mikro silika, YFC'nin reaktivitesini artırırken külün reaktivitesini azaltmış, ancak mikro yapıyı yoğunlaştırarak dayanıklılığı iyileştirmiştir. Su-bağlayıcı oranındaki artış, sıcaklık dayanımını olumsuz etkilemiştir. Suda kürlenmiş numuneler, düşük sıcaklıklarda CO₂ eksikliği nedeniyle daha az dayanıklılık göstermiştir. Katı sodyum metasilikat pentahidratın, yüksek dayanımlı geopolimer kompozitlerin sentezinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Geopolimerin dayanıklılık özellikleri

Geopolimer beton, geleneksel betona göre fiziksel ve mekanik özellik olarak daha iyi sonuçlar elde edilmesinin yanı sıra kimyasal dayanıklılığı da geleneksel betona göre daha iyidir. Geopolimer betonun çevresel koşullara dayanımı ve yüksek durabilite özellikleri ön plana çıkmaktadır (Fernandez-Jimenez *et al.* 2007).

Geopolimer betonun kimyasal bileşimi, geleneksel betonun kimsayasal bileşiminde olan CSH jel yapısından farklı olarak, C-A-S-H jel yapısı bulunmaktadır. Hidratasyon sonucunda C₃A ve Ca(OH)₂ ürünleri oluşmadığından geopolimer betonun durabilite özellikleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Geopolimer betonun durabilitesi, karışım oranına, alüminosilikat kaynağına, kür sıcaklığına, alkali aktivatör türüne, silis modülüne, ham maddelerin özelliğine ve oranına bağlıdır (P. Zhang *et al.* 2020; Amran *et al.* 2021).

Donma çözülme

Donma çözülme etkisi genel olarak çimento ve betonun iç yapısında çatlamalara, betonun genişmesine ve kütle kaybına neden olmaktadır (Hobbs, 2001). Beton yapıların dayanıklılığında donma çözülme direnci önemli bir faktördür. Betonun donma çözülmeye karşı direnci, aşırı soğuk bölgelerdeki ve su altı yapıları için en temel dayanıklılık değerlendirme kriterlerinden biridir. Yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde donma çözülmeye çoğu

çalışma uçucu kül, granül cüruf ve metakaolinden türetilen geopolimer malzemeler üzerine olmuştur.

Degirmenci (2018), yapmış olduğu deneysel çalışmasına göre alkali FA içerikli geopolimer beton ile benzer basınç dayanımı elde edilen geleneksel betonun donma çözülme direnci karşılaştırıldığında, donma çözülme direnci geopolimer betonun 2,2 katına çıktığını tespit etmiştir.

Pilehvar *et al.* (2019) tarafından yapılan bir çalışma, geleneksel beton ile uçucu kül veya cüruf bazlı mikro kapsüllenmiş faz değişim malzemeleri içeren geopolimer beton numunelerinin donma çözünme dirençlerini karşılaştırmıştır. Araştırmanın sonuçları, 28 donma çözülme döngüsü sonrasında, mikro kapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler eklenmiş geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımının 74 MPa'ya ulaştığını, buna karşın geleneksel beton numunelerinin basınç dayanımının 44 MPa'da kaldığını göstermiştir. Bu bulgular, faz değişim malzemelerinin eklenmesinin, geopolimer betonun donma çözülme direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin betonun mekanik özelliklerine olumsuz etki eden donma çözülme döngülerinin zararlı etkilerini azalttığı da belirlenmiştir.

Aygörmez *et al.* (2020) yaptıkları çalışmada, geopolimer beton numunelerinin 56 donma çözülme döngüsüne nemli ortamda maruz kaldıktan sonra ağırlıklarında artış gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu ağırlık artışının, numunelerdeki kılcal boşlukların su ile dolmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Araştırmada, geopolimer betonlardaki kılcal boşluk miktarını azaltmak için silis dumanı ve kolemanit atığının katkı maddesi olarak kullanılması önerilmiştir. Bu katkı maddelerinin eklenmesiyle daha yoğun ve kompakt bir beton yapısı elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

Islanma kuruma

Islanma kuruma çevrimleri, betonun dış ortam koşullarına maruz kaldığında tekrar eden nem alma ve kuruma süreçlerini ifade eder. Bu döngüler, betonun gözenekli yapısı içinde nemin sürekli değişmesine yol açarak, içsel gerilimler oluşturur. Bu gerilimler zamanla mikro çatlaklara neden olabilir. Çatlaklar, betonun geçirgenliğini artırarak dışarıdan gelen agresif maddelerin (özellikle klorür ve sülfat iyonları gibi) betona kolayca nüfuz etmesine neden olur. Sonuç olarak, bu zararlı iyonlar beton içindeki donatıları korozyona uğratarak betonun dayanıklılığını olumsuz etkiler (Kılınçkale, 2003).

Ngo *et al.* (2022) yaptığı çalışmada, geopolimer betonun ıslanma kuruma döngülerinin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Deneyde

kullanılan malzemeler arasında metakaolin, sodyum silikat (alkali aktivatör) ve su yer almaktadır. Karışım oranları, malzeme performansını artıracak şekilde optimize edilmiştir. Numuneler, belirli oranlarda metakaolin ve alkali aktivatör karıştırılarak, homojen bir kıvam elde edilecek şekilde hazırlanmıştır. Karışım, uygun kalıplara dökülüp, belirli bir süre (genellikle 24 saat) nemli ortamda bekletilmiştir. Ardından, numuneler belirli bir sıcaklıkta kürlenmiştir. Deneysel prosedürde, hazırlanan geopolimer beton numuneleri belirli bir süre boyunca ıslanma kuruma döngülerine tabi tutulmuştur. Geopolimer betonun dayanıklılığını değerlendirmek için ıslanma kuruma döngüsü testleri sırasında altı farklı çözelti kullanılmıştır. Bu çözeltiler arasında içme suyu, 0,725 g/l, 6,7 g/l ve 12 g/l tuzlu su, pH = 4 ve pH = 6 asidik sular yer almaktadır. Numuneler 14 günlük kürlenme süresinin ardından 12 döngüye tabi tutulmuştur. Her döngüde, numuneler önce 5 saat daldırılmış, ardından 70 °C'de 42 saat ısıtılmış işlem uygulanmış ve oda sıcaklığında bir saat bekletilmiştir. Bu süreç, her döngüde yüzeydeki nem değişikliklerini ve kütle kaybını hesaplamak için tekrarlanmıştır. Testlerden sonra, numunelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla tek eksenli sıkıştırma ve çekme testleri yapılmıştır. Islak durumda yapılan mekanik testler için, numuneler su çözeltisine daldırıldıktan sonra hava ile kurutulmuştur. Deneysel sonucunda, ıslanma kuruma döngülerinin geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olduğu belirlenmiştir. Aşırı ıslaklık ve kuruma hem sıkıştırma hem de çekme dayanımında kayıplara yol açmıştır. Ayrıca, ıslanma kuruma döngülerine maruz kalan numunelerde su emme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, betonun dayanıklılığını azaltan bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Mikro yapısal analizlerde, ıslanma kuruma döngüsünün betonun mikro yapısında değişikliklere yol açtığını göstermiştir. Özellikle porozite artışı ve iç yapının bozulması gibi sonuçlar malzemenin genel dayanıklılığını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.

Sülfat etkisi

Beton yapıların uzun vadeli dayanıklılığını etkileyen en önemli durabilite sorunlarından biri sülfat etkisidir. Yeraltı suyundan, topraktan ve deniz suyundan gelen sülfat iyonları, özellikle iskeleler, köprüler, temeller, beton borular vb. gibi yapılarda, betonun genişlemesine, çatlamasına ve bozulmasına neden olur. Sülfat iyonları, potasyum, sodyum, magnezyum ve kalsiyum iyonları gibi diğer iyonlarla kombinasyon halinde bulunur (Brown, 1981; Wee *et al.* 2000; Al-Akhras, 2006).

Sülfat etkisi, sülfat iyonlarının kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminat hidrat ile reaksiyonu ile olur ve bu reaksiyondan ürün olarak alçı ve etrenjit oluşur. Sülfat etkisi sonrası ürün olarak ortaya çıkan alçı ve etrenjit, ilk tepkime maddelerinden 1,2 ila 2,2 kat fazla hacimlidir (Hooton, 1993). Sülfat etkisi sonrası ortaya çıkan bu ürünler, beton yapıların

hacimsel olarak genişlemesine, çatlamasına, bozulmasına yol açar. Etrenjit ve alçı oluşumu sonrası kalsiyum bileşimi, C-S-H jelinin bozulmasına sebep olmaktadır (Mehta, 1983; Al-Akhras, 2006). Geopolimer betonda kullanılan alüminosilikat içerikli toz malzemenin kimyasal reaksiyonu sonrası oluşan üründe etrenjit ve alçı içermez, bu sebeple sülfat direncinde dayanıklıdır (Rattanasak and Chindapasirt, 2014). Geopolimer betonda var olan Ca/Si oranı düşük C-A-S-H jelleri, C-S-H jeline göre daha kararlı bir yapıya sahip olmasından dolayı geleneksel betona göre sülfat etkisinde daha iyi direnç gösterir (Fu *et al.* 2021).

Albitar *et al.* (2017) çalışmasında, %5'er sodyum klorür, sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve %3 sülfürik aside maruz kalan geleneksel beton ile uçucu kül esaslı geopolimer betonun davranışları incelenmiştir. Yapılan basınç deneyi sonucunda, geopolimer betonun basınç dayanımında %10,9 azalma tespit edilmesine karşın, geleneksel betonun basınç dayanımında %26,6 azalma gözlemlenmiştir.

Asit etkisi

Çimento ve betonların asit dirençleri, gözenekli matris ve yüksek pH değerinden dolayı zayıftır. Asit, çimentolu betondaki CH ve CSH jeliyle kimyasal reaksiyona girerek jel oluşumunu engeller veya su içerisinde çözünen maddeler oluşturup betonun tahrip olmasına neden olur. Asit korozyonu, CSH ve CAH ayrışmasına neden olarak betonun dayanımını azaltır (Tang *et al.* 2006; A. Wang *et al.* 2020).

Asit direnci agresif ortamlara maruz kalan yapılar için çok önemlidir. Geleneksel Portland çimentolu betonlar asit ortamlarına maruz bırakıldığında, saldıran asitin kalsiyum tuzları oluşur ve beton dayanım kaybederek hızlı bir şekilde bozulur. Geopolimer bağlayıcılar ise, Si-O-Al bağlarının kırılması ve Si-OH ile Al-OH bağlarının sayısının artması sonucu bozulur. Bu durum, geopolimer matrisindeki silisik asit miktarının artmasına neden olur (Bakharev, 2005), bu da ağırlık kaybı ve Si/Al oranının artmasına neden olurken, bu durum malzemenin yapısal bütünlüğünü etkileyebilir. Asit etkisi sonrası alüminosilikat yapının kırılması, basınç dayanımında düşüşe ve çatlak oluşumuna yol açabilir. Bu süreçler, geopolimerlerin mühendislik özelliklerini anlamak ve iyileştirmek için önemlidir (Yankwa Djobo *et al.* 2016).

Mallikarjuna Rao and Kireety, (2019) yapmış oldukları çalışmada, FA ve YFC içeren harçların sülfürik ve nitrik asit çözeltilerine maruz kalma durumlarını incelemiştir. Araştırma, %100 uçucu kül içeren harçların, YFC katkılı harçlara kıyasla asitlere karşı daha iyi dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Goyal *et al.* (2009), yapmış oldukları bilimsel çalışma, betonun asit saldırılarına karşı direncinin, asidin türüne ve oluşan kalsiyum tuzlarının çözünürlüğüne bağlı olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, mineral katkı maddeleri eklenmiş betonların, özellikle uçucu kül ve YFC içeren geopolimer betonların, asit saldırılarına karşı daha dayanıklı olduğunu ortaya koymuştur. 90 günlük bir test süresince, bu tür betonlar sadece %3 civarında ağırlık kaybı yaşarken, normal beton %9,45 civarında ağırlık kaybı göstermiştir.

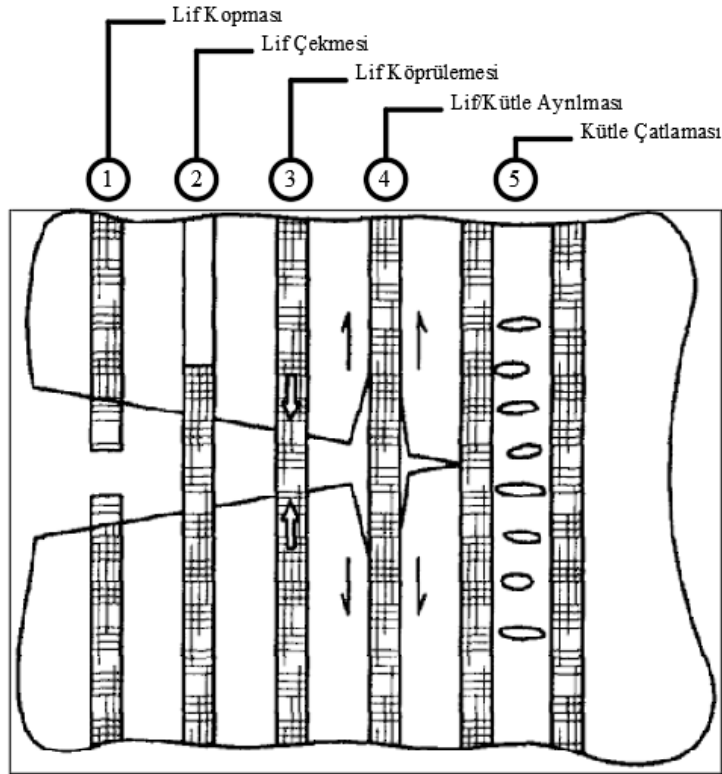
Geopolimerde mekanik dayanım

Zhou *et al.* (2024) yapmış oldukları çalışmada, PVA lifleriyle güçlendirilmiş geopolimer kompozitin (EGC) süneklik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini değerlendirmiştir. Geopolimer matrisine ağırlıkça %0-%3 arasında değişen oranlarda PVA lifleri eklenmiş, su/bağlayıcı oranı, çimento/kum oranı ve lif türünün etkileri reolojik, basınç, eğilme ve aksel çekme testleriyle incelenmiştir. Sonuçlar, EGC'nin 7 günlük basınç dayanım sonuçlarının, 28 günlük basınç dayanımının %80-92'sine ulaştığını göstermiştir. Geliştirilen kompozit, 70 MPa'ya kadar basınç dayanımı ve %4'e kadar çekme sünekliği sergilemiştir. Kum/bağlayıcı oranı arttıkça mekanik özellikler iyileşmiş, su/bağlayıcı oranı arttıkça azalmıştır. EGC'nin gerilme-şekil değiştirme eğrisi, ECC ile benzerlik göstermiş ve iki aşamalı deformasyon sertleşmesi sergilemiştir: Çatlama öncesinde matris, çatlama sonrasında lifler gerilimi taşımıştır. PVA liflerinin eklenmesi, malzemenin performansını artırarak onu daha sünek, dayanıklı ve gerilime dirençli hale getirmiştir.

Bayrak *et al.* (2023) yapmış oldukları deneysel çalışmada, kürlenme sıcaklığı, atık kolemanit (WCM), atık mermer tozu (MT) ve çimento klinker agregasının (CCA), geopolimer kompozitlerin (GC) erken fiziksel ve mekanik özellikleri ile mikro yapısı ve yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. GC YFC, metakaolin ve silis dumanı kullanılarak NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileri ile aktive edilmiştir. MT, WCM ve CCA dolgu maddeleri kullanılarak dört GC karışımı hazırlanmış ve bu karışımlar 20°C, 60°C ve 90°C'de 8 saat kürlenmiştir. Kürlenme sıcaklığı ve dolgu maddelerinin GC'nin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, gözeneklilik ve kılcallık gibi özelliklerine etkileri araştırılmış, ayrıca yüksek sıcaklıklardaki performansları değerlendirilmiştir. 100 kg/m³ MT ve 750 kg/m³ CCA içeren M2 karışımı, tüm sıcaklıklarda en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. M1 karışımında ise kürlenme sıcaklığı arttıkça basınç dayanımında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Maksimum WBM ve minimum CCA içeriğine sahip M4 karışımı, yüksek sıcaklıklarda dayanım artışı sergilemiştir.

Lif takviyeli geopolimer kompozitler

Lif takviyeli beton (Fiber Reinforced Concrete - FRC), beton karışımına eklenen lifler sayesinde güçlendirilmiş bir yapı malzemesidir. Lifler, çelik, cam veya polimer gibi farklı malzemelerden yapılabilir ve betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılır. FRC'nin önemli özelliklerinden biri, çatlama ve kırılma gibi hasarların önlenmesine yardımcı olmasıdır. Lifler, betonun çekme dayanımını artırarak yapısal bütünlüğü korur ve çatlakların yayılmasını kontrol eder (Pacheco-Torgal *et al.* 2012). Ayrıca, lif takviyeleri, darbeler sırasında enerji emilimini artırarak dayanıklılığı artırır ve bu, özellikle zorlu çevresel koşullar altında büyük bir avantaj sağlar. Lif takviyeli beton, köprüler, yollar ve deprem dayanıklılığı yüksek binalar gibi çeşitli altyapı projelerinde kullanılmaktadır. Lif takviyesi, çatlakların oluşumunda deformasyonların ilerlemesini kontrol etmeye yardımcı olmaktadır. Çatlakların çoğalması sırasında enerjinin yutulması, genellikle liflerin dağılımındaki ayrılma ve çekilme durumuna bağlıdır. Lif kopması, lif-matris arasındaki aderansın zayıflaması sonucu meydana gelmektedir. Lif çekmesi, liflerin beton matrisinden kısmen veya tamamen sıyrılmasıdır. Lif köprülemesi ise, liflerin aşırı çekme gerilimine maruz kalarak kırılması veya kopması ve bu tür bir durum, genellikle yüksek dayanımlı lif takviyeli betonlarda görülmektedir (Akeed *et al.* 2022). Bu işlemler, Şekil 6'da gösterildiği gibi, kütle çatlama, lif/kütle ayrılması, lif köprülemesi, lif çekmesi ve bir çatlak matris boyunca lif boyunca yayılırken lif kopmasını içermektedir (Zollo, 1997).



Şekil 6. Lif takviyeli betonda (FRC) enerji yutma mekanizması (Zollo, 1997).

Lif takviyeli geopolimer beton hem mekanik özellikleri hem de dayanıklılığı sürdürülebilirliği açısından göze çarpan avantajları sunmaktadır. Özellikle çelik ve cam liflerinin kullanımı, betonun genel katkısını önemli ölçüde artırdığını ortaya koyduğunu göstermektedir (Mallinadh *et al.* 2020; Jat *et al.* 2023).

Lifler, organik veya inorganik malzemelerin en gelişmiş özelliklerini taşır ve dayanım ile elastisite modülü açısından genellikle bu malzemelerin daha büyük çap ve hacimdeki formlarına kıyasla çok daha üstündür. Çeşitli özellikler ve ihtiyaç alanlarına göre birçok farklı lif türü bulunmaktadır. Lifler, yapısal özelliklerine göre çeşitli gruplara ayrılabilir. Bazı temel gruplar aşağıdaki gibidir (Acun, 2000):

Organik lifler; (Acun, 2000)

- Hayvansal Lifler (yün, ipek, kıl)
- Bitkisel Lifler (akwara, bambu, ahşap, jüt, hindistan cevizi kabuğu, sisal, şeker kamışı posası, keten ve kenevir)
- Mineral Lifler (asbest, metal lifler, karbon, cam)

İnorganik lifler;

- Polimer Lifler
- Metalik Lifler
- Seramik Lifler

Polivinilalkol (PVA) lif

PVA lifi, yaklaşık 50 yıl önce Japonya'da üretilen ilk organik liflerden biri olup, zamanla çeşitli alanlarda kullanılmıştır. 1980'li yıllardan itibaren ise özellikle çimento bazlı kompozitlerin güçlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmıştır. PVA liflerinin beton veya çimentolu kompozitlerde kullanılması, bu malzemelerin mekanik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirmiştir. PVA lifli karışımlar, yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahip olmasının yanı sıra, Portland çimentosu ile mükemmel kimyasal uyum gösterir. Bu durum, lif ve matris arasında güçlü bir aderans oluşmasını sağlar (Noushini *et al.* 2013). Kesme kuvvetleri tek eksenli basınç yükleri altında olduğundan, PVA lifleri çok sayıda küçük takviye görevi görür ve kesme anında ekseni bir arada tutar (Atahan *et al.* 2013). PVA liflerinin geopolimer kompozitlerdeki kullanımı üzerine yapılan çalışmalar, bu liflerin malzemenin mekanik özelliklerini artırmada önemli rol oynadığını göstermektedir. PVA liflerinin geopolimer matrisine eklenmesi yüzeyinde güçlü bir aderans oluşturur. Bu durum, malzeme çekme dayanımını ve tokluğunu artırmaktadır (W. Li and Du, 2018).

W. Li and Du (2018) tarafından yapılan çalışmada, alkali aktive edilmiş sınıf F uçucu kül, Portland çimentosunun yerine geçebilecek yenilikçi bir bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, 10 M NaOH çözeltisi ile aktive edilen uçucu kül ve PVA lif takviyesi içeren geopolimer harcın mekanik ve taşıma özellikleri incelenmiştir. Harç, 80°C'de üç gün süreyle kürlenerek, aktivatör, uçucu kül ve kumun belirli bir oranla karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerin yanı sıra, su emiciliği ve klorür penetrasyonuna karşı direnç gibi taşıma özellikleri de değerlendirilmiştir. PVA lifleriyle güçlendirilmiş geopolimer harçların çatlak köprüleme yeteneği ile çekme ve eğilme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir.

Öz vd (2023) çalışmasında, PVA lifinin ve kolemanitin GBFS-metakaolin bazlı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mikro yapıyı yoğunlaştırmak amacıyla kuvars tozu yerine kolemanit kullanılmış, kırılabilirliği önlemek için ise PVA lifi eklenmiştir. Çalışmada, 8 saatlik kürlenme sürecinde ortam ve ısı kürlenmenin etkileri değerlendirilmiştir. Ortam kürlenmesinde kolemanit içeriği arttıkça gözeneklilik artarken, ısı kürlenme ile gözeneklilik azalmış ve mekanik özellikler iyileşmiştir. %0,25 PVA lifi kılcal su emilimini azaltırken, %0,5 PVA lifi mekanik performansı artırmıştır. Mikro yapı analizlerinde, kolemanitin geopolimerizasyona katkı sağladığı, ancak yüksek lif içeriğinde lif aglomerasyonuna bağlı olarak gözenekliliğin arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, ısı kürlenme ile kolemanit ve PVA lifi kullanılarak kısa sürede yüksek dayanımlı geopolimerlerin üretilebileceği ve en uygun PVA lifi oranının %0,25 olduğu tespit edilmiştir.

M. Zhang *et al.* (2024) tarafından yürütülen bu çalışma, tek bileşenli geopolimerlerde tokluk ve maliyet etkinliğini artırmak amacıyla PVA, polietilen (PE) ve cam liflerin (GF) katkı maddesi olarak kullanımını incelemiştir. Liflerin etkileri, basınç dayanımı, üç noktalı ve dört noktalı eğilme testleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, lif katkısının gözenekliliği artırarak basınç dayanımını azalttığını, ancak çatlak köprüleme ve yük transferi mekanizmaları sayesinde tokluğu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. %2 PVA lifi içeren numunelerde 28 günlük basınç dayanımı %12 azalmış, GF katkısı ise kırılabilir yapısı nedeniyle en düşük dayanımı sergilemiştir. Buna karşın, PE ve PVA lifleri matrisle daha iyi bir uyum sağlayarak dayanımda kısmi iyileşme göstermiştir. Eğilme dayanımı ve tokluk analizlerinde, %2 PVA lifi çatlak yayılımını sınırlandırarak en yüksek eğilme dayanımını (7,8 MPa) ve tokluğu sağlamıştır. %1 PVA + %1 PE karışımı ise %14 daha yüksek tokluk performansı ve %10 maliyet avantajı sunarak dikkat çekmiştir. Mikroyapısal analizlerde, PVA liflerinin matrisle daha iyi entegre olduğu ve gözenekliliği azalttığı gözlemlenmiştir. Cam liflerin kırılabilirliği mikro çatlakların yayılmasına yol açmıştır. XRD analizleri, liflerin kristal yapıyı değiştirmediklerini, ancak fiziksel

olarak matris yoğunluğunu artırarak dayanımı güçlendirdiğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, %2 PVA lifli tokluk ve dayanım açısından en iyi sonuçları verirken, %1 PVA + %1 PE karışımı maliyet etkinliği ve dayanıklılığı optimize etmiştir.

Polipropilen (PP) lif

Birçok araştırma, PP liflerinin geopolimer betonlarda çekme dayanımı ve elastisite modülde önemli bir artış sağladığını göstermektedir. Özellikle düşük dozajlarda PP liflerinin kullanımı elastisite modülü artırabilirken, daha yüksek dozajlarda bu etkinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, PP liflerinin kullanımı çatlama direncini iyileştirmektedir. Ancak, PP lifler genellikle çelik gibi daha sert liflere göre daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir ve bu da belirli kapasitelerde sınırlamalara yol açmaktadır (T. Wang *et al.* 2023; Jan *et al.* 2024).

S. Yang *et al.* (2023) tarafından yürütülen çalışmada, uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda kullanılan bazalt (BF), polipropilen (PP) ve çelik (S) liflerinin mekanik dayanım ve kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini incelemiştir. %0,2, %0,4, %0,6 ve %0,8 oranlarında PP, BF ve S lifleri ile hazırlanan numuneler üzerinde basınç, eğilme ve çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuçlar, PP liflerinin özellikle sünek yapısıyla beton matrisinde çatlak yayılımını sınırlandırdığını ve enerji yutma kapasitesini artırdığını göstermiştir. PP katkılı numunelerde, %0,4 ve %0,6 oranlarındaki katkı basınç dayanımında hafif artış sağlarken, %0,8 oranında lif topaklanması nedeniyle dayanımda kısmi düşüş gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı testlerinde ise %0,6 PP içeren numunelerde %35'lik bir artış ile maksimum kırılma dayanımına ulaşılmıştır. Bu durum, PP'nin çatlak köprüleme ve enerji yutma mekanizmalarını etkin bir şekilde sunduğunu ortaya koymaktadır. Mikroyapısal analizler, PP'nin beton matris içinde homojen bir dağılım sergileyerek mikro çatlak oluşumunu kontrol altına aldığını ve enerji yutma kapasitesini artırdığını doğrulamıştır. Ancak yüksek PP oranlarında, ara yüzey aderansının azalması ve gözenekliliğin artması nedeniyle dayanım performansı sınırlanmıştır. Çalışma %0,4 ve %0,6 PP katkısının geopolimer betonun dayanıklılığını ve kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırdığını, optimum oranların üzerinde kullanımın ise dayanımı olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. PP'nin sünekliği ve enerji yutma özellikleri, geopolimer betonun gevrek davranışını iyileştirerek, mühendislik uygulamalarında dayanıklı ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Al-Kerttani and Mutar (2021) yapmış oldukları çalışmada, PP liflerin geopolimer betonun mekanik özelliklerinin geliştirilmesini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında PP lif ilavesiyle hazırlanan numuneler üzerinde çökme, sıcaklık değişimi, eğilme dayanımı ve dinamik yüklenme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, PP lif miktarı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığını göstermiştir. %0,5 oranında PP lif eklenmesi, basınç

dayanımını artırırken, daha yüksek oranlarda dayanım azalmaya başlamıştır. Eğilme dayanımı açısından, lif miktarının artmasıyla dayanım ve ilk çatlak yükü yükselmiş, ayrıca betonun sapması azalmıştır. Bu durum, malzemenin enerji emilimini artırarak eğilme tokluğunu geliştirmiştir. İstatistiksel analizler, PP lif hacminin geopolimer betonun performansı üzerinde en etkili parametre olduğunu ortaya koymuştur. Doğru lif oranları, geopolimer betonun mekanik özelliklerini optimize edebilirken, aşırı lif kullanımı işlenebilirlik ve dayanımda olumsuz etkilere yol açmıştır. Sonuç olarak, PP liflerin doğru oranlarda kullanımı, geopolimer betonun dayanıklılık, eğilme tokluğu ve mekanik performansını artırabilir. Bu çalışma, PP lif hacminin betonun performansını belirlemede kritik bir rol oynadığını ve geopolimer betonun geliştirilmesinde önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

Bayraktar *et al.* (2021) çalışmasında, çimento ikamesi olarak %25 FA içeren ve içermeyen beton karışımları üretilmiş, iri agregaya yerine %0, %25 ve %50 oranlarında geri dönüştürülmüş agregaya (RCA) ve hacimce %0, %3 ve %6 oranında PPL kullanılmıştır. Betonun fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiş; basınç ve yarmada çekme dayanımı, su emme, gözeneklilik ve aşınma performansı değerlendirilmiştir. FA içermeyen karışımlarda %25 RCA ve %6 PPL'nin birlikte kullanımı dayanımı artırırken, FA içeren karışımlarda %50 RCA ve %3 PPL kombinasyonu olumlu sonuçlar vermiştir. Genel olarak %3 PPL içeren karışımlar, düşük gözeneklilik ve su emme değerleri göstermiştir. Dayanıklılık testleri sonucunda, %50 RCA ve PPL içeren karışımlar en iyi aşınma performansını sergilemiş ve MgSO₄ maruziyetine karşı en düşük mukavemet kaybı %6 PPL içeren FA ve RCA içermeyen karışımda gözlenmiştir.

Maras (2021) yapmış olduğu çalışmada, alkali aktive edilmiş geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiş ve PP, GF ve poliamid (PA) liflerin hibritizasyon etkilerini araştırmıştır. M15 hibrit geopolimer numunesi, diğer matrislere kıyasla en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. %1,75 PP lif takviyesi ile sünek bir davranış elde edilirken, PA lif takviyeli kompozitlerde tepe yük kapasitesi daha düşük bulunmuştur. Mikroyapısal analizler, hibrit liflerde belirgin bir hasar olmadığını ve PP lifin çevresinde oluşan yüksek dayanımlı geopolimer matrisin lif çekilmesine veya kırılmasına karşı koyduğunu göstermiştir. PA lif oranının azaltılmasıyla basınç dayanımı artmış ve en yüksek değer, %0,25 PA ile %1,75 GF oranında hibrit lif takviyeli numunelerde gözlemlenmiştir. Hibrit kompozitlerin, iyi mekanik performans, güçlü aderans ve yüksek süneklik sergilediği sonucuna varılmıştır.

Hassan *et al.* (2024) yürüttüğü çalışma, alkali aktive edilmiş cüruf betonunda hibrit PP lif katkısının mekanik dayanım ve büzülme davranışına etkilerini incelemiştir. %0,6 makro PP lif katkısı basınç dayanımını %8 artırırken, %0,3 makro ve %0,1 mikro PP lifi içeren hibrit

katkı %9 dayanım artışı sağlamıştır. Hibrit lif katkısı, büzülme %15 azaltarak çatlama riskini önemli ölçüde düşürmüştür, yalnızca makro lif katkısı ise %6 azalma ile sınırlı kalmıştır. Eğilme dayanımında hibrit katkı %7 artış sağlarken, elastisite modülündeki düşüşü %4 ile sınırlı tutmuştur. Sonuç olarak, hibrit PP lif katkısı, alkali aktive edilmiş cüruf betonun dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırarak, geleneksel lif katkılarına kıyasla üstün bir seçenek sunmuştur.

Ahıskalı *et al.* (2024) tarafından yapılan çalışmada, atık çelik cürufu agregası ve uçucu külün geri dönüşümünü amaçlayan polimer lif takviyeli tek bileşenli köpük geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, sodyum metasilikat aktivatörü kullanılarak uçucu kül bazlı geopolimerler üretilmiş ve kireç taşı agregası, %100'e kadar çelik cürufu ile değiştirilmiştir. %1 ve %2 oranında eklenen PP lifleri, yoğunluğu düşürerek dayanıklılığı artırmıştır. Sonuçlar, çelik cürufu agregasının mekanik dayanımı iyileştirdiğini, PP liflerinin ise özellikle eğilme dayanımını artırdığını göstermiştir. Donma, sülfat etkisi ve yüksek sıcaklık testlerinde çelik cürufu agregasının dayanıklılığı artırdığı, su ile hızlı soğutmanın ise dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir. En uygun karışımın %50 çelik cürufu agregası ve %1 PP lifi içerdiği tespit edilmiştir. Çalışma, çevresel sürdürülebilirliği artıran bu betonun, ses bariyerleri ve yangına dayanıklı paneller gibi çeşitli yapı uygulamalarında kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Tayeh *et al.* (2024), hibrit liflerin (PP lif ve bazalt liften oluşan), cüruf, metakaolin ve doğal zeolit bazlı geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisini incelemiştir. 10-20 kg/m³ bazalt lifler ve PP lif içeren numuneler, 250°C, 450°C ve 650°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Bazalt lif katkısı, yüksek sıcaklık dayanımını artırırken, PP lif eklenmesi mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir. En yüksek dayanım 10 kg/m³ Bazalt lif içeren numunede gözlemlenmiştir (67 MPa basınç, 7,52 MPa eğilme dayanımı). Çalışma, bazalt lif katkısının geopolimer kompozitlerde mekanik özellikleri iyileştirdiğini ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Masoud *et al.* (2024) tarafından yürütülen bu çalışma, PP lif katkısının geopolimer betonun reolojik, mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. %0,8, %1,0 ve %1,2 PP lif oranlarıyla hazırlanan numuneler hem geleneksel döküm hem de 3D baskı yöntemleriyle üretilmiştir. Sonuçlar, %0,8 PP oranının en uygun kıvam ve yerleşim özelliklerini sağladığını, daha yüksek oranların ise viskoziteyi artırarak işlenebilirliği ve baskı kalitesini olumsuz etkilediğini göstermiştir. Mekanik dayanım açısından, %0,8 PP katkısı eğilme dayanımında %8,2, çekme dayanımında %44,4 artış sağlarken, basınç dayanımında %26,2 oranında bir azalma kaydedilmiştir. %1,0 ve %1,2 oranlarında ise tüm dayanım parametrelerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Mikroyapısal analizler, yüksek PP oranlarının

matris içinde boşluk oluşumuna neden olduğunu ve bunun mekanik performansı olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Sonuç olarak, %0,8 PP lif katkısı, mekanik performans ve işlenebilirlik açısından en iyi sonuçları sağlamıştır. Daha yüksek oranların boşluk oluşumunu artırdığı ve dayanımı azalttığı tespit edilmiştir. Çalışma, PP lif oranının doğru optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Atık mermer tozu (MT)

Mermer, günümüzde yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Kalkerlerin yapısında meydana gelen bozulmalar sonucu malzemenin yeniden kristalleşmesiyle meydana gelen mermer, genel olarak inşaat malzemesi ve dekoratif amaçlı kullanımı mevcuttur. Mermer ocaklarından çıkarılarak işlenen mermer, işleme esnasında yaklaşık olarak %50 oranında mermer atığı oluşturmaktadır. Oluşan bu atıklar çeşitli yerlerde depolanır. Zamanla biriken bu mermer kalıntıları doğada olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Mermer ocaklarında ortaya çıkan mermer atıkların geri dönüştürülebilmesi endüstriyel anlamda kazanç sağlayarak oluşturduğu çevresel sorunların önüne geçilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple mermer kalıntılarının kullanılabilirliği konusunda bulunabilecek alternatif yöntemler, mermer işletmecilerine ve ülke ekonomisine kaynak sağlamakla birlikte mermer ocaklarının çevreye verdiği olumsuz etkilerinin de önüne geçecektir. Mermer tozunun geri dönüştürülerek kullanılması sadece mermer kullanımının çevresel olumsuz etkilerini azaltmakla kalmayarak, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmayı sağlayıp diğer doğal kaynakların kullanımındaki azalmayı önleyerek birden çok alanda iyileşmeyi sağlamaktadır.

Öz *et al.* (2024) geopolimer kompozitlerde atık mermer tozu (MT) kullanımını inceleyerek sürdürülebilir bir inşaat malzemesi alternatifi sunmayı amaçlamaktadır. MT, geri kazanılmış asfalt kaplama ile hem ince hem de iri agregaların yerine kullanılarak geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirme potansiyeline sahiptir. Deneyler, farklı oranlarda MT (%0, %10, %25 ve %50) ve metakaolin (MK, %0 ve %10) içeren numunelerin 8 saat boyunca 50 °C ve 75 °C'de kürlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, MT kullanımının mekanik dayanımı artırabildiğini, gözenekliliği azalttığını ve çevresel etkileri sınırladığını göstermektedir. Özellikle %10 MK ile MT'nun kombinasyonu, dayanım kayıplarını azaltmış ve mikro yapı yoğunluğunu iyileştirmiştir.

Kalsit (CaCO₃)

Güney Orta Türkiye'deki Niğde bölgesinde mikronize kalsit üretimi için kullanılan mermerler, Niğde Masifi'nin Üst Kretase dönemine ait Gümüşler, Aşıgediği ve Kaleboynu Formasyonları'nda yer almaktadır. Bölgedeki az sayıda mermer ocağına rağmen, mermerlerin

yoğun kırıklı yapısı, büyük blok veya uygun levha çıkarılmasını zorlaştırmakta, dolayısıyla endüstriyel talepleri karşılamada sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple, üretim çoğunlukla yapı taşı, kırma taş ve mikronize kalsit üzerine odaklanmıştır. Artan talep doğrultusunda mikronize kalsit, ülke ekonomisine katkı sağlayan önemli bir ihracat kalemi haline gelmiştir. Niğde mermerleri, iri taneli yapısı, yüksek CaCO_3 içeriği ve üstün saflık ile beyazlığı sayesinde Türkiye'nin en nitelikli mikronize kalsit kaynakları arasında değerlendirilmektedir (Çiftçi ve Erdağ, 2015). Türkiye, zengin kalsit rezervleri ve yüksek kaliteli kalsit yatakları ile öne çıkmaktadır. Çimento bazlı bileşiklerde kalsit kullanımına yönelik çeşitli araştırmalar yapılmakta olup, bu alanda kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir.

Mikron boyutundaki kalsit, endüstriyel ölçekte üretilen ve performans artırıcı etkisiyle öne çıkan önemli bir katkı malzemesidir. Özellikle hazır sıva ve tamir malzemelerinde dolgu olarak geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bunun yanı sıra, alçı, çimento ve toz polimer koruyucularla birleştirilerek inşaat sektöründe de kullanılabilir. Bu ekonomik etki, kalsit tüketiminde geniş bir potansiyele sahip olan inşaat sektörünü önemli bir pazar haline getirmektedir (Akkaya ve Kesler, 2012).

Kalsit, %95-97 oranında kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren ve karbonatlı kayaların ana bileşeni olan bir mineraldir (Matschei *et al.*, 2007). Kalsit, kristal formunda camsı parlaklıkta, renksiz ve saydam bir yapıya sahiptir. İnce halde kullanıldığında, beyazlık, aşındırıcılık ve aşınmaya karşı direnç kazandırma özellikleri sayesinde boya, kâğıt, dolgu, gübre ve plastik gibi birçok sektörde dolgu maddesi olarak tercih edilmektedir (Dalı *et al.* 2009). Kalsit, betonun dayanım kazanma sürecini hızlandıran bir mineraldir. C-S-H yapılarının oluşumuna uygun çekirdekler sağlayarak hidrasyon reaksiyonlarını destekler ve C_3A oranı yüksek çimentolarla etkileşime girerek bağlayıcı özellikte karboalüminat fazları oluşturur (Matschei *et al.* 2007).

Akçaözöğlü vd (2017) yapmış oldukları çalışmada, Niğde bölgesinden elde edilen mikrokalsit ve Yumurtalık Sugözü Termik Santrali'nden sağlanan uçucu kül kullanılarak betonun performansı analiz edilmiştir. Deney sürecinde bağlayıcı miktarı ve su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuş; mikrokalsit ve kül, çimentoya hem ayrı ayrı hem de %10 ve %20 oranlarında bir arada eklenerek yedi farklı karışım oluşturulmuştur. Bu karışımlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton testleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, mikrokalsitin taze betonun özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Ancak, mikrokalsit katkılı betonlar erken dönemde referans karışım ve kül içeren betona kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. İleri yaşlarda ise mikrokalsit ilavesinin basınç dayanımı, aşınma direnci ve geçirgenlik performansında düşüşe yol açtığı gözlenmiştir.

Akın (2009) çalışmasında mikro silika tozu yerine, 5 ve 20 µm boyutlarında kalsit kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kalsit ilavesinin sonuçları önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve bu etkinin nedenleri ile sonuçları ele alınmıştır. Yapılan testler, kalsit ilavesinin betonun mekanik özelliklerinde belirgin bir değişiklik yaratmadığını göstermiştir. Ancak dayanıklılık testlerinde, kalsit katkısının klor difüzyon geçirimsizlik katsayısını yaklaşık 15 kat artırdığı gözlemlenmiştir. Kalsitin maliyet açısından avantajlı ve yerli bir malzeme olması, mekanik performans üzerinde kayda değer bir etki yaratmazken, betonun dayanıklılığı üzerinde olumsuz bir etkiye yol açmıştır. Bu nedenle, kalsit katkılı betonların büyük kütleli projeler, örneğin barajlar, için uygun olduğu; ancak yüksek klor geçirimsizliği nedeniyle donatılı beton elemanlarda tercih edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Akkaya ve Kesler (2012) yapılan deneysel çalışmada, mikrokalsit, nem ve silis dumanı katkılı beton karışımları üzerinde gerçekleştirilen taze beton deneylerinde priz süresi, sıcaklık gelişimi, dayanıklılık artışı, kırılma enerjisi, geçirimsizlik ve sülfat dayanımı gibi parametreler değerlendirilmiştir. Mikrokalsit katkılı betonlarda işlenebilirlik kaybı ve hızlı prizlenme gözlemlenmiş, erken yaş dayanımı kül ve silis dumanı içeren betonlara göre daha hızlı artış göstermiştir. Ancak, ileri yaşlarda dayanım artışı sınırlı kalmış ve su hasarına karşı direncin düşük olduğu belirlenmiştir. Mikrokalsit, istenilen işlenebilirlik ve basınç dayanımı değerlerini sağlarken, çökme kaybı ve dağılma değerlerinde düşüş görülmüştür. Erken yaşlarda kalsit katkılı betonlar yüksek dayanım gösterirken, ilerleyen yaşlarda kül ve silis dumanı içeren betonların daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, kalsit katkılı betonların yüksek elastisite modülü ve ısıl genişmesi nedeniyle erken çatlak riski taşıdığı, su ve klor geçirimsizliğinin arttığı ve iç yapıda daha fazla kapiler boşluk oluşturduğu saptanmıştır. Sonuç olarak, kalsit katkılı betonların daha fazla geçirgenlik sergilediği ve yığının düşük olduğu, dolayısıyla kullanım alanlarında dikkatli değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Rashad *et al.* (2023) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, kireçtaşı tozu (LS) katkısının uçucu kül geopolimer çimentosunun deniz ortamındaki dayanım performansına etkileri incelenmiştir. %10 ila %60 LS oranlarıyla hazırlanan numuneler, hava, musluk suyu, deniz suyu ve simüle edilmiş gelgit bölgesi koşullarına 3, 6 ve 12 aylık sürelerle maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, %20'ye kadar olan LS oranlarının basınç dayanımını artırdığı, ancak %20'nin üzerindeki katkıların mikro yapıda gözenek oluşumuna neden olarak dayanımı düşürdüğünü göstermiştir. Araştırma, %10 ve %20 LS katkısının mikro yapıdaki boşlukları doldurarak yoğun ve kompakt bir yapı oluşturduğunu, bunun da alkali iyonlarının dış ortamla etkileşimini sınırladığını ortaya koymuştur. Simüle edilmiş gelgit bölgesinde, tekrarlayan

ıslanma kuruma döngüleri dayanım kaybını artırmış, ancak %10 LS katkısı bu kayıpları kontrol altına alarak yapıyı daha dayanıklı hale getirmiştir. Öte yandan, %20'yi aşan LS oranlarının polikondenzasyon reaksiyonlarını engelleyerek su ve iyon geçirimsizliğini artırdığı ve dayanımı olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Sonuç olarak, %10 ila %20 oranında LS katkısı, geopolimer çimentonun deniz ortamındaki dayanıklılığını artırırken, daha yüksek oranlar gözenekli mikro yapı oluşumu nedeniyle dayanımı düşürmüştür. Bu çalışma, optimum LS oranlarının deniz ortamında geopolimer çimentoların performansını artırabileceğini göstermektedir.

Rashad (2022) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, kireçtaşı tozunun (LS) alkali aktifli malzemeler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Araştırma, %10-%30 aralığında LS katkısının alkali aktifli malzemelerde işlenebilirliği artırarak karışımın akışkanlık özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Özellikle %5-%15 LS katkısı optimum işlenebilirlik sağlarken, %30'un üzerindeki oranlar su ihtiyacını artırarak işlenebilirliği sınırlamıştır. Reaksiyon kinetiği açısından, LS katkısı çekirdek etkisiyle reaksiyon ürünlerinin oluşumunu hızlandırmış, bu da matris yoğunluğunu ve erken dönem dayanımını artırmıştır. Ancak %30'un üzerindeki oranlar, reaksiyon hızını düşürmüş ve priz süresinde gecikmelere yol açmıştır. Mekanik dayanım sonuçları, %30'a kadar LS katkısının basınç dayanımını artırdığını ve boşluk doldurma etkisiyle daha sıkı bir matris oluşturduğunu ortaya koymuştur. %15 LS katkısı, su emme kapasitesini azaltarak geçirimsizlik sağlamış, ancak daha yüksek oranlar matris içinde gözeneklilik oluşturup dayanımı olumsuz etkilemiştir. LS'nin büzülme oranlarını azaltarak hacimsel kararlılığı artırdığı, aşınma direnci ve karbonatlaşma üzerine ise sınırlı etkiler gösterdiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, %10-%30 aralığında LS ilavesi, alkali aktifli malzemelerin işlenebilirlik, dayanım ve geçirimsizlik gibi özelliklerini iyileştirerek performanslarını optimize etmektedir. Doğru oranlarda kullanıldığında, LS'nin ekonomik ve çevresel faydalar sağlayarak sürdürülebilir yapı malzemesi geliştirilmesine katkı sunduğu vurgulanmıştır. Ancak, LS'nin etkilerinin daha kapsamlı anlaşılması için ek araştırmalara ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Güllü *et al.* (2021) tarafından yapılan çalışmada, kireçtaşı tozu (LS) ve taban külünden elde edilen geopolimer stabilizatörlerin, zemin iyileştirme uygulamalarında harçlama ve derin karıştırma için kullanılabilirliğini incelemiştir. Portland çimentosu bazlı harçlarda LS, BA, geopolimerize edilmiş kireçtaşı tozu (GLS) ve taban külü, %0-100 oranında çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. LS'nin ince partikül yapısı, boşlukları doldurarak akışkanlığı artırmış ve düşük oranlarda (%10-40) reolojik özellikleri iyileştirerek işlenebilirliği artırmıştır. Ancak %50'den yüksek oranlarda LS kullanımı viskoziteyi artırarak akışkanlığı azaltmıştır. Dayanım testlerinde, GLS ve taban külü katkılı numuneler, 7 ve 28 günlük kürlerde daha yüksek basınç

dayanımı göstermiştir. Buna karşın, LS ve taban külü katkıları daha düşük dayanım performansı sergilemiştir. GLS ve taban külü katkılı harçlar, homojen dayanım ve eksene yakın kırılma davranışlarıyla öne çıkmıştır. Çalışma, LS'nin düşük maliyetli bir katkı olarak reolojiyi iyileştirme potansiyelini ortaya koyarken, dayanım performansı açısından GLS ve taban külünün sürdürülebilir ve etkili alternatifler sunduğunu göstermiştir.

Cwirzen *et al.* (2014) çalışmasında, kireçtaşı tozunun (LS), sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilen metakaolin bazlı geopolimerlerde katkı maddesi olarak kullanım etkileri incelenmiştir. Farklı LS/metakaolin oranları (%30, %50, %70) 3 M ve 5 M NaOH çözeltileriyle aktive edilip 20 °C ve 80 °C'de kürlenmiştir. Çalışmada, düşük molaritedeki (3 M NaOH) çözeltilerin LS'nin çözünürlüğünü sınırlandırarak daha kontrollü bir geopolimerizasyon ve yoğun bir matris oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yüksek molaritedeki (5 M NaOH) çözeltiler ise LS'nin çözünürlüğünü artırmış, ancak aşırı iyon birikimi nedeniyle daha gözenekli ve amorf yapılar oluşmuştur. LS oranının %30-50 aralığında dayanımı artırdığı, ancak %70 oranında bağlayıcı etkinliğini azaltarak dayanımı düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, 80 °C'de kürlenme, geopolimer jel fazlarının oluşumunu hızlandırarak dayanım performansını olumlu etkilemiştir. Çalışma, LS'nin düşük maliyetli ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir katkı maddesi olarak metakaolin bazlı geopolimerlerde dayanım ve matris yoğunluğunu artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak yüksek LS oranları ve yüksek molarite, gözenekli yapılar oluşturarak olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

Chakkor *et al.* (2022) kireçtaşı tozu (LS), mermer tozu (MT) ve bazalt tozunun (BS), metakaolin-kırmızı çamur bazlı geopolimer harçların yüksek sıcaklık ve donma çözülme koşullarındaki mekanik performansına etkilerini incelemiştir. Nehir kumu %25, %50 ve %75 oranlarında LS, MT ve BS ile ikame edilerek hazırlanan numuneler, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve 180 döngü boyunca donma çözülme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlara göre, LS katkılı numuneler 600 °C'ye kadar dayanımını korurken, 800 °C'de mikro yapıdaki boşluk oluşumu nedeniyle dayanımda azalma görülmüştür. Kalsiyum içeriği, yüksek sıcaklıkta C-S-H ve A-A-S-H fazlarının oluşumunu destekleyerek ısıya dayanıklılığı artırmıştır. Donma çözülme testlerinde, LS katkılı numuneler, su emme kapasitesini düşürerek ve mikro çatlak ilerlemesini sınırlandırarak eğilme dayanımı açısından üstün performans göstermiştir. SEM analizleri, LS'nin yoğun ve homojen bir mikro yapı oluşturarak su geçirimsizliğini azalttığını ve dayanımı artırdığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, kireçtaşı tozunun, yüksek sıcaklık ve donma çözülme koşullarına dayanıklı, uzun ömürlü ve sürdürülebilir yapı malzemesi olarak geopolimer harçlarda etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermektedir.

Kabirova *et al.* (2023) tarafından yapılan bu çalışma, metakaolin esaslı geopolimer harçlarda kireçtaşı tozu (LS), bazalt tozu (BS), atık mermer tozu ve geri dönüştürülmüş agrega tozu gibi atık tozların fiziksel ve mekanik özelliklere etkilerini incelemiştir. Nehir kumu %25, %50 ve %75 oranlarında bu tozlarla ikame edilerek 13 farklı karışım hazırlanmıştır. Metakaolin ana bağlayıcı olarak kullanılmış, NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltileriyle aktive edilmiş ve %13 oranında YFC eklenmiştir. Sonuçlara göre, kireçtaşı ve bazalt tozu %50 oranında optimum basınç dayanımı sağlamış; kireçtaşı %12,1, bazalt tozu ise %16,2 dayanım artışı göstermiştir. Atık mermer ve geri dönüştürülmüş agrega tozu ise %25 oranında en iyi dayanımı sunmuştur. Eğilme dayanımı açısından, bazalt ve kireçtaşı tozları öne çıkmış; kireçtaşı tozu, mikro çatlak ilerlemesini sınırlandırmıştır. SEM ve XRD analizleri, kireçtaşı ve bazalt tozlarının mikro yapı yoğunluğunu artırarak çatlak oluşumunu azalttığını, dayanımı ve bağlayıcı fazları güçlendirdiğini göstermiştir. Bazalt tozu, aşınma direnci testlerinde en yüksek performansı sergilerken, kireçtaşı ve mermer tozu da dayanıklılığı artırmıştır. Ultrasonik hız testlerinde, tüm toz katkılı karışımlar referans numunelere kıyasla daha yüksek hız değerleri göstermiş, bu da yoğun ve homojen bir mikro yapı oluşumunu kanıtlamıştır. Çalışma, bu atık tozların geopolimer harçlarda sürdürülebilir dolgu maddeleri olarak başarılı bir şekilde kullanılabileceğini ve hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli katkılar sunduğunu ortaya koymuştur.

Aboulayt *et al.* (2017) çalışması, metakaolin esaslı geopolimerlerde kalsiyum karbonat (CaCO₃) katkısının farklı oranlardaki etkilerini incelemiştir. %0, %4, %8 ve %12 oranlarında metakaolinin CaCO₃ ile ikame edildiği numunelerde reolojik, fiziksel ve mekanik özellikler analiz edilmiştir. NaOH ve KOH çözeltileri ile aktive edilen karışımlar 40 °C'de kürlenmiştir. %6 CaCO₃ katkısının yaklaşık 26 MPa basınç dayanımı sağlayarak en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir. Bu oran, mikroyapıda boşluk oranını azaltıp yoğun bir yapı oluşturarak dayanımı artırmıştır. %12 oranında katkı ise eğilme dayanımını %10,5 oranında artırmış ve en iyi işlenebilirlik performansını göstermiştir. Ancak, yüksek katkı oranları basınç dayanımını olumsuz etkilemiş ve mikroyapıda gözenekliliği artırmıştır. XRD ve SEM analizleri, CaCO₃'ün geopolimerleşmeye doğrudan katılmadığını, ancak dolgu etkisiyle mikroyapıyı güçlendirdiğini ve çatlak oluşumunu azalttığını ortaya koymuştur. Reolojik analizler, artan CaCO₃ oranlarının viskoziteyi artırdığını ve işlenebilirliği iyileştirdiğini göstermiştir. FTIR analizlerinde, CaCO₃'ün geopolimerleşme reaksiyonlarını daha düşük enerjiyle gerçekleştirdiği ve enerji verimliliğini desteklediği belirlenmiştir. Çalışma, %6 CaCO₃ oranının optimum basınç dayanımı, %12 oranının ise eğilme dayanımı ve işlenebilirlik açısından en iyi sonuçları sağladığını ve çevresel sürdürülebilirlik açısından CaCO₃'ün önemli bir katkı malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır.

Qian and Song (2015) tarafından yapılan çalışma, metakaolin bazlı geopolimer harçlarda kireçtaşı tozunun (%10, %15, %20 ve %30 oranlarında) taze ve sertleşmiş özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kireçtaşı tozu, potasyum silikat ve potasyum hidroksit çözeltileriyle aktive edilen harçlara eklenmiştir. Çalışmada, %10 LS katkısının basınç dayanımını %17,43, eğilme dayanımını %14,36 oranında artırdığı ve mikro yapıyı sıkılaştırarak optimum dayanım sağladığı belirlenmiştir. %15 LS katkısı ise işlenebilirlik ve akışkanlık açısından en iyi sonuçları sunmuş, mikro yapıyı destekleyerek homojen bir karışım oluşturmuştur. Ancak %20 LS oranında gözenekliliğin arttığı, dayanım ve mikro yapı homojenliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. %30 LS oranında ise boşluk miktarının artmasıyla dayanım özellikleri belirgin şekilde düşmüştür. XRD ve SEM analizleri, düşük LS oranlarının geopolimer matrisinde daha yoğun bir yapı oluşturduğunu, yüksek oranların ise gözeneklilik ve düzensizliklere yol açtığını göstermiştir. Çalışma, %10-15 LS katkısının geopolimer harçların dayanım, işlenebilirlik ve mikro yapı özelliklerini iyileştirdiğini, ancak daha yüksek oranların bu özellikler üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ortaya koymuştur.

Yüksek fırın cürufu (YFC)

YFC, demir üretiminde oluşan bir yan ürün olup, beton üretiminde çevre dostu bir alternatif olarak önemli bir rol oynamaktadır. YFC, betonun dayanıklılığını artırmak, su emme kapasitesini azaltmak ve kimyasal saldırılara karşı direncini artırmak gibi birçok avantaj sunar. Ayrıca, YFC'nin kullanımı, Portland çimentosuna göre daha düşük enerji gereksinimi ve karbon emisyonları ile sonuçlanmaktadır, bu da onu sürdürülebilir inşaat malzemeleri arasında öne çıkarır (Meyer, 2009). Geopolimer betonlarda ise YFC, alkali aktivatörler ile birleştirilerek kullanılır ve bu süreç, betonun mekanik özelliklerini geliştirmeye yardımcı olur. Araştırmalar, YFC içeren geopolimer betonların zamanla dayanım kazandığını ve uzun vadede geleneksel betonlardan daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir (Dodo *et al.* 2024). YFC'nin geopolimer betonlara entegrasyonu hem estetik hem de teknik açıdan avantajlar sağlayarak, büyük ölçekli inşaat projelerinde tercih edilmektedir (Bakharev, 2005).

Bayrak *et al.* (2024) silika tozu ve pirinç kabuğu külünün, cüruf bazlı önceden paketlenmiş geopolimerlerin mühendislik özellikleri ve yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ana bağlayıcı olarak kullanılmış ve silika tozu ile pirinç kabuğu külünü, %7,5 ve %15 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu yerine ikame edilmiştir. Numuneler 35°C ve 70°C'de kür edilerek fiziksel, mekanik ve mikro yapısal özellikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kür sıcaklığının dayanımı artırdığını, özellikle 70°C'de kür edilen silika tozu içeren numunelerin en yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Yüksek sıcaklık testlerinde (150°C, 300°C, 600°C),

35°C’de kür edilen pirinç kabuğu külü içeren numuneler yüksek sıcaklığa karşı daha iyi basınç dayanımı gösterirken, 70°C’de kür edilen silika tozu içeren numuneler daha az kütle kaybına uğramıştır.

W. Li *et al.* (2024) tarafından yürütülen çalışma, YFC, EGC üzerindeki tek eksenli basınç yorulma özelliklerini incelemektedir. Çalışmada, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC katkısı içeren numuneler tek eksenli statik ve yorulma testlerine tabi tutulmuş ve elde edilen yorulma ömrü sonuçları Weibull dağılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bulgular, YFC katkı oranının artmasıyla EGC’nin yorulma ömründe önemli azalmalar yaşandığını göstermektedir; %40 YFC oranına sahip numunelerin yorulma ömrü, %10 oranlı numunelere göre %99,4 oranında azalmış, ancak bu numunelerin sertliği %10 oranındaki numunelere kıyasla 2,5 kat daha yüksek ölçülmüştür. Yorulma yükleri altında EGC’nin toplam gerilme birikimi, artık gerilme ve yorulma sertliği üç aşamalı bir evrim pateni sergilemiştir: Mikro çatlakların oluşumunu içeren başlangıç aşaması, stabil gelişim aşaması ve nihai makroskobik çatlak yayılımını içeren son aşama. Çalışma, yüksek YFC oranlarının geopolimer matrisini daha yoğun hale getirmesine rağmen malzemenin yorulma yükleri altında kırılma yapıya sahip olmasına neden olduğunu ortaya koymuştur. Öte yandan, düşük YFC oranlarının (%10-%20) yorulma performansını iyileştirdiği ve dayanıklılığı artırdığı belirlenmiştir. Weibull dağılımı kullanılarak elde edilen veriler, yorulma dayanımının güvenilir şekilde tasarıma dahil edilmesini sağlamak için önemli bir gösterge olarak önerilmiş ve özellikle %20 YFC katkısının, dayanım artışı sağlarken kırılma ve çatlak hassasiyetini minimumda tuttuğu belirtilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Deneylerde kullanılan malzemeler

Yüksek fırın cürufu (YFC)

Bu tez çalışmasında, geopolimer harç üretiminde ana bağlayıcı olarak kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu, Türkiye'nin Bolu ilinde yer alan Oyak Çimento fabrikasından temin edilmiştir. YFC'nin özgül yüzey alanı $5462 \text{ cm}^2/\text{g}$, özgül ağırlığı ise $2,91 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir. YFC'nin fiziksel özellikleri Tablo 3'de, kimyasal özellikleri ise Tablo 4'te sunulmuştur. Ayrıca YFC'nin görüntüsü Şekil 7'de, XRD analiz sonuçları Şekil 8'de ve tane boyutu dağılımı ise Şekil 9'da verilmiştir. XRD desenine göre YFC'nin yüksek miktarda camsı faz içerdiği belirlenmiştir. Şekil 9'da ise YFC'nin ortalama tane boyutunun (d_{50}) $14.3 \mu\text{m}$ olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7. Yüksek fırın cürufu görüntüsü.

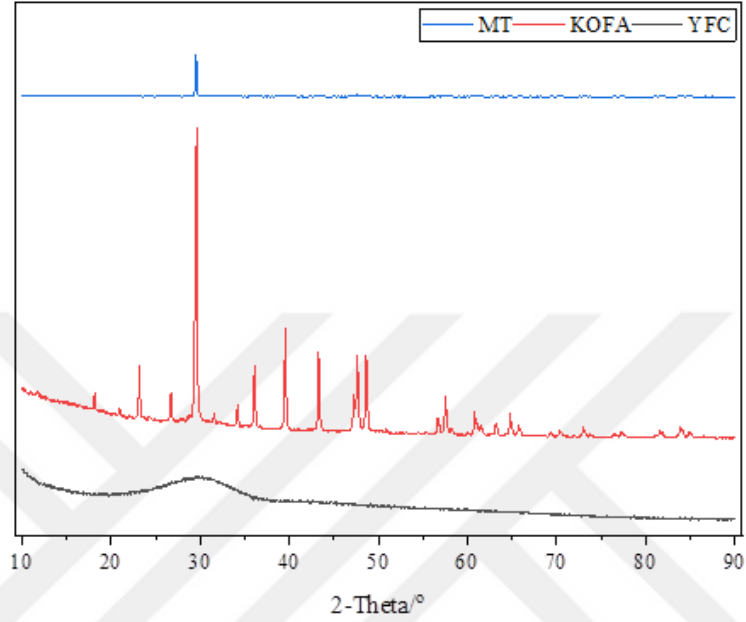
Tablo 3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri

Fiziksel özellik	Değer	Deney Metodu
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2,91	TS EN 196-6 (2020)
Özgül yüzey (cm^2/g)	5462	TS EN 196-6
Puzolanik aktivite indeksi (%)	114	ASTM C989
Rutubet (%)	0,1	TS EN 15167-1 (2006)

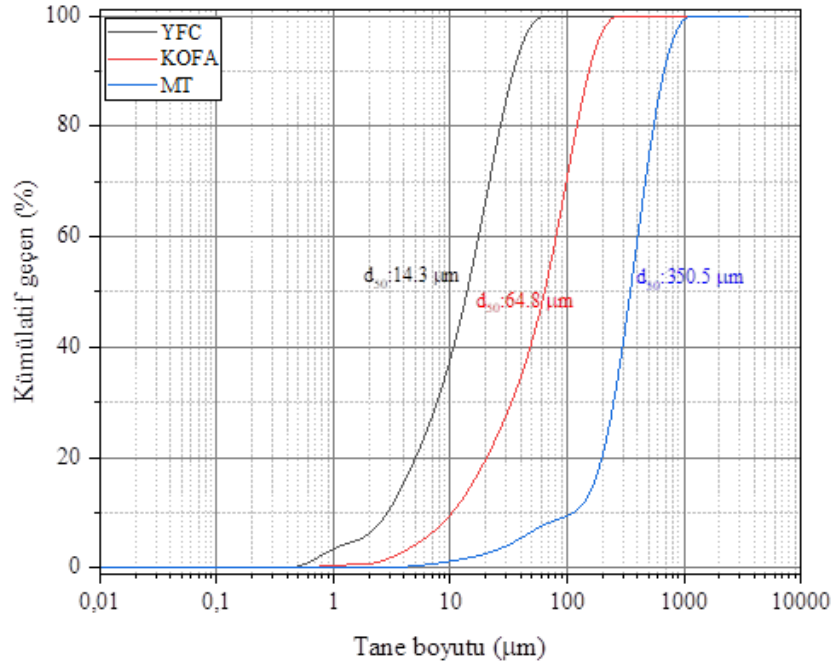
Tablo 4. Ögütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri (%)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK*
38,91	35,92	10,13	7,82	3,11	2,32	0,61	0,49	0,42

*KK: Kızdırma kaybı



Şekil 8. Toz malzemelerin XRD analizleri.



Şekil 9. Toz malzemelerin tane boyutu dağılımı.

Kalsit ocağı filtre atıkları (KOFA)

Bu tez çalışmasında, geopolimer üretiminde ana bağlayıcıya ilave olarak kullanılan kalsit ocağı filtre atıkları (KOFA), kalsit işleminde sonrasındaki filtrede kalan atık üründen elde edilmektedir. Bu kalsit atığı, Türkiye'nin Niğde ilinde yer alan NİĞTAŞ Mikronize Kalsit San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. KOFA'nın özgül ağırlığı 2,70 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Kalsit ocağı filtre tozu atıklarına ait görüntü Şekil 10'da bu atığın özellikleri ise Tablo 5'te sunulmuştur. Şekil 8'de yer alan XRD analizine göre KOFA bünyesinde çok sayıda kalsit piki gözlenmiştir. Şekil 9'da yer alan tane boyutu dağılımına göre ise KOFA'nın ortalama tane boyutu 64.8 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 10. Kalsit ocağı filtre atık görüntüsü.

Tablo 5. Kalsit Ocağı Filtre Atık Özellikleri

Fiziksel özellik	Değer	Deney Metodu
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,70	ISO 787-10
Setlik (Moh's)	3	
Nem (%)	<1	ISO 787-2
pH	8,5±1	

Sodyum metasilikat

Alkali aktivatör olarak, toz formunda ticari olarak temin edilebilen sodyum metasilikat (SMS) (Na₂SiO₃·5H₂O) kullanılmıştır. Son yıllarda, düşük maliyeti ve çevreye olan daha az olumsuz etkileri nedeniyle alkali aktivasyon uygulamalarında sodyum metasilikat tozu tercih edilmektedir. SMS'in özgül ağırlığı 0,95 olarak belirlenmiştir ve kimyasal bileşimi

incelendiğinde, toplam kütlesinin %27'sinin Na₂O, %28'inin SiO₂ (Ms = 0,96) olduğu, geri kalan kısmının ise kimyasal olarak bağlı sudan oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, SMS parçacıklarının yaklaşık %90'ı 1,18 mm'lik elekten geçebilecek kadar ince danelidir. SMS'e ait görüntüsü Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Sodyum metasilikat (SMS) tozu görüntüsü.

Atık mermer tozu (MT)

Hazırlanan geopolimer numunelerinde, agrega olarak mermer üretimi sonrasında atık olarak kalan mermer tozu tercih edilmiştir. Sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevre dostu beton üretimi hedeflenirken, agrega yerine kullanılan bu atık mermer tozu, Erzurum'da bir mermer işleme tesisinin atık sahasından elde edilmiştir. Atık mermer tozunun özgül ağırlığı 2,65 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Mermer tozunun fiziksel özellikleri Tablo 6'da kimyasal özellikleri Tablo 7'de sunulmuştur. Şekil 8'deki XRD analizine göre mermer tozu bünyesinde kalsit pikleri gözlenmiştir. Ayrıca Şekil 9'da tane boyutu analizine göre mermer tozunun d₅₀ değeri yaklaşık 350 µm olarak ölçülmüştür.

Tablo 6. Atık Mermer Tozunun Fiziksel Özellikleri

Fiziksel özellik	Değer
Elek açıklığı (mm)	0-0,75
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,65
Su emme (%)	1,17

Tablo 7. Atık Mermer Tozu Kimyasal Özellikleri (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK*
53,2	0,4	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	45,1

*KK: Kızdırma kaybı



Şekil 12. Atık mermer tozu görüntüsü.

PVA ve PP lifleri

Hazırlanan geopolimer karışımlarında kullanılan PVA ve PP liflerin teknik özellikleri Tablo 8’de sunulmuştur. PVA lifine ait görsel Şekil 13’te, PP lifine ait görsel ise Şekil 14’de gösterilmiştir. Bu lifler, karışımlara belirlenen hacim oranlarına uygun şekilde ilave edilmiş ve homojen bir karışım elde edilmesi için karıştırılmıştır.

Tablo 8. Tez Kapsamında Kullanılacak Liflerin Teknik Özellikleri

Lif türü	Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)	E-Modülü (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Çekme uzaması (%)
PVA	12	40	1.30	40	1600	6
PP	12	34	0,91	3,5	450	20



Şekil 13. Polivinil alkol (PVA) lif görüntüsü.



Şekil 14. Polipropilen (PP) lif görüntüsü.

Karışım suyu

Geopolimer karışımlarında, sürdürülebilir ve çevre dostu beton üretiminde kullanılan karışım suyunun temiz olması ve üretilen numunelerde olumsuz etkiler oluşturmaması önem taşımaktadır. Bu kapsamda, deneysel çalışmalarda TS EN 1008 standardına uygun olarak Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nin şebeke suyu (içilebilir nitelikteki) kullanılmıştır.

Kimyasal katkı maddesi

Karışımların hazırlanmasında özgül ağırlığı 1.15 ± 0.02 olan ve katı madde içeriği $\%34 \pm 1$ olan polikarboksilik eter esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı (SP) kullanılmıştır. SP karışıma bağlayıcının ağırlığınca eklenmiştir.

Deneyel Metotlar

Geopolimer kompozit tasarımı

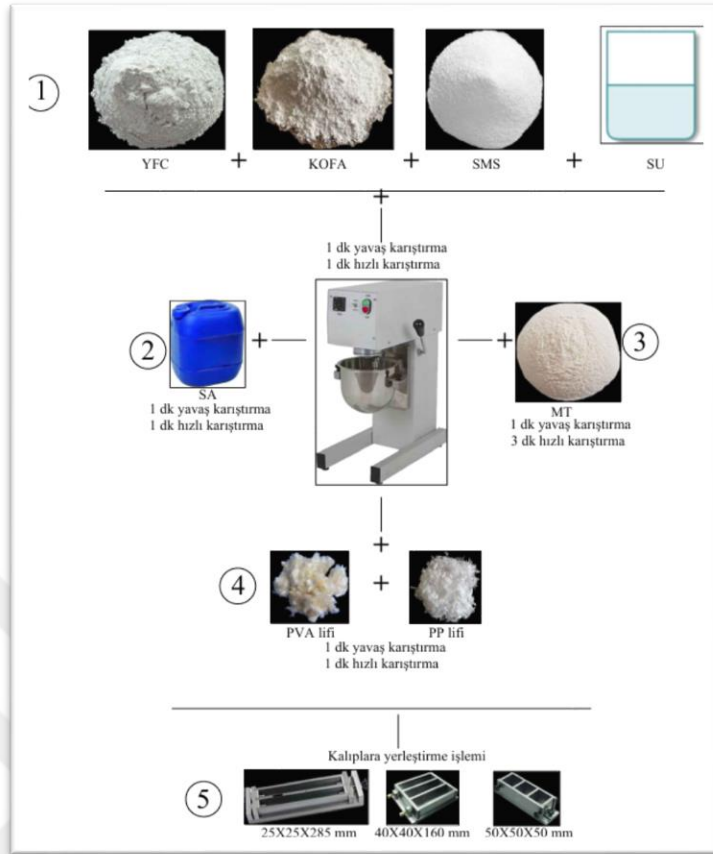
Tek bileşenli geopolimer kompozit üretiminde, ana bağlayıcı malzeme olarak YFC kullanılmıştır. YFC yerine CaCO_3 kökenli KOFA kullanılarak daha sürdürülebilir bir kompozit üretimi hedeflenmiştir. Ayrıca, karışımlarda doğal agrega yerine endüstriyel bir atık olan mermer tozu kullanılmıştır. Geopolimerin eğilme performansını artırmak amacıyla polipropilen ve polivinil alkol lifleri kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum metasilikat tozu tercih edilmiştir.

YFC, tüm karışımlarda KOFA oranına göre değişkenlik göstermekte olup, YFC yerine %5, %10 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Sodyum metasilikat tozu ise YFC'nin %15'i oranında karışıma dahil edilmiştir. Tüm karışımların su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak belirlenmiştir. Karışımların işlenebilirliğini iyileştirmek için bağlayıcı miktarının %5'i oranında SP kullanılmıştır. Elde edilen geopolimer numuneler, 80°C sıcaklıkta 24 saat boyunca ısl kür işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin test sonuçlarını kıyaslayabilmek için referans dökümler yapılmıştır. Bu çalışma da kullanılacak geopolimerin ve referans karışım oranları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Malzeme Ağırlıkları (kg/m^3) ve Karışım Oranları

Kalsit ocağı filtre atığı – KOFA (%)	Lif (Hacimsel %)	YFC	KOFA	Su	SP	Sodyum Metasilikat	Mermer agregası	PP	PVA
5	%3 PVA	712,5	37,5	262,5	37,5	112,5	1019,0	18,2	0,0
10		675,0	75,0	262,5	37,5	112,5	1017,0	18,2	0,0
20		600,0	150,0	262,5	37,5	112,5	1014,0	18,2	0,0
5	%3 PP	712,5	37,5	262,5	37,5	112,5	1019,0	0,0	26,0
10		675,0	75,0	262,5	37,5	112,5	1017,0	0,0	26,0
20		600,0	150,0	262,5	37,5	112,5	1014,0	0,0	26,0
5	%1,5PVA +%1,5PP	712,5	37,5	262,5	37,5	112,5	1019,0	9,1	13,0
10		675,0	75,0	262,5	37,5	112,5	1017,0	9,1	13,0
20		600,0	150,0	262,5	37,5	112,5	1014,0	9,1	13,0
0	Referans	750,0	0,0	262,5	37,5	112,5	1074,4	0,0	0,0
5		712,5	37,5	262,5	37,5	112,5	1073,0	0,0	0,0
10		675,0	75,0	262,5	37,5	112,5	1072,0	0,0	0,0
20		600,0	150,0	262,5	37,5	112,5	1069,0	0,0	0,0

Geopolimer numunelerin ¼retilmesi



Şekil 15. Geopolimer kompozit karışım aşamaları.

Geopolimer kompozit numunelerinin ¼retimi için kullanılacak malzemeler, tek bileşenli karışım hesabına göre, yani karışımı oluşturan tüm bileşenlerin belirli bir oranda bir araya getirildiği yöntemle (Şekil 15), tartılarak (Şekil 16) hazırlanmıştır. Mikserin içine YFC, SMS, KOFA ve su eklenmiştir. Bu karışım, önce düşük hızda (145 rpm) 1 dakika, ardından yüksek hızda (285 rpm) 1 dakika daha karıştırılmıştır (Şekil 17).

Karışım akışkanlaştırıcı eklendikten sonra, yine düşük hızda 1 dakika ve ardından yüksek hızda 1 dakika karıştırılmıştır. MT karışımına dahil edilmiş, düşük hızda 1 dakika ve ardından yüksek hızda 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında karışım lif eklenmiş ve düşük hızda 1 dakika, ardından yüksek hızda 1 dakika daha karıştırılmıştır.

Hazırlanan taze karışımlar önceden yağlanmış çeşitli boyutlardaki çelik numune kaplarına üç aşamada yerleştirilmiştir. İlk aşamada, karışımın bir kısmı numune kabına dökülmüş ve 30 saniye sarsma tablası kullanılarak sıkıştırılmıştır. İkinci aşamada, karışımın geri kalanı eklenmiş ve yine aynı yöntemle sıkıştırılmıştır. Üçüncü aşamada, yüzey düzleştirilerek son sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 18). Hızlı priz alma özelliği nedeniyle bu işlemler oldukça hızlı bir şekilde tamamlanmıştır. Tek bileşenli karışım yöntemi ile hazırlanan geopolimer kompozit karışımları kalıplara döküldükten sonra, numunelerin nem

kaybını önlemek amacıyla yüzeyleri streçle sarılmış ve 24 saat boyunca etüvde 80 °C'de bekletilmiştir (Şekil 19).



Şekil 16. Malzeme tartımları.



Şekil 17. Tek bileşenli geopolimer kompozit üretimi.



Şekil 18. Sarsma tablasında sıkıştırılıp yerleştirilen numuneler.



Şekil 19. Etüve kaldırılan numuneler.

Karışımların kodlandırılması

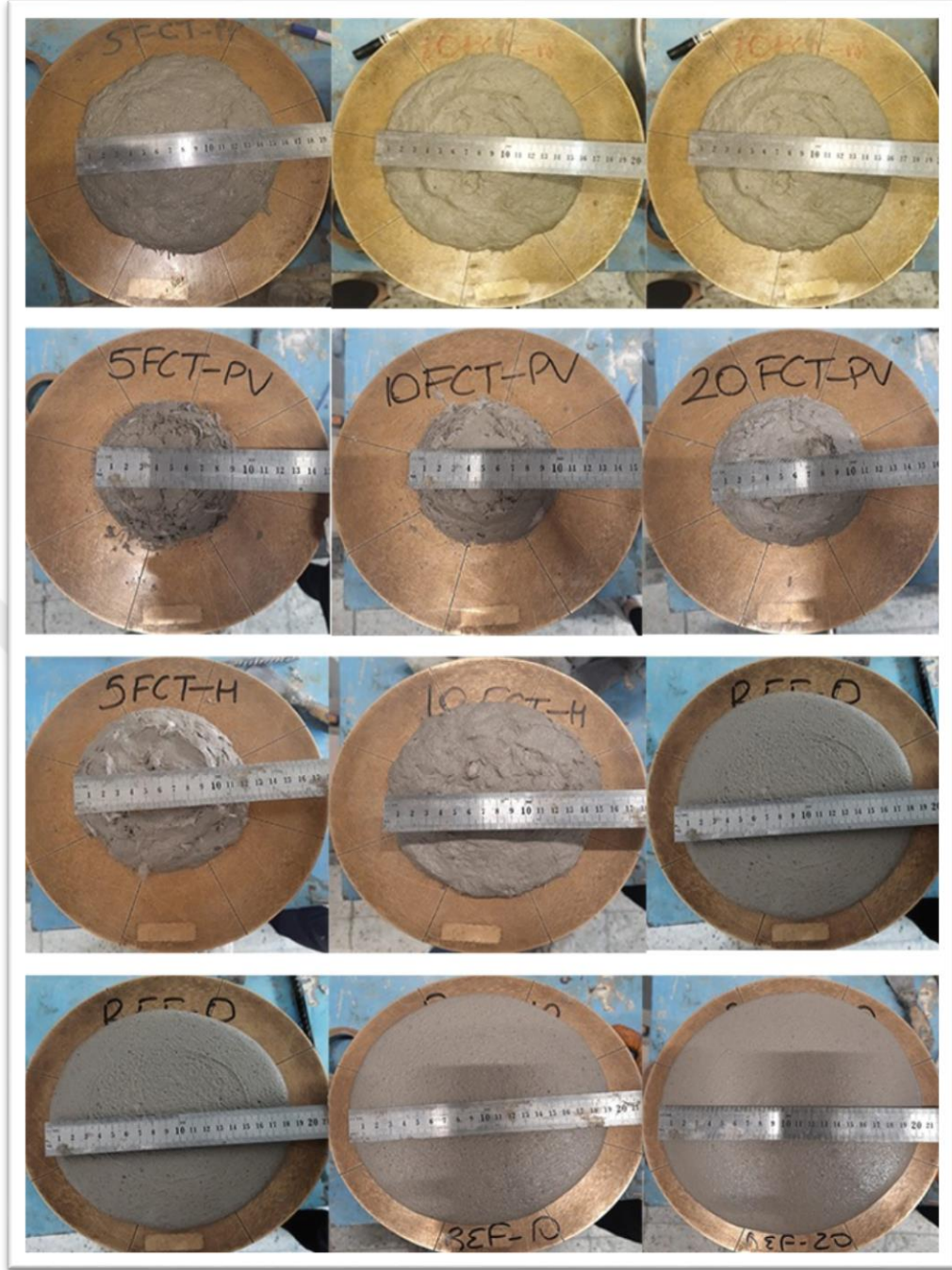
Karışımların kodlandırılmasında, kullanılan lif türü, KOFA oranı ve referans durumu dikkate alınmıştır. Lif türü, kodun başına eklenmiş olup, PPL polipropilen lifi, PVAL polivinil alkol lifi ve HL hem polipropilen hem de polivinil alkol liflerini ifade etmektedir. KOFA oranı, %5, %10 ve %20 olarak kodlara sayısal değerlerle eklenmiştir. Referans karışımlar ise lif içermeyen ve KOFA oranına göre REF ile belirtilmiştir.

Örneğin, PPL5 %3 polipropilen lif ve %5 KOFA içerirken, REF0 lifsiz ve KOFA içermeyen bir karışımı ifade etmektedir. Bu kodlama yöntemi, her karışımı açıkça tanımlamak ve deneysel karşılaştırmaları kolaylaştırmak amacıyla kullanılmıştır.

Mini çökme yayılma deneyi

Hazırlanan geopolimer harçların işlenebilirlik ve akıcılık özelliklerini değerlendirmek amacıyla ASTM C1437 standardına göre mini çökme yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde, alt çapı 10 cm, üst çapı 7 cm ve yüksekliği 6 cm olan kesik koni şeklinde bir kalıp kullanılmıştır. Deneyde kullanılan kalıbın altında, harcın yayılma davranışını doğru bir şekilde gözlemlemek için düz bir tabanlık bulunmaktadır. Bu tabanlık, deneyden önce dikkatlice temizlenmekte ve yüzeyin düzgün ve temiz olmasının, deney sonuçlarının güvenilirliğini artırmak açısından dikkat edilmesi gereken bir unsurdur. Deney sırasında, harç karışımı kalıba üç aşamada doldurulmuş ve her aşamada belirli sayıda şişleme işlemi yapılmıştır. Şişleme işlemi, demir bir çubuk kullanılarak gerçekleştirilmiş ve her katmanda karışım içerisindeki hava boşluklarını gidermek ve homojen bir dağılım sağlamak amacıyla düzenli bir şekilde uygulanmıştır. Şişleme işleminden sonra, kalıp dikkatlice doldurularak tüm aşamalar tamamlanmıştır. Kalıbın dolun işlemi tamamlandıktan sonra, kalıp yavaşça dik doğrultuda yukarı kaldırılmıştır. Kalıp kaldırma işlemi ardından, yayılma tablasının yan tarafında bulunan kol kullanılarak 15 kez olacak şekilde tabla düşürülerek sarsma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sarsma işlemi, harcın tablası üzerinde homojen bir şekilde yayılmasını sağlamak ve yayılma davranışını doğru bir şekilde gözlemlemek için kritik bir adımdır. Harcın yayılma çapı, sarsma işlemi tamamlandıktan sonra iki farklı yönde ölçülmüştür. Bu ölçümler, birbirine dik eksenler boyunca yapılmış ve yayılma davranışının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır. İki ölçüm değerinin ortalaması alınarak harcın genel yayılma çapı hesaplanmıştır. Mini çökme yayılma deneyine ait bazı karışımlara ilişkin sonuçlar, Şekil 20'de sunulmuştur.

Bu deneyden elde edilen veriler, geopolimer harcın işlenebilirlik ve akıcılık özellikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 20. Mini çökme yayılma deneyi görselleri.

Görünür porozite ve su emme deneyi

Su emme oranı, ASTM C-642 (2013) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Bu deneyde, beton numunelerin su tutma kapasitesi ve geçirgenlik özellikleri değerlendirilmiştir. Deney başlangıcında, 50 °C sıcaklıkta 3 gün boyunca etüvde kürlenmiş numunelerin etüv kuru ağırlığı (M1) ölçülmüştür. Kürlenme işleminden sonra, numuneler 24 saat boyunca tamamen suya daldırılarak kür havuzunda bekletilmiş ve bu sürecin ardından yüzeyleri havlu yardımıyla kurutulmuştur. Daha sonra, numunelerin doymuş kuru yüzey ağırlıkları (M2) hassas terazide

ölçülmüştür. Son olarak, numunelerin su emme oranı $W_a = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$ formülü ile hesaplanmıştır.

ASTM C642 standardına göre numunelerin görünür porozitesini (P) belirlemek için numuneler önce 50 °C sıcaklıkta 3 gün boyunca kurutulur ve oda sıcaklığına soğuduktan sonra kuru ağırlıkları (M₁) hassas bir tartı ile ölçülür. Daha sonra, numuneler tamamen suya batırılarak en az 48 saat boyunca oda sıcaklığında bekletilir veya vakum altında doymun hale getirilir. Suya doymun hale gelen numunelerin yüzeyindeki fazla su dikkatlice alınarak doyurulmuş yüzey kuru ağırlıkları (M₄) ölçülür. Ardından, aynı numuneler su altına yerleştirilerek (Arşimet terazisi yöntemi) su altındaki ağırlıkları (M₃) kaydedilir. Elde edilen bu ağırlık verileri kullanılarak, görünür porozite ve doymuş su içeriği hesaplanır. $P = (M_4 - M_1) / (M_4 - M_3)$

Basınç dayanımı

50×50×50 mm boyutlarında hazırlanan kalsit ilaveli geopolimer kompozit (FCT) numuneleri ile kontrol referans numunelerinin basınç dayanımları, TS EN 12390-3 (2019) standardına uygun olarak 7 ve 28 günlük sürelerde test edilmiştir. Numuneler, basınç dayanımı testinde BESMAK Material Testing Machines firmasına ait, tek eksenli bilgisayar kontrollü test cihazına döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme işlemi, 0,6 MPa/s hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 21). Her karışım için üç adet numune hazırlanmış, basınç dayanımı değerleri bu üç numunenin ölçüm sonuçlarının ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Bu yöntem, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artırmıştır.



Şekil 21. Basınç dayanımı deneyi.

Eğilme dayanımı

40×40×160 mm boyutlarında hazırlanan kalsit katkılı geopolimer kompozit numuneleri ile kontrol referans numunelerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları, TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak test edilmiştir. Bu amaçla, numuneler 3 noktalı eğilme dayanımı testine tabi tutulmuş, test 120 mm mesnet açıklığında ve 0,4 MPa/s yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Test işlemi, 100 kN kapasiteli statik eğilme cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 22). Her bir karışım için üç numune üretilmiş olup, eğilme dayanım sonuçları, bu üç numunenin ölçüm değerlerinin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 22. Eğilme dayanımı deneyi.

Kuruma büzülmesi

Geopolimer kompozit numunelerinin boy değişimi, 0,002 mm doğrulukla ölçüm yapabilen bir dijital komparatör kullanılarak 120 gün boyunca sistematik bir şekilde incelenmiştir. Test için, 25x25x285 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Isıl külden sonra numunelerin ilk boy okumaları yapılmıştır. Her ölçüm periyodunda, dijital komparatör (Şekil 23) kullanılarak harç çubuklarının boyları dikkatlice kaydedilmiş ve zamanla oluşan büzülme değerleri düzenli olarak izlenmiştir. Elde edilen veriler, kuruma büzülmesinin belirlenmesi için detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler, geopolimer kompozitlerin dayanıklılık özellikleri ve uzun vadeli performansları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Ayrıca, elde edilen büzülme verileri, kullanılan malzemelerin özellikleri, karışım oranları ve çevresel koşulların etkileri ile ilişkilendirilerek yorumlanmıştır. Bu deney geopolimer kompozitlerin kuruma sürecindeki büzülme davranışını ölçerek malzemenin mekanik dayanımı, uzun vadeli performansı ve sürdürülebilirliği hakkında kapsamlı bilgiler sunmakta ve büzülme kaynaklı sorunların önlenmesi amacıyla malzeme tasarımının optimizasyonu için

rehberlik sağlamaktadır. Bu sayede, geopolimerlerin daha dayanıklı ve çevresel koşullara daha uyumlu hale getirilmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 23. Dijital komparatör.

Kapilerite (kılcal su emme) deneyi

Kılcal su emme deneyi, TS EN 1015-18 (2004) standardına uygun olarak laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney için 50×50×50 mm boyutlarındaki numuneler kullanılmıştır. Numuneler, test öncesinde 24 saat boyunca ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Bu sürecin ardından, numunelerin yan yüzeyleri su yalıtım malzemesiyle kaplanmış ve ağırlıkları hassas bir şekilde ölçülerek kaydedilmiştir. Hazırlanan numuneler, su dolu bir tepsi içerisindeki ızgaraya yerleştirilmiştir. Bu aşamada, numunelerin tabanları yalnızca 5 mm kadar suya daldırılmıştır. Numuneler ızgaraya yerleştirildikten sonra ağırlıkları, 0 dakika, 10 dakika, 90 dakika ve 24 saat sonra belirli aralıklarla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Kapilerite deneyi, her bir karışım için yalnızca bir numune üzerinde gerçekleştirilmiş olup, numunelerin su emme davranışları bu ölçümler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bu deney, geopolimer numunelerin kılcal su emme özelliklerini belirlemek ve malzemenin uzun vadeli performansını değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır.

Sülfat etkisi deneyi

28 günlük, 50×50×50 mm boyutlarındaki beton numuneler, sülfat etkisine karşı dayanıklılıklarını belirlemek amacıyla %5 MgSO₄ (magnezyum sülfat) çözeltisine 91 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisinin numuneler üzerindeki fiziksel ve mekanik

değişimlerini izlemek için düzenli ölçümler yapılmıştır. Her 7 günde bir numuneler çözeltilerden çıkarılarak yüzeyleri nazikçe temizlenmiş, hassas terazide ağırlıkları ölçülmüş ve yüzey durumları gözlemlenmiştir. Yüzeyde çatlak oluşumu, kabuklanma veya renk değişimi gibi fiziksel etkiler detaylı olarak not edilmiştir. Ayrıca, çözeltilerin konsantrasyonunun sabit tutulması için düzenli aralıklarla yenileme işlemi yapılmıştır. Deneyin sonunda, 91 gün boyunca sülfat çözeltisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına uygun olarak test edilmiştir. Elde edilen veriler, beton numunelerin sülfat etkisi altındaki dayanım kayıplarını ve uzun vadeli kimyasal dirençlerini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Bu sonuçlar, numunelerin zorlu çevresel koşullara karşı dayanıklılığı hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Asit etkisi deneyi

28 günlük, 50×50×50 mm boyutlarındaki beton numuneler, kimyasal dayanıklılıklarını belirlemek amacıyla %5 HCl (hidroklorik asit) çözeltisine 91 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Numuneler, asidin etkisi altında malzeme özelliklerindeki değişimleri incelemek için belirli aralıklarla gözlemlenmiştir. Bu süreçte, her 7 günde bir numuneler çözeltilerden çıkarılmış, yüzeyleri kurutularak hassas terazide ağırlıkları ölçülmüş ve fiziksel durumları (renk değişimi, yüzey aşınması veya çatlak oluşumu gibi) kontrol edilmiştir. Çözelti içindeki süre boyunca, asit çözeltisinin konsantrasyonunun sabit kalması için düzenli olarak yenileme işlemi yapılmıştır. Deneyin sonunda, 91 gün boyunca asit etkisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına uygun şekilde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, numunelerin asidik ortamlarda dayanım kayıplarını ve kimyasal dayanıklılıklarını değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.

Islanma kuruma etkisi deneyi

28 günlük, 50×50×50 mm boyutlarındaki beton numuneler, tuz direncine karşı dayanıklılıklarını değerlendirmek amacıyla %5 derişimli NaCl çözeltisine 91 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Bu süreçte, numunelerin fiziksel ve mekanik değişimleri düzenli olarak gözlemlenmiştir. Döngü, 24 saat tuzlu suda bekletme ve ardından 24 saat 50°C etüvde kurutma işlemleriyle sağlanmıştır. Her 7 günde bir, numuneler çözeltilerden çıkarılarak yüzeyleri kurutulmuş, hassas terazide ağırlıkları ölçülmüş ve yüzey durumları incelenmiştir. Çözeltinin konsantrasyonu sabit tutulmuş ve test süresi boyunca düzenli olarak yenilenmiştir. Deney sonunda, 91 gün boyunca NaCl çözeltisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak test edilmiştir. Bu test, numunelerin tuzlu suya (klorür

etkisine) maruz kaldıklarında oluşan dayanım kayıplarını ve performanslarını değerlendirmek için önemli veriler sağlamıştır.



Şekil 24. Tuz etkisi deneyi numuneleri.

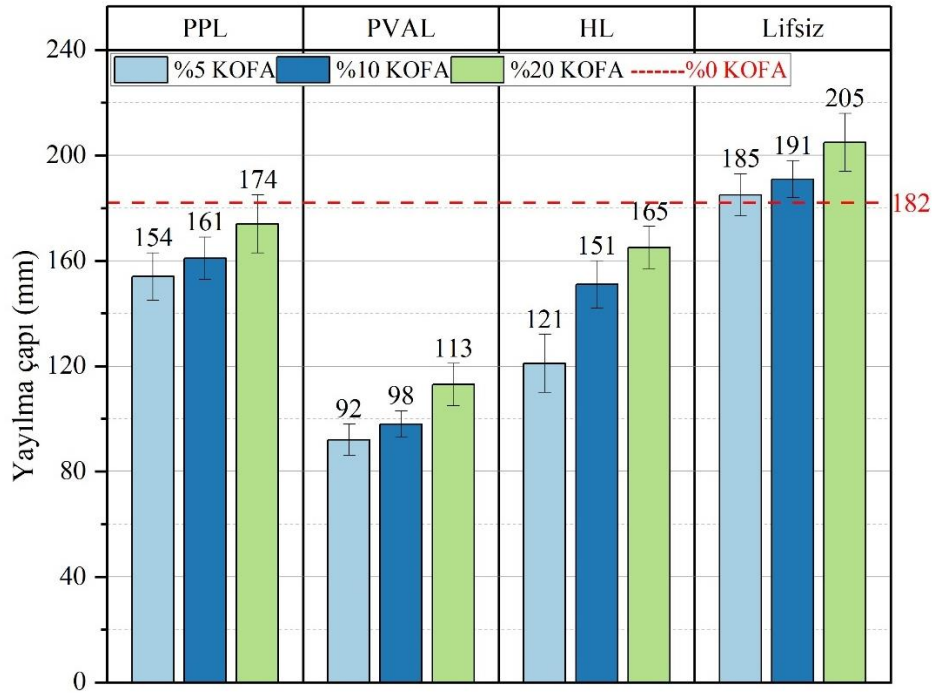
Donma çözülme dayanıklılığı

28 günlük, 50×50×50 mm boyutlarındaki beton numuneler, ASTM C666/C666M standardı Prosedür A'ya uygun olarak donma çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyde, numunelerin dayanıklılığı, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Deney sürecinde, numunelere toplamda 50 çevrim uygulanmıştır. Her bir çevrim, -20 °C ile +4 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 7 saat donma, 5 saat çözülme olacak şekilde günde 2 çevrimden oluşmaktadır. Bu çevrimler sırasında, betonun mikro çatlak oluşumu ve buz etkisine karşı dayanımı test edilmiştir. Deneyin tamamlanmasının ardından, numunelerin görsel denetimi yapılmış, yüzeyde oluşabilecek çatlaklar, renk değişimi ve diğer fiziksel etkiler incelenmiştir. Ayrıca, numunelerin ağırlık değişimleri hassas bir terazide ölçülmüş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Son olarak, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiş ve donma çözülme etkisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu test, numunelerin zorlu iklim koşullarında uzun vadeli dayanıklılığını ve performansını belirlemek açısından önemli bir yöntemdir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Taze Hal Özellikleri

Şekil 25'te lif türlerinin ve KOFA'nın taze hal yayılma çapı üzerinde belirgin etkileri bulunmaktadır. Lifsiz numuneler en yüksek yayılma çapına sahipken, lif ilavesi kompozitlerin işlenebilirliğini azalmaktadır.



Şekil 25. KOFA ve lif katkılarının yayılma çapına etkileri.

PP liflerinin taze hal yayılma çapı üzerindeki etkisi, %20 KOFA oranında elde edilen en yüksek yayılma çapıyla (174 mm) dikkat çekmektedir. Bu değer REF0 numunesine göre (182 mm) %4,40 daha düşüktür. %20 KOFA oranıyla elde edilen bu yayılma çapı, %5 KOFA oranına (154 mm) göre %12,99, %10 KOFA oranına (161 mm) göre ise %8,07 daha yüksektir.

PVA liflerinin taze hal yayılma çapı üzerindeki etkisi, diğer lif türlerine göre daha belirgindir ve yayılma çapını en çok azaltan lif türü olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, KOFA oranının artışıyla PVA lifli karışımlarda yayılma çapında bir iyileşme gözlemlenmiştir. %20 KOFA oranında elde edilen yayılma çapı (113 mm), %5 KOFA oranına (92 mm) göre %22,83, %10 KOFA oranına (98 mm) göre ise %15,31 daha yüksek iken REF0 numunesine göre %37,91 daha düşüktür.

HL kodlu numuneler, taze hal yayılma çapı açısından dengeli bir performans sunmaktadır. Bu numunelerde, %20 KOFA oranındaki yayılma çapı (165 mm), diğer KOFA

oranlarına kıyasla en yüksek değere sahiptir. Bu değer REF0 numunesine göre %9,34 daha düşüktür. Bununla birlikte %20 KOFA oranındaki yayılma çapı, %5 KOFA oranına (%121 mm) göre %26,67, %10 KOFA oranına (%151 mm) göre ise %8.48 daha yüksek yayılma çapı sağlamaktadır.

Lifsiz (REF kodlu) numunelerde, tüm KOFA grupları REF0 numunesine göre daha yüksek yayılma çapına sahiptir. KOFA oranı arttıkça yayılma çapı artmış ve %20 KOFA oranının yayılma çapı 205 mm olmuştur. Bu değer REF0 numunesine göre %11,22 daha yüksektir.

Mini çökme yayılma deneyi sonucunda, kompozit numuneye lif eklenmesi yayılma çapını sınırlarken, KOFA eklenmesi yayılma çapını artırmıştır. Lifli numunelerde en fazla PVA lifleri yayılma çapını sınırlarken, PP lifleri yayılma çapına daha az olumsuz etki göstermiştir. Hibrit lifler ise dengeli bir sınırlama göstermiştir. PVA liflerinin yayılma çapını sınırlamasının temel nedenleri, liflerin yüksek su tutma kapasitesi, karışıma sağladığı yüksek kohezyon, lifin yüksek yoğunluğu ve kimyasal yapısından kaynaklanmaktadır. PVA lifleri, serbest su miktarını azaltarak karışımı daha viskoz hale getirmekte ve liflerin yüzey alanı ile yoğun lif ağı oluşumu nedeniyle karışımın akışkanlığını sınırlamaktadır. Ayrıca, PVA liflerinin karışımdaki diğer bileşenlerle güçlü bir aderans oluşturması, yayılma çapını kısıtlayan ek bir faktördür. Bu nedenle, PVA lifleri, akışkanlığı azaltan bu özellikleriyle diğer lif türlerine göre daha sınırlayıcı bir etki göstermektedir. PP lifleri ise daha düşük yoğunluğu ve hidrofobik yapısı ile akışkanlık sınırlamada daha az etkili olmuştur.

Literatürde, lif türü ve oranının taze hal işlenebilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu, PVA liflerinin akışkanlığı sınırladığı, PP liflerinin ise daha homojen bir işlenebilirlik sağladığı belirtilerek yapılan çalışma ile uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır (Farooq *et al.* 2019; Lyu *et al.* 2021; Zhong and Zhang, 2021). Farooq *et al.* (2019) çalışmasında PP liflerinin düşük yoğunluğu sayesinde diğer liflere kıyasla daha dengeli bir akışkanlık sağladığı ve hava kabarcığı tutma eğiliminden kaynaklanan sınırlı işlenebilirlik kaybı ile taze hal performansını koruduğu belirtilmiştir. Aynı çalışmada, PVA liflerinin matriste ağ yapısı oluşturarak stabiliteyi artırdığı, ancak akışkanlığı belirgin şekilde sınırladığı belirtilmiştir.

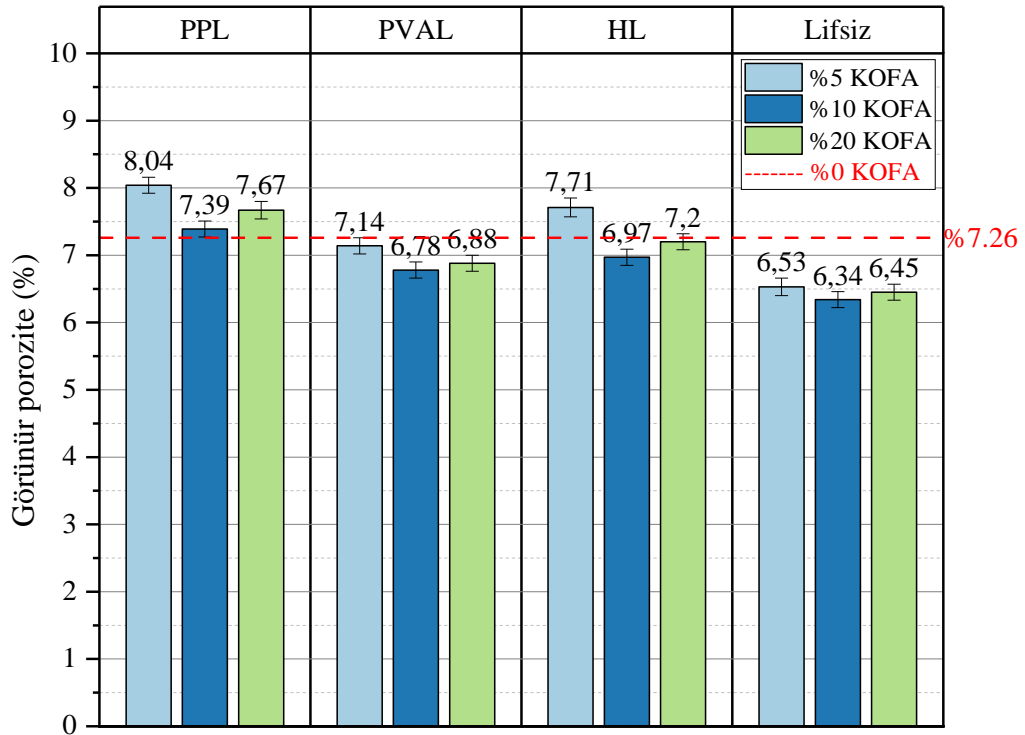
Hossain *et al.* (2012) çalışmasında, PVA liflerinin daha yüksek viskozite artırma kabiliyeti, işlenebilirliği azaltma etkisi ve hidrofilik özellikleri, kompozit matris içinde iç direncin artmasına ve serbest su miktarının azalmasına katkı sağlayabileceğini, bu durumun matrisin yoğunluğunu artırarak gözenekliliğin azalmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olabileceğini belirtmiştir.

KOFA oranı artması yayılma çapının artması ile doğru orantılıdır. KOFA'nın kompozite dahil edilme oranı arttıkça kompozitin akış direncini azalmasına neden olmuştur. YFC yerine ikame edilen KOFA'nın daha iri taneli yapısı, su ihtiyacının azalmasına ve yayılma çapının artmasına neden olmuştur. KOFA'nın lif ile kullanılması ise lifin işlenebilirlikteki sınırlayıcı etkisini azaltmaktadır.

Literatürde, Rashad (2022) çalışmasında kireçtaşı tozu oranının artmasının işlenebilirlik ile doğru orantılı olduğunu belirtmiştir. Rashad *et al.* (2023) çalışmasında ise Blaine yüzey alanı 500 m²/kg ve özgül ağırlığı 2,7 g/cm³ olan kireçtaşı tozunun (LS), alkali aktivasyonlu malzemelere %5 ila %30 oranlarında eklenmesiyle işlenebilirliğin arttığı, ancak %30'un üzerinde bu artışın azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. LS'nin mikro dolgu etkisi ve partikül boyutlarının uygunluğu, karışımda daha iyi homojenlik sağladığı için işlenebilirliğin iyileşmesine katkı sağlamıştır. Dolayısıyla, LS eklenmesi, genellikle karışımın su talebini azaltarak ve ince partiküller sayesinde dolgu etkisi yaratarak akışkanlığı artırıcı bir rol oynamaktadır.

Görünür Porozite Deney Sonuçları

Şekil 26'da KOFA oranı ve lif türlerinin, geopolimer kompozitlerin görünür porozitesi üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Genel olarak, KOFA'nın %10 oranında kullanımı görünür poroziteyi azaltmıştır.



Şekil 26. KOFA ve lif katkılarının görünür poroziteye etkileri.

PP lifi kullanılan kompozitlerde, görünür porozite en düşük değerini %10 KOFA kullanılan numunede sağlamıştır. Bu değer, REF0 değerine göre %1,79 daha yüksek, %10 KOFA içeren lifsiz kompozite göre ise %16,56 daha yüksektir.

%10 KOFA ve PVA lif kullanılan kompozit numunede (PVAL10) görünür porozite REF0 numunesine göre %6,61 düşük ve REF10'a göre ise %6,94 yüksek çıkmıştır. PVA lifinin hidrofilik yapısı ve yüzey alanının yüksekliği kohezyonun artarak matrisle kompakt bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca KOFA'nın mikro dolgu etkisi ve PVA lifiyle kompakt bir yapı oluşturması porozitenin azalmasını sağlamıştır.

Hibrit lif kullanımı PVA ve PP liflerinin sinerjik etkisi ile dengeli bir yapı oluşturmuştur. %10 KOFA oranı %6,97 ile HL grubundaki en düşük poroziteyi sağlamıştır.

Lifsiz numunelerde ise KOFA kullanımının porozite üzerindeki etkisi, lif kullanımından bağımsız olarak görünmektedir. %10 KOFA kullanımı, görünür porozitenin REF0'a göre %12,67 oranında düşmesini sağlamıştır.

Tüm gruplar içerisinde yapılan karışımlarda KOFA oranı %5'ten %10'a çıkarıldığında porozite azalırken, %10'dan %20'ye çıkarıldığında ise porozitenin tekrar yükseldiği görülmüştür. %10 KOFA içeriği, matris içinde daha kompakt bir yapı oluştururken, %20 seviyesinde homojenliğin bozulması nedeniyle mikro boşlukların arttığı gözlemlenmiştir. KOFA'nın mikro boyutlu yapısı ve düşük su ihtiyacı, işlenebilirliği olumlu yönde etkileyerek görünür poroziteyi azaltır.

Bu bulgular, literatürde yer alan çalışmalarla paralellik göstermektedir. Örneğin, Kara (2020) tarafından yapılan çalışmada, mikronize kalsitin çimentoya %0, %3, %5 ve %10 oranlarında ikame edilmesinin betonun görünür porozitesi üzerindeki etkileri incelenmiş; kalsit ikamesiyle betonun su emme oranında düşüş sağlanarak görünür porozitenin iyileştiği tespit edilmiştir. Özellikle %10 kalsit ikamesi, 7. günde su emme oranını %11,26 oranında azaltırken, 28. günde bu oran %9,31'e kadar düşmüştür.

Benzer şekilde, Elgalhud *et al.* (2016), %15 kalsit ikamesinin betonun porozitesini iyileştirmeye devam ettiğini, ancak en iyi sonucun %10 kalsit oranında elde edildiğini belirtmiştir. %20 ve üzeri oranlarda ise dolgu etkisinin doyumluğa ulaşması nedeniyle porozite artışı gözlenmiştir. Kalsit, fiziksel dolgu özelliği sayesinde betonun mikroyapısındaki boşlukları doldurmakta, partikül paketleme etkisiyle daha yoğun ve kompakt bir yapı oluşturarak su emme oranını düşürmekte ve malzemenin dayanıklılığını artırmaktadır.

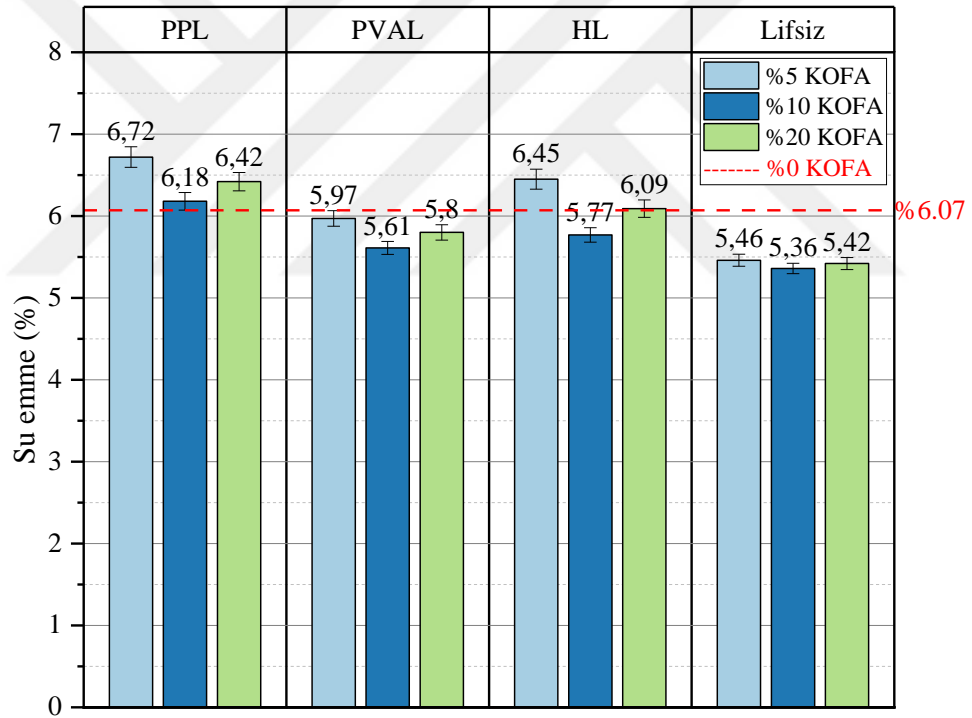
Qian and Song (2015) ise çalışmasında, kireçtaşı tozunun metakaolin bazlı geopolimer harçlardaki etkisini incelemiş ve kireçtaşı tozunun dolgu etkisiyle mikroyapıdaki boşluk oranını

azalttığını tespit etmiştir. Özellikle %10-15 oranındaki kireçtaşı tozu ilavesi, kapiler boşlukları azaltarak su emme davranışını iyileştirmiş ve harcın reolojik özelliklerini geliştirerek akışkanlığını artırmıştır. Buna karşın, %30 oranında kireçtaşı tozu ilavesinde dolgu etkisinin doygunluğa ulaşması ve fazla partiküllerin birikimi nedeniyle boşluk yapısında ek bir iyileşme sağlanamamıştır.

Bu bulgular, KOFA katkısının optimum oranlarda kullanıldığında, işlenebilirliği artırdığını, boşluk yapısını iyileştirerek poroziteyi azalttığını ve mikroyapıyı daha kompakt hale getirdiğini ortaya koymaktadır.

Su Emme Deney Sonuçları

Şekil 27’de KOFA oranı ve lif türleri, su emme oranları üzerine etkileri gösterilmektedir. Genel olarak, %10 KOFA oranı, lifli ve lifsiz numunelerde su emme oranını optimize etmiştir.



Şekil 27. KOFA ve lif katkılarının su emmeye etkileri.

Su emme deneyi sonuçları, görünür porozite deneyi ile paralellik göstermektedir. PP lifli numunelerde en yüksek su emme oranı tespit edilmiştir. PP liflerinin hidrofobik yapısı suyun life nüfuzunu engeller ve suyun matris içinde hareketine daha fazla izin verir. PVA lifleri ise bir miktar suyu emebilir ve bünyesinde tutabilir. Bu durum matris içinde serbest suyun azalmasına yol açarak, toplam su emme oranını düşürür. PVA lifinin bu hidrofilik yapısı, matrise daha iyi bağlanarak homojen bir yapı sağlamasını ve %10 KOFA içeriğinde %5,61 ile lifli numuneler arasında en düşük su emme oranına sahip olmasını sağlamıştır.

Lifsiz kompozitlerde KOFA kullanımı su emme oranını azaltmıştır. %10 KOFA içeriği, %5,36 ile tüm gruplarda en düşük su emme oranını sağlamıştır. Referans numune olan REF0'da su emme oranı %6,07 olarak ölçülmüştür. Bu değer, KOFA içeriği optimum oranda kullanıldığında malzeme içindeki boşlukların daha etkili bir şekilde doldurulduğunu ve porozitenin azaldığını bunun paralelinde de su emme oranının azaldığını göstermektedir. KOFA, su emme üzerindeki bu etkisini lifli kompozitlerde de göstermiştir.

Görünür porozite deneyinde olduğu gibi %5 KOFA oranında dolgu etkisinin yetersiz kaldığı, %20 KOFA içeriğinde ise homojenlik kayıpları nedeniyle su emme oranında hafif bir artış gözlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar da bu sonuçları desteklemektedir. PVA liflerinin, geopolimer harçlarda gözenek yapısını iyileştirerek su geçirgenliğini azalttığı ve malzemenin dayanıklılık özelliklerini artırdığı belirtilmiştir. Arslan (2019) çalışmasında %0,8, %1,6 ve %2,4 oranlarında PVA lifleri eklenmiş harçların su emme oranını %6,45 ile %10,23 arasında azalttığı ve ıslanma kuruma kütleme yöntemiyle bu azalmaların %14,36 ile %18,07 seviyelerine ulaştığı belirtilmiştir. PP liflerin, hidrofobik yapısı sayesinde harçların su geçirgenliğini sınırladığı, ancak lif uzunluğunun artmasının boşluk oranını yükselterek su emme değerlerini artırdığı ve topaklanma durumunun geçirgenlik üzerinde olumsuz etkiler yarattığı ifade edilmiştir (Topçu vd 2017).

Kara (2020), %10 kalsit katkısının kapiler boşlukları etkili bir şekilde doldurarak su emme oranını azalttığını, ancak daha yüksek oranlarda homojenlik kaybı nedeniyle geçirgenliğin arttığını ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Elgalhud *et al.* (2016) %10 kireçtaşı katkısı en iyi sonuçları sağlamış, ancak %15 oranında mikro yapıdaki boşluk artışı nedeniyle geçirgenlikte artış gözlenmiştir. Bu veriler, kalsit ve kireçtaşının optimum oranlarda kullanıldığında betonun su geçirgenliği ve dayanıklılık performansını iyileştirebileceğini göstermektedir.

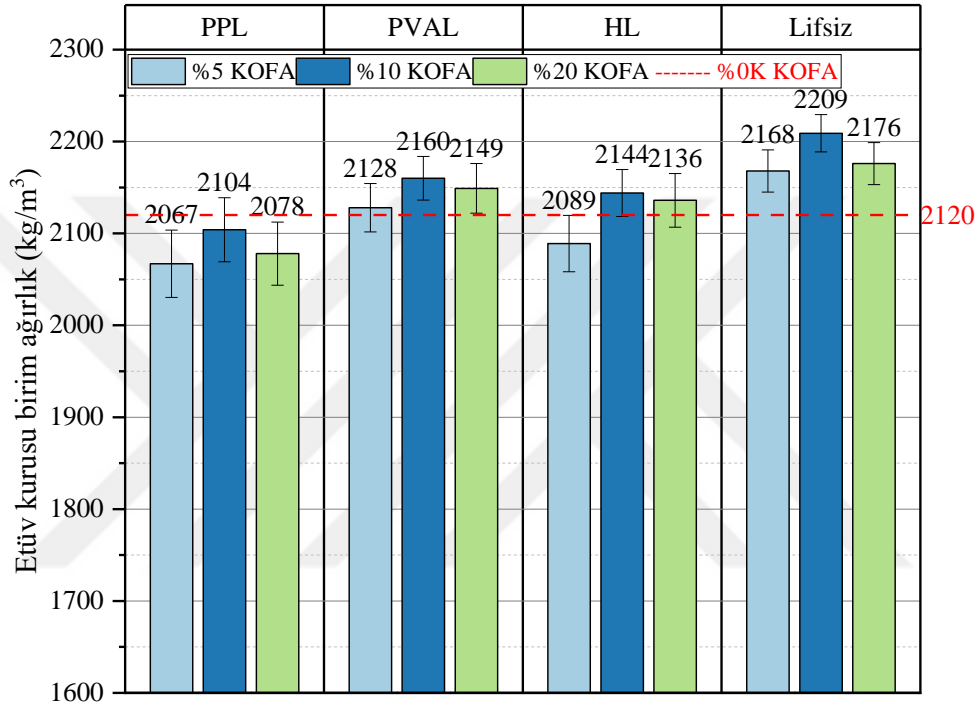
Öz *et al.* (2023), liflerin karışım içindeki dağılımının, karışımların işlenebilirliği ve gözenekliliği üzerinde doğrudan etkili olduğu belirtilmiştir. Liflerin, agrega ve matris arasındaki temas yüzeyini artırarak bazı durumlarda su geçirgenliğinin artmasına neden olabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, liflerin matris içinde homojen şekilde dağılmaması, gözenekler arasında köprü oluşumuna yol açarak malzemenin performansını etkileyebileceğini ifade etmiştir.

Sonuç olarak, tüm numuneler arasında %10 KOFA içeriği, lif türünden bağımsız olarak su emme oranını optimize eden en etkili katkı oranı olmuştur. PVA lif katkılı numuneler PP lif katkılı numunelere göre daha az su emme oranı göstermiş olup, HL katkılı numuneler, PP ve

PVA liflerinin sinerjik etkisiyle %5,77 su emme oranına ulaşarak dengeli bir performans sergilemiştir. Lifsiz numunelerde ise %10 KOFA, %5,36 su emme oranı ile tüm gruplar içerisinde en düşük değeri sağlamış ve KOFA'nın dolgu etkisinin lif katkısı olmadan da su geçirgenliğini sınırlayabildiğini göstermiştir.

Etüv Kuru Yoğunluk Deney Sonuçları

Şekil 28'de geopolimer kompozitte lif türleri ve KOFA oranlarının yoğunluk üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 28. KOFA ve lif katkılarının etüv kuru yoğunluğa etkileri.

PP lifli numuneler içerisinde, %10 KOFA oranı en yüksek yoğunluk değerine sahiptir (2104 kg/m³). Bu değer, REF0 değerine göre %0,75 daha düşük, %10 KOFA içeren lifsiz kompozite göre ise %4,75 daha düşüktür. Polipropilen liflerinin düşük yoğunluklu yapısı, beton matrisindeki gözenekliliği artırarak genel olarak yoğunluğu düşürdüğü için tüm gruplar içerisinde yoğunluğu en düşük grup olarak dikkat çekmektedir. Bu sonuç su emme deneyi ve görünür porozite deneyinde en yüksek değere sahip grup olması ile uyumludur.

PVA lifli numuneler ise PP lifli numunelere kıyasla daha düşük su emme ve görünür porozite değerleri göstermiş ve buna bağlı olarak daha yüksek yoğunluk değerine ulaşmıştır.

HL lifli numunelerin yoğunluğu PVA lifli numunelerden biraz daha düşük, PP lifli numunelerden ise daha yüksektir. PVA liflerinin matrisle güçlü bağlanma özelliği ile PP liflerinin hafif yapısının birleşerek dengeli bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. %10 KOFA

içeren HL numunesi, 2144 kg/m³ yoğunluk değeri ile optimum bir yapı sağlamış ve lifli numuneler arasında PVA'ya en yakın yoğunluk değerini vermiştir.

Lifsiz numuneler, tüm gruplar içinde daha kompakt bir yapı sergilemiş ve en yüksek etüv kurusu yoğunluk değerleri ile öne çıkmışlardır.

Kompozit numunelerin tamamı incelendiğinde, %10 KOFA içeren numunelerde lifsiz numunelerin lifli numunelere göre, PVA lifinin ise PP lifine göre daha yüksek yoğunluk değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. %10 KOFA oranı, genel olarak hem lifli hem de lifsiz numunelerde kompakt bir yapı ve yüksek yoğunluk elde etmek için ideal bir oran olarak öne çıkmaktadır.

Mekanik Özellikler

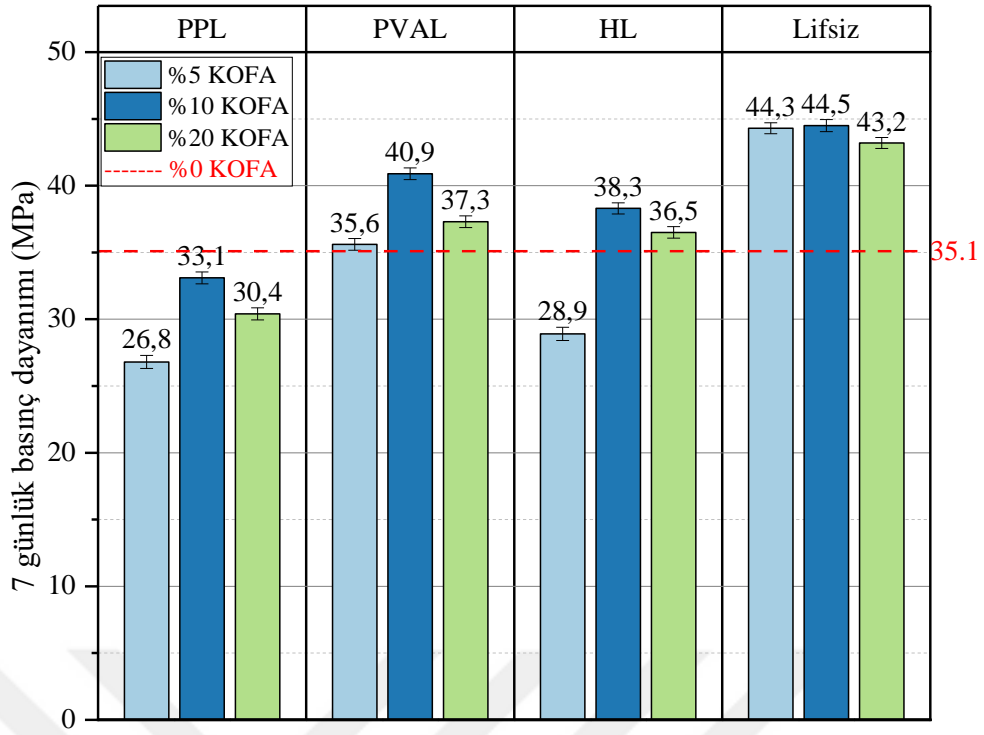
Bu çalışmada, geopolimer kompozitin mekanik performansı, farklı lif türleri (PP, PVA, HL) ve kalsit oranları (KOFA: %5, %10, %20) değişkenleri ile değerlendirilmiş; eğilme ve basınç dayanımı testleri 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, lif türlerinin ve KOFA oranlarının mekanik dayanım üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. KOFA oranının artışı, genel olarak mekanik dayanımlarda bir iyileşme eğilimi yaratmıştır. Bununla birlikte, %10 KOFA içeren numunelerin dayanım sonuçları mekanik performans bakımından öne çıkmaktadır.

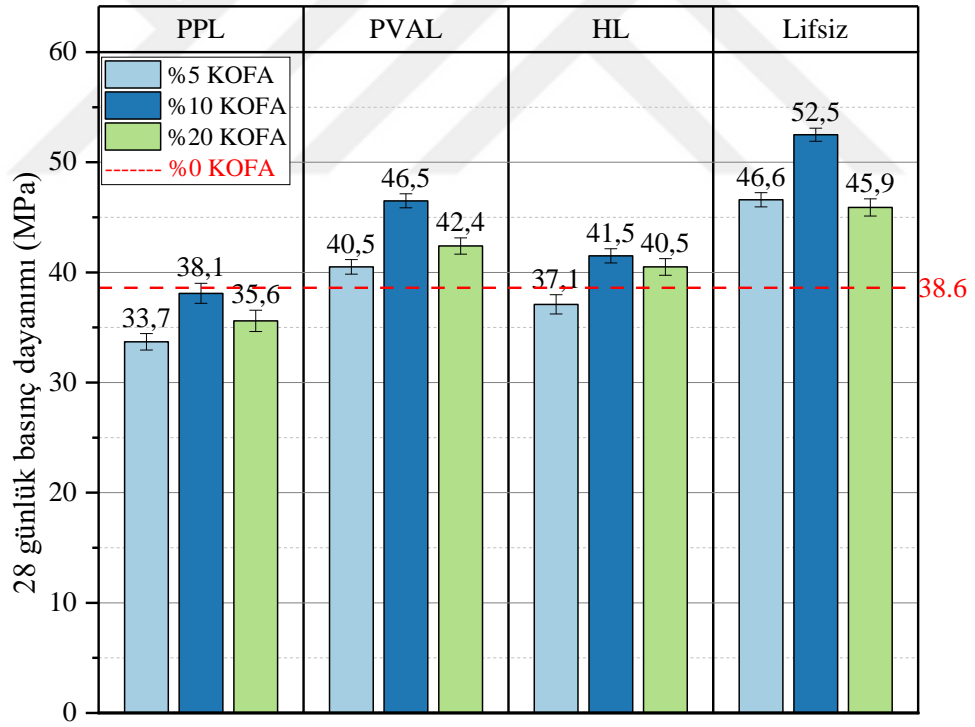
Basınç dayanımı sonuçları

PP, PVA, HL lif katkılı ve lifsiz numunelerle hazırlanan kompozit karışımlarında, KOFA oranının basınç dayanımı üzerindeki etkileri, farklı yaşlarda yapılan testlerde benzer eğilim göstermiştir (Şekil 29, Şekil 30, Şekil 31).

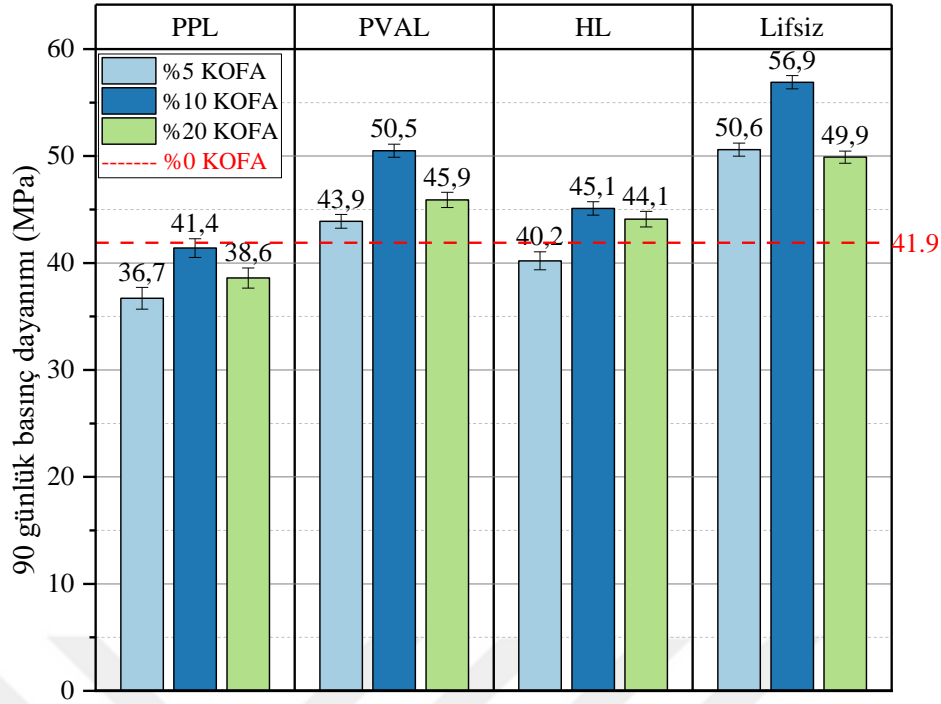
Kompozit numune grupları arasında lifsiz kompozit numuneler, erken ve uzun vadede en yüksek dayanımlara ulaşmıştır. Lifli numune gruplarında ise PVA lifli kompozitler diğer lifli kompozitlere kıyasla daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır. Bununla birlikte tüm gruplar ayrı ayrı incelendiğinde, %10 KOFA kullanımı en yüksek dayanımları vermiştir.



Şekil 29. 7 günlük basınç dayanımları.



Şekil 30. 28 günlük basınç dayanımları.



Şekil 31. 90 günlük basınç dayanımları.

PP lif katkılı numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuçları, tüm gruplar arasında en düşük dayanıma sahip grup olmuştur. PPL10 numunesinin 28 günlük basınç dayanımı REF0 numunesinin basınç dayanımına göre %1,30 daha düşük çıkmıştır. PP liflerinin düşük elastisite modülüne sahip olması nedeniyle, mikro çatlakları köprüleme konusunda elastisite modülü yüksek olan PVA lifleri kadar yeterli olamamıştır. Bu durum, KOFA katkısının matris yoğunluğunu artırdığı geopolimer kompozit numunelerinde bile, PP lif katkılı numunelerin dayanım açısından PVA lif katkılı numunelere kıyasla daha düşük seviyelerde kalmasını açıklamaktadır. PP lif katkılı numunelerin basınç dayanım sonuçları, görünür porozite ve su emme deney sonuçları performansı ile uyumludur.

PVA lif katkılı numuneler ise matrisle kompakt bir yapı oluşturmuş ve %10 KOFA kullanımı ile mikro çatlakların doldurularak porozitenin düşmesini, yoğunluğun ve basınç dayanımının artmasını sağlamıştır. 28 günlük basınç dayanımı REF0 ile karşılaştırıldığında %20,47 artış tespit edilmektedir. PVA lifleri matrisle güçlü bir aderans oluşturarak mikro çatlak yayılımını sınırlama etkisi ile KOFA katkısının %10 oranında matris yoğunluğunu artırarak dayanımı desteklediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, KOFA ve PVA lif katkılarının birlikte kullanımının mekanik dayanımı artırmada sinerjik bir etki yaratarak etkili sonuçları vermiştir.

Sonuçlar, literatürle de uyum göstermektedir. Farooq *et al.* (2019) tarafından yapılan çalışmada PVA liflerinin yüksek elastisite modülü ve hidrofilik yapısı sayesinde matrisle güçlü bir aderans oluşturduğunu, mikro çatlak yayılımını sınırlandırarak dayanımı iyileştirdiğini

belirtmiştir. Benzer şekilde Noushini *et al.* (2013) çalışmasında, PVA liflerin çatlak yayılımını sınırlandırma yeteneği sayesinde, dayanımı artırıcı bir faktör olarak değerlendirilmiştir. Yuan *et al.* (2020) ve Farooq *et al.* (2022) çalışmalarında da gösterildiği gibi, PVA lifleri yüksek çatlak köprüleme kapasitesine sahip olup, mikro çatlak yayılımını sınırlandırmakta ve su geçirgenliğini azaltarak malzeme bütünlüğünü korumaktadır.

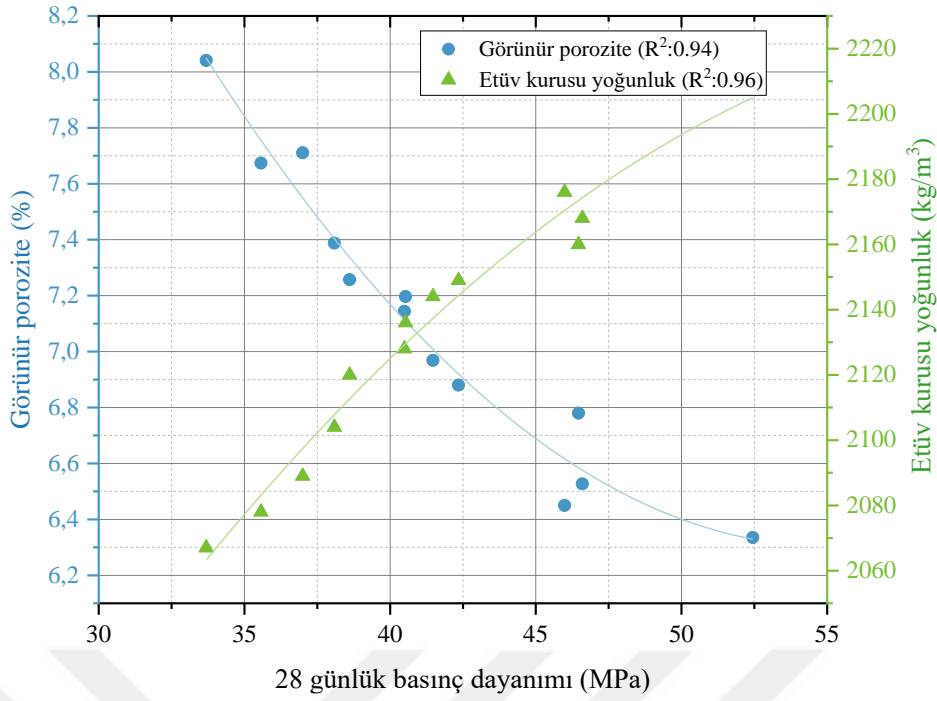
Hibrit lifler, PP ve PVA liflerinin sinerjik etkisiyle mikro çatlak yayılımını sınırlandırarak dayanımı desteklediğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu kompozit liflerin sağladığı sinerjik etki, matris yoğunluğunu artırarak süneklik ve çatlak kontrolü açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. HL grubu içerisinde %5 KOFA içeren numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında, REF0 numunesine göre en düşük basınç dayanım değeri göstermiştir. %10 KOFA oranında, HL lif katkısının mikro çatlak direncini artırdığı ve matrisin bütünlüğünü desteklediği gözlemlenmiştir. %10 KOFA içeren HL10 numunesinin 28 günlük basınç dayanımı REF0 ile karşılaştırıldığında %7,51 artış göstermektedir. Bu durum, HL lif katkısının dayanım ve süneklik arasında bir denge sunduğunu, ancak maksimum dayanım seviyelerine ulaşmada tek başına yetersiz kaldığını göstermektedir.

Tüm gruplar içerisinde %20 KOFA kullanımı matriste homojenliği olumsuz etkileyerek, gözenekliliği artıracığı ve dayanım performansını olumsuz etkileyebileceği tespit edilmiştir. Literatürde de Rashad (2022), Qian and Song (2015) ile Aboulayt *et al.* (2017), yüksek oranlardaki katkı malzemelerinin mikro yapıda gözeneklilik oluşturarak dayanım gelişimini sınırlayabileceğini vurgulamıştır.

Lifsiz numunelerde dayanım değerleri, tüm KOFA oranlarında daha yüksek seviyelerde gözlemlenmiştir. Bu durum, KOFA'nın matris içinde boşlukları doldurucu ve yapısal yoğunluğu artırıcı etkisine bağlanabilir. Özellikle %10 KOFA oranıyla elde edilen dayanımın en yüksek seviyede gerçekleşmesi, literatürle uyumlu optimum kireçtaşı tozu oranının mikro yapı yoğunluğunu artırarak mekanik dayanımı desteklediği, ayrıca mikro yapısal boşlukları doldurarak hem akışkanlığı hem de dayanımı olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir (Qian and Song, 2015; Güllü *et al.* 2021; Rashad, 2022; Rashad *et al.* 2023). Bu bulgular, KOFA'nın sadece dolgu malzemesi olarak değil, aynı zamanda mekanik bütünlüğü artırıcı ve çatlak oluşumunu sınırlandırıcı bir rol üstlendiğini doğrulamaktadır.

Basınç dayanımı, porozite ve etüv kurusu yoğunluk ilişkisi

Şekil 32'de 28 günlük basınç dayanımı, görünür porozite ve etüv kurusu yoğunluk arasındaki ilişkileri detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 32. Basınç dayanımı, görünür porozite ve etüv kuru yoğunluk ilişkisi.

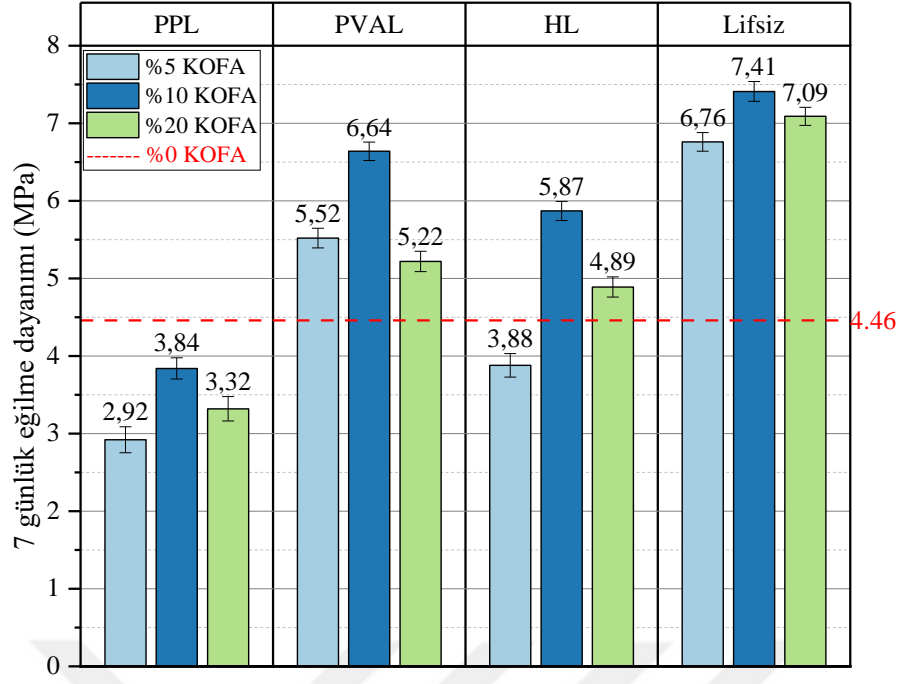
Görünür porozite ile basınç dayanımı arasında ters orantı bulunmakta olup, bu durum malzeme içerisindeki gözeneklerin miktarı azaldıkça basınç dayanımının arttığını net bir şekilde göstermektedir. Gözeneklerin azalması, malzemenin yapısının daha sıkı, homojen ve yoğun hale gelmesini sağlayarak basınç dayanımını artıran önemli bir etkidir.

Etüv kuru yoğunluk ile basınç dayanımı arasında doğru orantı olup bu durum, daha kompakt yapıya sahip olan malzemelerin daha yüksek basınç dayanım sergilediğini göstermektedir. PVA ve HL lifleri, PP lifine kıyasla daha iyi sonuçlar verirken, KOFA'nın %10 oranında kullanılmasıyla, dolgu malzemesi olarak kalsitin gözenekleri doldurması ve matris içerisindeki bağlayıcı özelliği artırması sayesinde, yoğunluk ve dayanımı daha da yükseltmektedir.

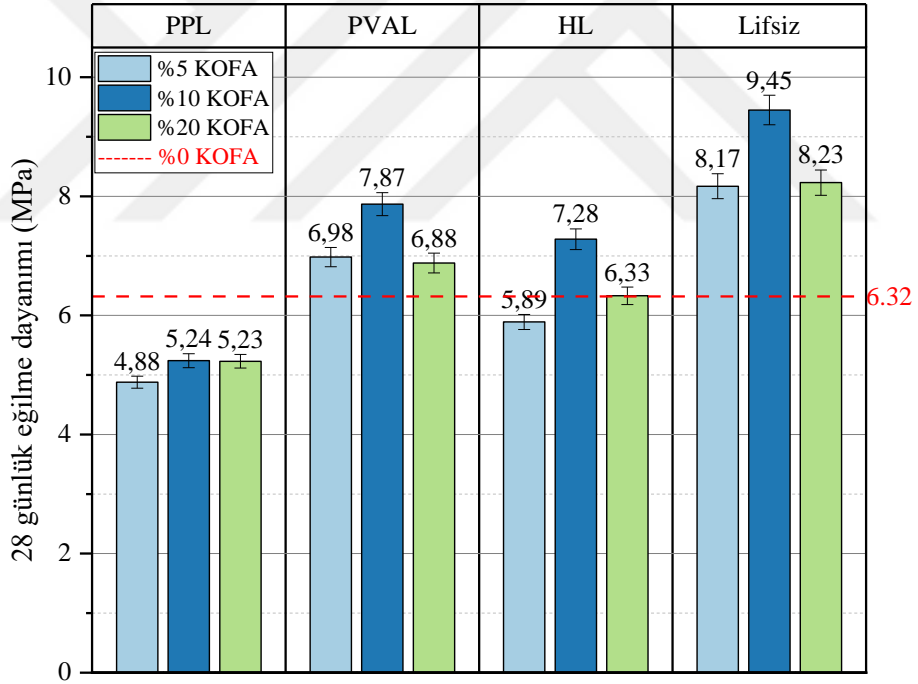
Lifsiz numuneler, daha düşük porozite ve daha yüksek yoğunluk sergileyerek dayanımı artırmaktadır. Genel olarak, düşük porozite ve yüksek yoğunluk, dayanım ve taşıma özellikleri üzerinde olumlu etkilere sahiptir. En iyi performans için %10 KOFA ile PVA, HL liflerinin veya lifsiz seçeneğin ideal olduğu belirlenmiştir. Grafik, malzeme mikroyapısının optimize edilmesinin dayanım ve taşıma performansı üzerindeki etkisini anlamak için önemli bir rehber niteliğindedir.

Eğilme dayanımı sonuçları

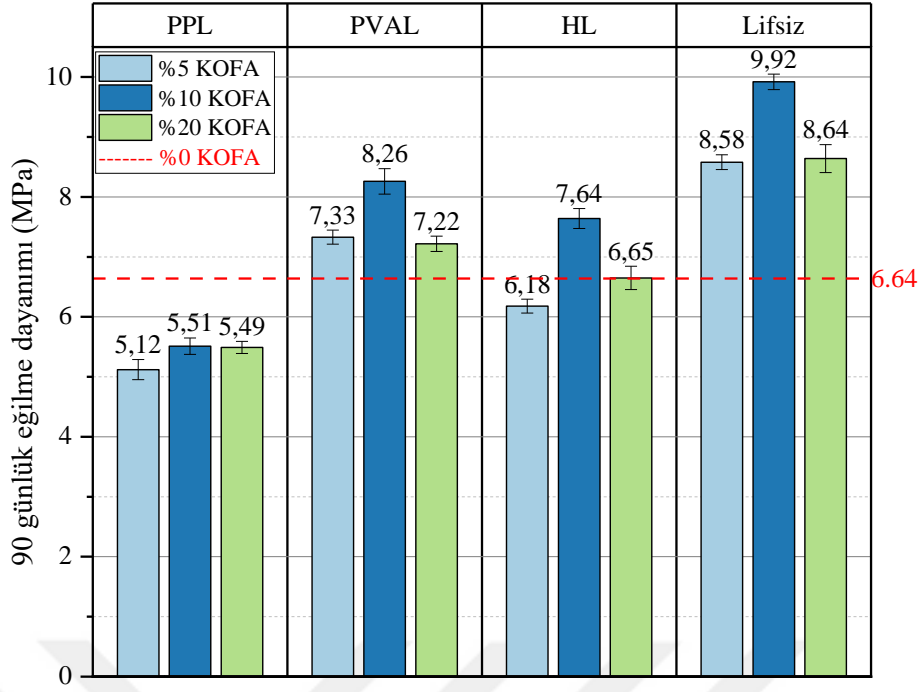
PP, PVA, HL lif katkılı ve lifsiz numunelerle hazırlanan kompozit karışımlarında, KOFA oranının eğilme dayanımı üzerindeki etkileri görülmektedir (Şekil 33, Şekil 34, Şekil 35).



Şekil 33. 7 günlük eğilme dayanımları.



Şekil 34. 28 günlük eğilme dayanımları.



Şekil 35. 90 günlük eğilme dayanımları.

Lifli ve lifsiz numunelerin eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, tüm gruplarda %10 KOFA oranının en iyi performansı sağladığı görülmektedir. 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde en iyi sonucu veren REF10 numunesi REF0 numunesine göre %49,53 yüksektir. Lifsiz numunelerde dayanım artışı, KOFA oranının dolgu etkisiyle artarken, lif katkılı kompozitler lif türüne de bağlı olarak daha düşük eğilme dayanımları sergilemişlerdir.

Lifli numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları REF0 ile karşılaştırıldığında, grup içerisinde en yüksek değeri veren %10 KOFA içerikli lifli numuneler PPL10 %17,09 düşük, PVAL10 %24,53 ve HL10 %15,19 yüksektir.

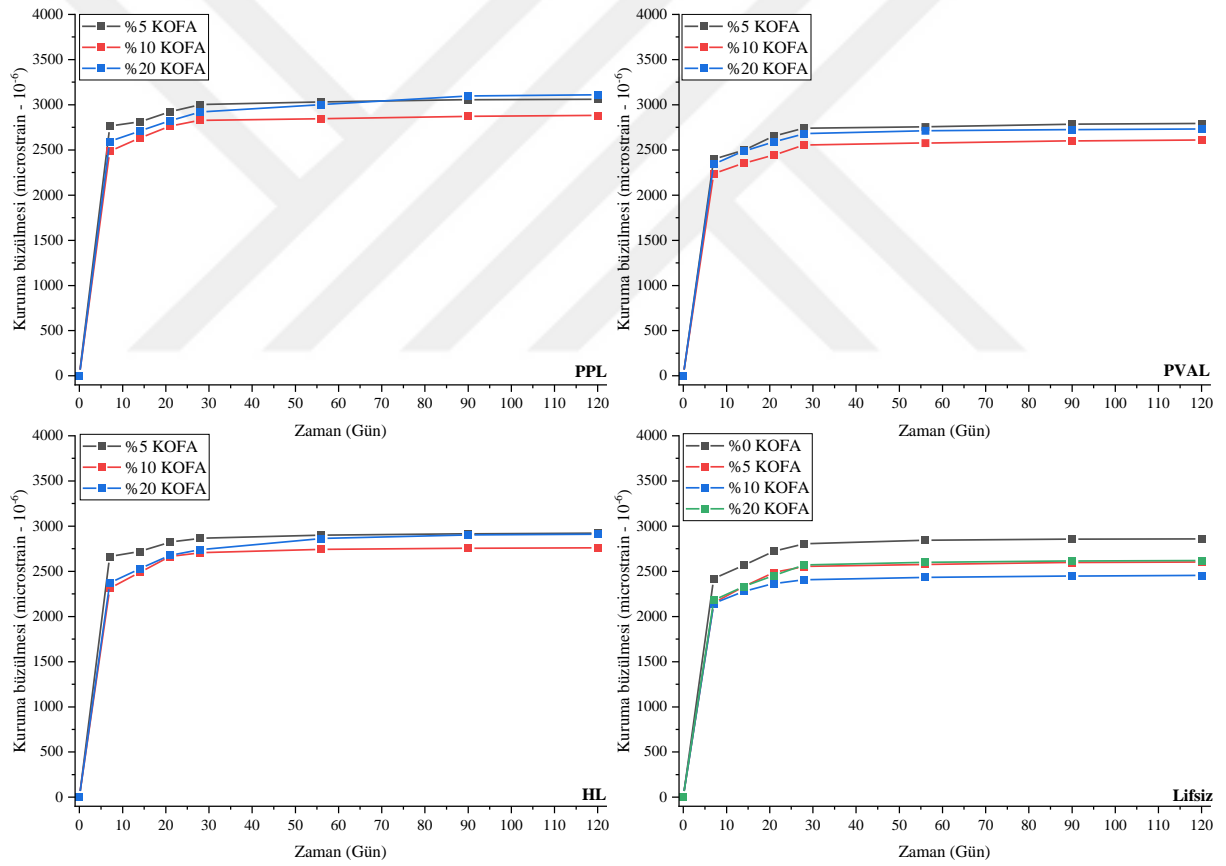
PVA lif katkılı numuneler lifsiz numunelere göre düşük performans gösterirken, HL lifleri dengeli bir katkı sağlamıştır. PP lifleri ise yetersiz kalmıştır. Bu sonuçlar, basınç dayanımındaki sonuçlar ile paralellik göstermekte ve lif katkı türünün eğilme dayanımı üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Sonuçlar kompozitin yoğunluğu, porozite ve su emme deneylerinin sonuçlarıyla uyum içerisinde.

Literatürde, Qian and Song, (2015) kalsitin mikro yapıyı yoğunlaştırarak dayanımı artırdığına dikkat çekmiştir. Ancak, Rakhimova *et al.* (2018), kalsit katkısının belirli bir seviyeyi aşması durumunda mikro yapı homojenliğini bozarak dayanım kayıplarına neden olabileceğini ifade etmiştir. Benzer şekilde, literatürde kireçtaşı ilavesinin (%10-20 seviyelerinde) beton matrisinde gözenekleri azaltarak matris yoğunluğunu artırdığı ve eğilme dayanımını olumlu etkilediği belirtilmektedir. Elgalhud *et al.* (2016), kireçtaşı oranının %25'i aştığı durumlarda, artan gözeneklilik nedeniyle dayanımda azalma gözlenmiştir.

Farooq *et al.* (2022), PP liflerinin mikro yapıda homojen bir dağılım sağlayamaması nedeniyle basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımı üzerindeki katkısının da sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, PP liflerinin matris içerisinde homojen dağılım sağlamada zorluk yaşadığı ve matrisle etkin bir aderans oluşturamadığı belirtilmiştir. Bu durum, PP liflerinin çatlak ilerlemesini engellemedeki sınırlı etkinliği ile, eğilme dayanımı üzerindeki katkısının sınırlı kalmasına yol açmıştır. Ayrıca, PP liflerinin düşük sıyrılma direncine sahip olduğu ve bu nedenle kırılma tokluğunu artırma kapasitesinin düşük olduğu ifade edilmiştir (S. Yang *et al.* 2023).

Kuruma Büzülme Deney Sonuçları

Şekil 36'da farklı KOFA oranlarının (%5, %10, %20) ve lif türlerinin (PPL, PVAL, HL) kuruma büzülme üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 36. KOFA ve lif katkılarının kuruma büzülmesine etkileri.

Geopolimer kompozitte kuruma büzülmesi, çevresel koşullara bağlı olarak malzemenin zamanla nem kaybetmesi sonucunda, suyun buharlaşmasıyla meydana gelen hacimsel küçülme ve çekme gerilmelerinin oluşması durumudur. Porozite arttıkça buharlaşma hızlanır ve buna bağlı olarak kuruma büzülmesi de artış göstermektedir. Kompozitin porozitesinin düşük olması ve yoğun ve sıkı bir yapıda olması durumunda ise, suyun hareketi ve buharlaşması zorlaşır,

dolayısıyla kuruma büzülmesi azalır. Bu durum, geopolimer matrisin iç yapısının homojenliği ve yoğunluğuyla doğrudan bağlantılıdır.

%20 KOFA içeren numunelerde, dolgu malzemesinin artışı bağlayıcı matrisi seyrelterek kapiler boşlukların tam olarak kapanmasını engelleyebilir. Bağlayıcı fazdaki azalmanın jel oluşumunu sınırlaması, matrisin daha gözenekli hale gelmesine neden olur. Ayrıca, yüksek KOFA oranı karışımın homojenliğini olumsuz etkileyerek düzensiz boşluk dağılımına yol açabilir. Kapiler boşlukların artması, suyun daha hızlı buharlaşmasına sebep olarak matris içinde gerilmeler oluşturur ve kuruma büzülmesini artırır. Bu durum, malzemenin su emme kapasitesinin yükselmesine neden olurken, uzun vadede dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir.

Kuruma büzülmesi grafiğinde tüm numune türlerinde %10 KOFA katkısının optimum oran olduğu, erken ve geç dönemde büzülme kontrolünü en etkili şekilde sağladığı görülmektedir. Lif katkılı numuneler, lifsiz numunelere göre daha yüksek büzülme değerleri sergilemiş, bu değerler lif türüne bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

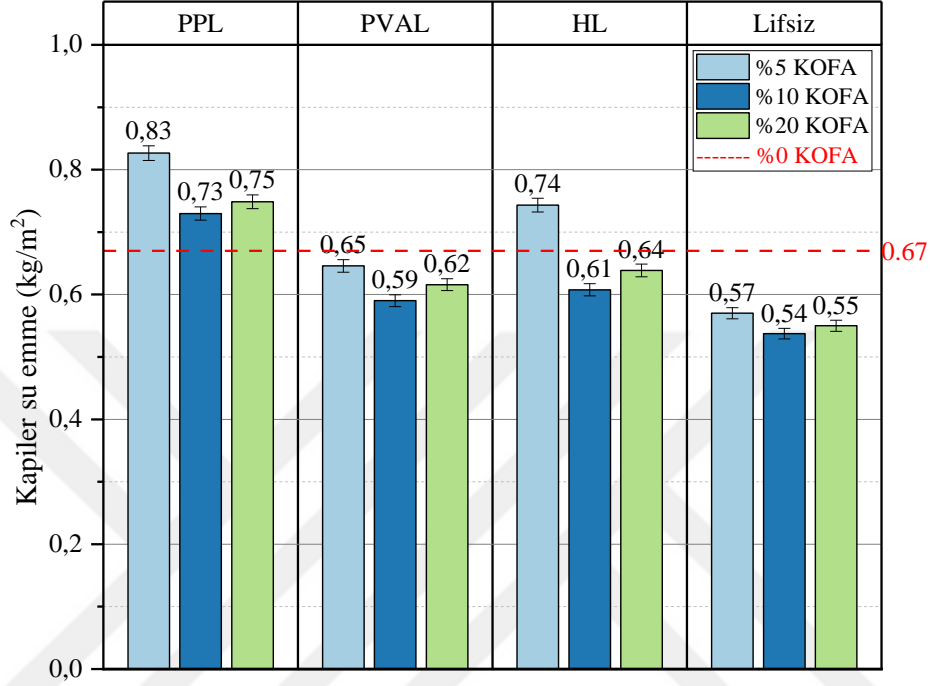
%10 KOFA içeren numuneler arasında, PVA lif katkılı kompozitler, lifsiz numunelerden sonra en düşük kuruma büzülmesi değerlerini göstermiştir. PVA liflerinin yüksek elastisite modülü sayesinde çekme gerilmelerini PP liflerine kıyasla daha iyi absorbe ettiği ve bu sayede büzülmeyi azalttığı belirlenmiştir. Buna karşılık, PP liflerinin düşük elastisite modülü nedeniyle çekme gerilmelerini yeterince absorbe edemediği ve bunun da büzülmeyi artırdığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, PP lif katkılı numuneler REF0 numunesine benzer büzülme değerleri sergilemiştir. Hibrit lif içeren numuneler ise PVA lif katkılı numunelere yakın bir performans göstermiştir.

HL10 kodlu numunelerin, PVAL10 numunesine yakın kuruma büzülme etkisini göstermesi, PP ve PVA liflerinin tek başına kullanım etkilerinin ötesinde, birlikte kullanıldıklarında büzülme sırasında oluşan iç gerilmeleri etkin bir şekilde dengeleyerek matris stabilitesine katkı sağladığını göstermektedir.

Bu çalışmanın bulguları, literatürdeki benzer çalışmalarla tutarlıdır. Al-mashhadani *et al.* (2018), PVA liflerinin yüksek elastisite modülü ve güçlü lif-matris aderansı sayesinde kuruma büzülmesini etkili bir şekilde azalttığını, buna karşılık PP liflerinin düşük elastisite modülü ve zayıf aderans nedeniyle daha sınırlı bir etki gösterdiğini belirtmiştir. S. Yang *et al.* (2023) ise, PVA lif katkısının PP liflerine kıyasla büzülme kontrolünde daha etkin olduğunu ifade etmiştir. Rashad (2022) tarafından yapılan araştırmada, kireçtaşı tozu katkısının (%10-20) kapiler boşlukları azaltarak nem kaybını sınırladığı ve büzülmeyi kontrol altına aldığı ortaya koymuştur.

Kapilerite (Kılcal Su Emme) Özellikleri

Şekil 37’de farklı KOFA oranlarının (%5, %10, %20) ve lif türlerinin (PP, PVA, HL) kapiler su emme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Genel olarak, KOFA oranının artışıyla kapiler su emme miktarının azaldığı ve lif türlerinin bu davranış üzerindeki belirgin etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 37. KOFA ve lif katkılarının kapiler su emme etkileri.

Kılcal su emme oranı, malzemenin porozitesi ile kapiler boşlukların boyutu ve dağılımına doğrudan bağlıdır. Düşük kapiler su emme değerleri, malzemenin daha az geçirgen ve dolayısıyla daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Lifli numunelerde, liflerin gözenek artırıcı etkisi nedeniyle kapiler su emme oranları genellikle daha yüksek olurken, KOFA’nın dolgu etkisi bu geçirgenliği sınırlamada önemli bir rol oynamıştır.

PP lif katkılı numuneler, en yüksek kapiler su emme değerlerini sergilemiştir. Buna karşılık, PVA lif katkılı numuneler daha düşük kapiler su emme değerleriyle taşınımı dengeli bir şekilde sınırlandırmıştır. HL katkılı numuneler ise PP ve PVA liflerinin özelliklerini birleştirerek taşınım özelliklerinde dengeli bir performans sergilemiştir.

PP lif katkılı numunelerden %5 KOFA içeren PPL5 numunesi, 0,83 kg/m² ile tüm gruplar arasında en yüksek değere ulaşmış ve REF0’a göre %23,88 daha yüksektir. PP lifleri hidrofobik olduğu için suyu doğrudan absorbe etmez, ancak bu durum matrisle iyi bir aderans kurmasını da engeller. Lif-matris aderansı zayıf olduğunda, liflerin çevresinde mikro boşluklar oluşur ve bu boşluklar kılcal hareketi artırır. Bu boşluklar, suyun matriste daha hızlı ve daha fazla taşınmasına neden olur, bu yüzden kılcal su emme oranı yüksek çıkabilmektedir. PP lifleri

genellikle karışım içinde homojen bir şekilde dağılmaz ve bazı bölgelerde topaklanma eğilimindedir. Bu durum, yerel olarak suyun serbestçe hareket edebileceği daha geniş boşlukların oluşmasına neden olur. Özellikle düşük su-bağlayıcı oranına sahip geopolimer sistemlerde, bu düzensiz dağılım kapiler su emmenin artmasına sebep olabilir.

Grup içerisinde en düşük kapiler su emme oranı tüm gruplarda da olduğu gibi %10 KOFA'nın varlığı ile sağlanmış olup PPL10 numunesi REF0 a göre %8,96 daha yüksektir. PPL5 numunesinin PPL10 numunesine göre kapiler su emme oranının %13,70 yüksektir. Bu durum, KOFA'nın dolgu etkisi ile liflerin gözenek artırıcı etkisi arasında bir denge olduğu ve özellikle %10 KOFA oranında taşınım davranışında kısmi bir stabilizasyon sağlandığını göstermektedir.

PVA lif katkılı numuneler, REF0 numunesine göre daha düşük kapiler su emme değerleri göstermiş ve taşınım özellikleri üzerinde dengeleyici bir etki sergilemiştir. %10 KOFA içeren PVAL10 numunesinde kapiler su emme miktarı REF0 göre %11,94 azalarak 0,59 kg/m²'ye düşmüş ve grup içindeki en düşük değeri göstermiştir.

PVA liflerinin, PP liflerine kıyasla daha düşük kapiler su emme değerlerine sahip olması, bu liflerin matriste daha dengeli ve düzenli bir gözenek yapısı oluşturarak su taşınımını sınırlandırmada daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır. PVA lifleri, hidrofilik yapıları sayesinde matris içinde güçlü aderans oluşturarak gözenek yapısında suyun hareketini kontrol edici bir rol üstlenmiştir. Bu nedenle, PVA lif katkılı numunelerde gözenek düzeni ve su taşınımını üzerindeki etkiler, KOFA oranının dolgu etkisi ile liflerin matristeki düzenleyici etkisi arasındaki etkileşimle belirlenmiştir.

Lifsiz numuneler, tüm gruplar içerisinde en düşük kapiler su emme değerleriyle KOFA'nın dolgu etkisinin gözenek bağlantılarını büyük ölçüde sınırlandırdığını ve su taşınımını etkin bir şekilde kontrol ettiğini ortaya koymuştur.

Lifli ve lifsiz numunelerde optimum taşınım kontrolü, %10 KOFA içeriği ile sağlanmış ve bu oran ile daha az geçirgen ve daha dayanıklı matrisler elde edilmiştir.

Literatür çalışmaları, lif türlerinin malzemenin matris ve taşınım özellikleri üzerindeki etkilerini destekler niteliktedir. Liu *et al.* (2024) yaptığı çalışmada, PVA liflerinin güçlü aderansı sayesinde geopolimer matrislerde mikro çatlak oluşumunu kontrol ettiğini belirtmiştir. Bu güçlü aderans özelliği sayesinde, matrisin daha yoğun bir mikro yapıya sahip olmasını sağlamış ve gözenek bağlantılarının sınırlandırılmasına dolaylı olarak katkıda bulunmuştur. Buna karşılık, PP liflerinin hidrofobik yapısının su emme açısından direnç sağlama potansiyeline sahip olduğu, ancak lif-matris arayüzündeki aderans zayıflığı nedeniyle mikro

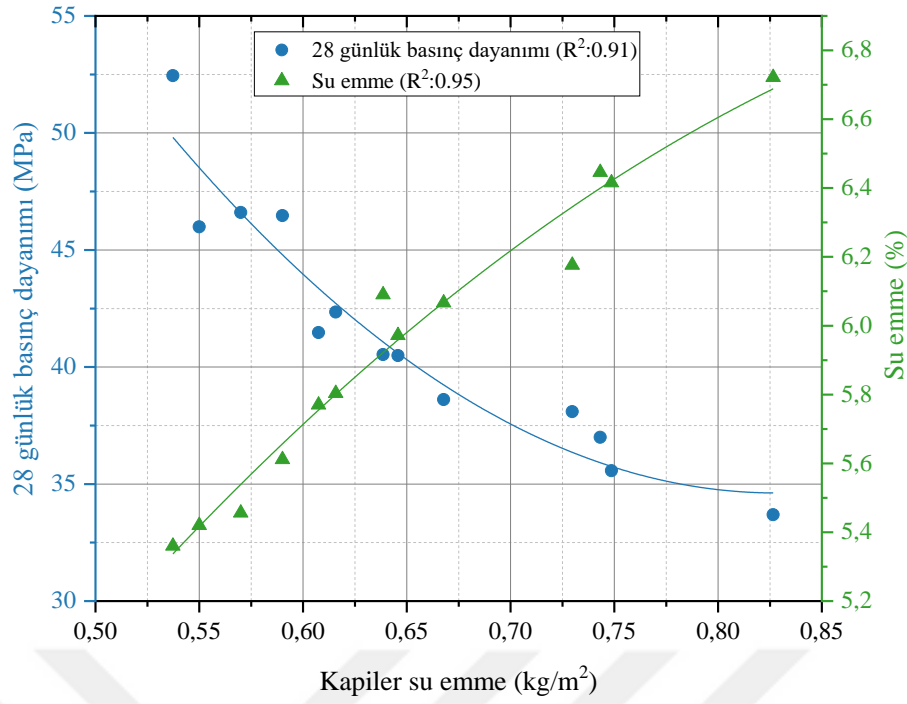
yapı üzerinde sınırlı bir iyileşme sunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, PP lifleri ile gözeneklilikte istenilen seviyede bir azalma sağlanamadığını ortaya koymuştur.

Arslan *et al.* (2019), PVA liflerinin geopolymer matrislerde geçirgenliği azaltarak su emme oranını %18'e kadar düşürdüğünü ve daha kompakt bir yapı oluşturduğunu rapor etmiştir. Ranjbar *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada ise, PP liflerinin hidrofobik yapısının geopolymer matrisi ile zayıf bir arayüz bağı oluşturduğu belirtilmiştir. Ayrıca, PP liflerinin su temas açısının 98° olarak ölçülmesi, bu liflerin suyu itme eğilimini doğrulamış, ancak bu durum lif-matris arayüzünde boşluk oluşumuna yol açarak gözenekliliğin artmasına neden olmuştur. Bu özellikler, PP lif katkıları numunelerde su emme ve kapiler geçirgenlik potansiyelinin artışına yol açmıştır.

Elgalhud *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada, kireçtaşı katkısının çimento matrisinde partikül dolgusu ve heterojen çekirdeklenme etkisiyle gözenekliliği ve kapiler su emme oranını azalttığı belirtilmiştir. Ancak, kalsit oranı %20'nin üzerine çıktığında, gözeneklilik ve su emme oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kalsit katkısının optimum oranlarda kullanıldığında dayanıklılık ve geçirgenlik özellikleri üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu literatür bulguları, KOFA oranı, lif türünün malzemenin taşınım özelliklerini kontrol ve optimize etmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle katkı malzemelerinin optimum oranlarda kullanılması, malzeme dayanıklılığını artırma ve geçirgenlik özelliklerini iyileştirme açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

Şekil 38'de kapiler su emme oranının, malzemenin 28 günlük basınç dayanımı ve su emme arasındaki ilişki detaylı olarak incelenmiştir. Grafik sonuçları, kapiler su emme oranı ile basınç dayanımı arasında ters orantılı bir ilişki, su emme oranı ile kapiler su emme arasında ise doğru orantılı bir ilişki olduğunu göstermektedir.



Şekil 38. Kapiler su emme, basınç dayanımı ve su emme ilişkisi.

Şekil 38, hazırlanan kompozitin kapiler su emme oranının hem basınç dayanımı hem de su emme performansı üzerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Kapiler su emme ile basınç dayanımı arasında ters orantı, su emme oranı ile doğru orantı vardır. Kapiler su emme oranının artışı, basınç dayanımı düşürürken, toplam su emme oranını artırarak malzemenin geçirgenliğini ve taşınım özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Örneğin, kapiler su emme oranı 0,55-0,65 kg/m² aralığında olduğunda, basınç dayanımı 45-50 MPa seviyelerinde seyrederken, su emme değeri %5,4 seviyelerinde görülür. Bu değer 0,80 kg/m²'ye çıkması durumunda, dayanımın 35 MPa'ya kadar düşmüş, su emme oranının ise %6,7'ye yükselmiştir. Kompozit içerisinde bu durum özellikle lif katkılı numunelerde gözenek bağlantılarının artmasıyla kapiler su emme oranı yükselirken, malzemenin dayanımını olumsuz etkilemiştir. Özellikle PP lif katkılı numunelerde, lif-matris arayüzünde zayıf aderans nedeniyle boşluk oluşumu gözlenmiş, bu durum gözenekliliği artırarak kapiler su emme ve toplam su emme oranını yükseltmiş dayanımı düşürmüştür. PVA lif katkılı numunelerde ise, lif-matris arası güçlü aderans, gözenek bağlantılarını sınırlandırarak su taşınımını kontrol altına almış ve daha düşük su emme oranı ile düşük kapiler su emme etkisiyle PP lifli numunelere göre daha yüksek dayanım elde edilmiştir.

Lifsiz numuneler ise, en düşük kapiler su emme ve su emme değerlerini göstererek KOFA katkısının dolgu etkisinin taşınım davranışını önemli ölçüde sınırlandırarak tüm grup içerisinde en yüksek dayanım değerini ortaya koymuştur.

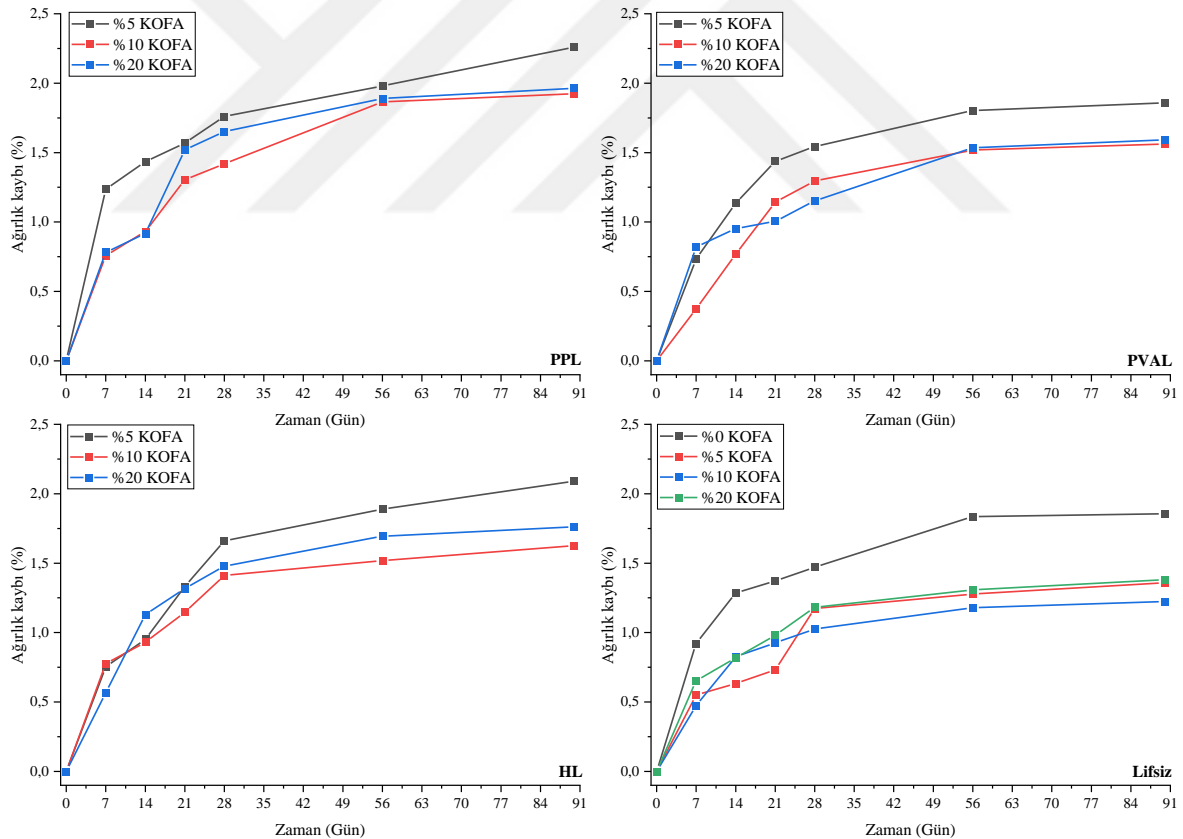
Durabilite Özellikleri

Farklı çevresel koşullarda (sülfat, asit, ıslanma kuruma ve donma çözülme) gerçekleştirilen dayanıklılık testlerinde, KOFA oranı ve lif türünün beton dayanıklılığı üzerinde belirgin etkileri olduğu tespit edilmiştir. KOFA oranının artışı genel olarak dayanıklılığı artırmış, lif katkısı ise numunelerin çevresel etkilere karşı performansını iyileştirmiştir. Özellikle PVA lif katkısı içeren numuneler, çevresel faktörlere maruz kaldığında daha düşük basınç dayanım kaybı ve ağırlık kaybı göstererek en iyi dayanıklılık performansını sergilemiştir.

MgSO₄ etkisi

Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları

Çalışmada hazırlanan PVAL, PPL, HL ve lifsiz geopolimer kompozit numuneleri, 91 gün boyunca %5'lik MgSO₄ çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisinin numunelerde oluşturduğu ağırlık kaybı, Şekil 39'da verilmiştir.



Şekil 39. MgSO₄ etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.

MgSO₄ çözeltisindeki maruz kalma süresi arttıkça tüm gruplarda ağırlık kaybı oranında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, KOFA oranının artışıyla ağırlık kaybı azalma eğilimi göstermiş ve %10 KOFA içeren numuneler, özellikle PVA ve HL lif katkılı gruplarda, en iyi performansı sergilemiştir.

MgSO₄ çözeltilisine maruz kalan tüm lifli ve lifsiz numuneler arasında, en düşük ağırlık kaybı %10 KOFA içerikli numunelerde gözlemlenmiştir. Lifsiz numuneler, lifli numunelere göre daha az ağırlık kaybı göstermiştir. MgSO₄ çözeltilisine karşı en iyi direnci, lifsiz ve KOFA (%5, %10, %20) içerikli numuneler göstermiştir.

MgSO₄ çözeltisi içinde kimyasal çözünme ve bağlayıcı kaybı, sülfat iyonlarının (SO₄²⁻) geopolimer matrisine nüfuz etmesiyle başlamaktadır. Sülfat iyonları, alümina-silikat bağlarını zayıflatarak matrisin bozunmasına neden olmaktadır. Bu süreçte, geopolimerlerin ana bağlayıcı bileşeni olan alüminosilikat jel çözülmeye başlar ve su içinde kararsız hale gelerek dışarı taşınmaktadır. Bağlayıcı bileşenlerin kaybı, numunenin kütleinde azalmaya ve dayanım kaybına yol açmaktadır. Özellikle Mg²⁺ iyonları, matristeki reaktif silikatlarla etkileşime girerek magnezyum silikat hidrat jeli oluşturmaktadır. Ancak bu jel, zamanla bozunarak çözünür ve malzeme kaybını hızlanmaktadır. Sülfat iyonlarının ilerlemesiyle mikro çatlaklar büyümekte, bağlayıcı yapı parçalanır ve katmanlı ayrışma meydana gelmektedir. Bu durum, malzemenin yüzeyinden parçaların kopmasına ve ağırlık kaybının artmasına neden olmaktadır.

Lif katkısı, sülfat etkisiyle oluşan bozunmayı doğrudan etkilemektedir. PP lifleri, matrise zayıf aderansı ara yüzeyde daha fazla boşluk oluşturmakta, bu da sülfat iyonlarının içeri girişini kolaylaştırarak daha fazla ağırlık kaybına sebep olmaktadır. PVA lifleri, matrise güçlü aderansı mikro çatlak oluşumunu sınırlandırır ve sülfat etkisini azaltarak daha az ağırlık kaybı göstermektedir. HL lifleri, PP ve PVA'nın birleşimi nedeniyle PP'den daha iyi, PVA'dan daha zayıf bir performans sergilemektedir. KOFA oranı arttıkça, matrisin yoğunluğu artar, boşluk miktarı azalır ve sülfat iyonlarının ilerlemesi zorlaşarak ağırlık kaybı sınırlanmaktadır. Lifsiz numunelerde, lif-matris ara yüzey boşlukları bulunmadığı için sülfatın girişi daha kısıtlanmakta ve bu numuneler en düşük ağırlık kaybını göstermektedir.

Tüm gruplar içerisinde optimum performansı sunan %10 KOFA içerikli lifli numunelerin MgSO₄ çözeltisine karşı performansı karşılaştırıldığında, PVA lifi en az ağırlık kaybı göstermiş, HL grubu ise PP lifinden daha az ağırlık kaybı gösterip PVA lifinden yüksek ağırlık kaybı göstermiştir. PP, PVA ve HL lifleri içeren gruplar REF0'dan daha iyi MgSO₄ çözeltisi karşı direnç göstermiş olup daha az ağırlık kaybı sağlamıştır.

Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanım kayıpları

Tablo 10. MgSO₄ Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları

Grup	KOFA Oranı	28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	91 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanım Kaybı (%)
PPL5	%5	33,7	27,6	18,1
PPL10	%10	38,1	34,3	10,0
PPL20	%20	35,6	33,5	5,9
PVAL5	%5	40,5	38,1	5,9
PVAL10	%10	46,5	44,3	4,7
PVAL20	%20	42,4	39,8	6,1
HL5	%5	37,1	32,8	11,6
HL10	%10	41,5	37,9	8,7
HL20	%20	40,5	38,4	5,2
REF5	%5	46,6	43,2	7,3
REF10	%10	52,5	49,5	5,7
REF20	%20	45,9	41,2	10,2
REF0	%0	38,6	35,4	8,3

Geopolimer kompozit numunelerin MgSO₄ çözeltisine 91 gün boyunca maruz kalması sonucu oluşan basınç dayanımı kayıpları Tablo 10'da sunulmuştur. Sülfat etkisi, magnezyum iyonlarının matris içindeki kimyasal ve fiziksel etkileşimlerini artırarak numunelerin basınç dayanımını düşürmüştür. KOFA oranının artmasıyla dayanım kayıplarının azaldığı ve matrisin sülfat iyonlarına karşı daha dayanıklı hale geldiği tespit edilmiştir. Ancak her grup için optimum KOFA oranının farklı olması, matris özelliklerinin ve lif katkılarının kimyasal dayanıklılık üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Geopolimerlerin sülfat etkisi sonucu bozulması, temel olarak gözeneklerin ve çatlakların matris üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Sülfat konsantrasyonunun artmasıyla birlikte geopolimer kompozitlerin gözenekliliği ve gözenek boyutu artmakta, bu durum daha büyük gözenek hacmi ve dolayısıyla basınç dayanımında azalmaya neden olmaktadır. Kompozit numuneler arasında, belirli KOFA oranına sahip lifsiz ve lifli numuneler incelendiğinde, özellikle lifli numuneler arasında PVA ve hibrit lif içeren numunelerin daha düşük görünür porozite ve taşınım değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiş, bu da sülfata karşı daha iyi performans sergilediklerini ortaya koymaktadır.

KOFA'nın, lifsiz ve farklı lif türleri kullanılan numunelerdeki etkisi, MgSO₄ çözeltisine karşı dirençte farklı sonuçlar elde edilmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. %5 KOFA içeren numuneler karşılaştırıldığında en iyi dayanımı sırasıyla PVAL5, REF5, HL5 ve PPL5'tir. KOFA içeriği %10 olduğunda bu sıralama PVAL10, REF10, HL10, PPL10 şeklindedir. %20 KOFA içeriğinde PVA lifinin üstünlüğü azalarak en düşük dayanım kaybı sıralaması HL20, PPL20, PVAL20, REF20 şeklinde olmaktadır.

Lifli katkılı numunelerde ideal oranda KOFA katkısı olduğunda, MgSO₄ çözeltisine direnci belirgin oranda artmaktadır. KOFA'nın lifsiz olarak kullanımı maksimum direnci sağlamada yeterli olmadığı görülmektedir. MgSO₄ etkisi sonrası en düşük dayanım kaybı sırasıyla PVAL10 (%4,7), HL20 (%5,2), REF10 (%5,7), PPL20 (%5,9) şeklinde olmaktadır. %10 KOFA oranının, PVA liflerinin mikro çatlak köprüleme kapasitesini en üst düzeye çıkardığı ve magnezyum iyonlarının matris içerisine difüzyonunu etkili bir şekilde sınırlandırarak matrisi stabilize ettiği belirlenmiştir.

Her grup için en uygun KOFA oranının farklılık göstermesi, KOFA'nın matris yoğunluğunu artırıcı etkisi ile aşırı sertleşme ve lif-matris etkileşimlerinin sınırlandırılması arasındaki dengenin dikkatle ayarlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. PVA lif içeren numunelerde %10 KOFA oranı, matrisin sıklığını artırarak dayanıklılığı en iyi şekilde sağlamış ve diğer gruplarla kıyaslandığında en düşük dayanım kaybını göstermiştir. HL lif içeren numunelerde ise %20 KOFA oranı, PVA ve PP liflerinin bir arada bulunmasının sağladığı sinerji ile en iyi performansı göstermiştir. Öte yandan, PP lif katkılı numunelerde sülfat etkisine karşı en fazla dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Bunun temel nedenleri arasında PP liflerinin hidrofobik özellikleri nedeniyle matrisle yeterince güçlü aderans kuramaması, düşük elastisite modülü nedeniyle çekme gerilmelerini yeterince absorbe edememesi ve karışım içerisinde homojen dağılmakta zorlanması yer almaktadır. Lif-matris aderansının zayıf olması, PP lifleri etrafında mikro boşlukların oluşmasına ve sülfat iyonlarının matrise daha kolay giriş yapmasına neden olmuş olabilir. Buna karşın, PVA lifleri yüksek elastisite modülü ve matrisle daha iyi etkileşim kurabilmesi sayesinde çatlakları kontrol altına alarak sülfat girişini sınırlandırmış ve daha düşük dayanım kaybı sergilemiştir. Hibrit lifler ise PP ve PVA liflerinin özelliklerini dengeleyerek, PP katkılı numunelere kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir. PP lif içeren numunelerde %20 KOFA kullanımı dayanım kaybını belirli bir ölçüde azaltmış olsa da matrisin kırılma dayanımı bu iyileşmeyi sınırlamıştır. Lifsiz numuneler arasında en düşük dayanım kaybı, %10 KOFA içeren REF10 (%5,7) numunesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, KOFA'nın matrisin sıklığını artırarak magnezyum iyonlarının malzeme içerisine girişini azalttığını göstermektedir. Genel olarak, KOFA ve lif katkılarının dengeli bir şekilde belirlenen oranlarda kullanılması, magnezyum sülfat gibi agresif çevresel faktörler karşısında geopolimer kompozitlerin uzun vadeli dayanıklılığını artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Bu bulgular, magnezyum sülfat çözeltisinde PVA lif katkılı numuneler üzerinde yapılan diğer çalışmalarda da gözlemlenen sonuçlarla uyumludur. Deng (2023) tarafından yapılan çalışmada, PVA liflerinin köprüleme etkisi sayesinde mikro çatlak oluşumunun kontrol altına

alınması ve sülfat iyonlarının numune içerisine difüzyonunun azaltılması, dayanım kaybını minimize ettiği belirtilmiştir.

Guo *et al.* (2020), PP liflerinin PVA liflerine kıyasla daha düşük elastisite modülüne ve matrise daha zayıf aderansa rağmen, homojen dağılımları sayesinde ilk yükleme aşamasında çatlak oluşumunu geciktirebileceğini belirtmiştir. Bu bulgu, yaptığımız çalışma ile uyumlu olarak, PPL20 numunesi REF0 numunesine göre, sülfat etkisine karşı daha yüksek direnç gösterip, daha az basınç dayanım kaybı göstermiştir. Sülfat çözeltisine uzun süre maruz kalma, gözeneklerin dolmasına ve matrisin değişmesine yol açarken, yüksek elastisite modülüne sahip lifler makro çatlakların mikro çatlaklara dönüşmesini engelleyerek kompozitin deformasyon kapasitesini artırmaktadır. Bu bağlamda, PVA liflerinin yüksek elastisitesi sayesinde PP liflerine kıyasla sülfat etkisine karşı daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Benzer şekilde, Guo *et al.* (2020), hibrit liflerin basınç etkisini azaltarak gözenek çatlaklarının oluşumunu engellediğini, mikro çatlakların ilerlemesini durdurduğunu ve böylece lif takviyeli geopolimer kompozitleri sülfat etkisine karşı daha dayanıklı hale getirdiğini belirtmiştir.

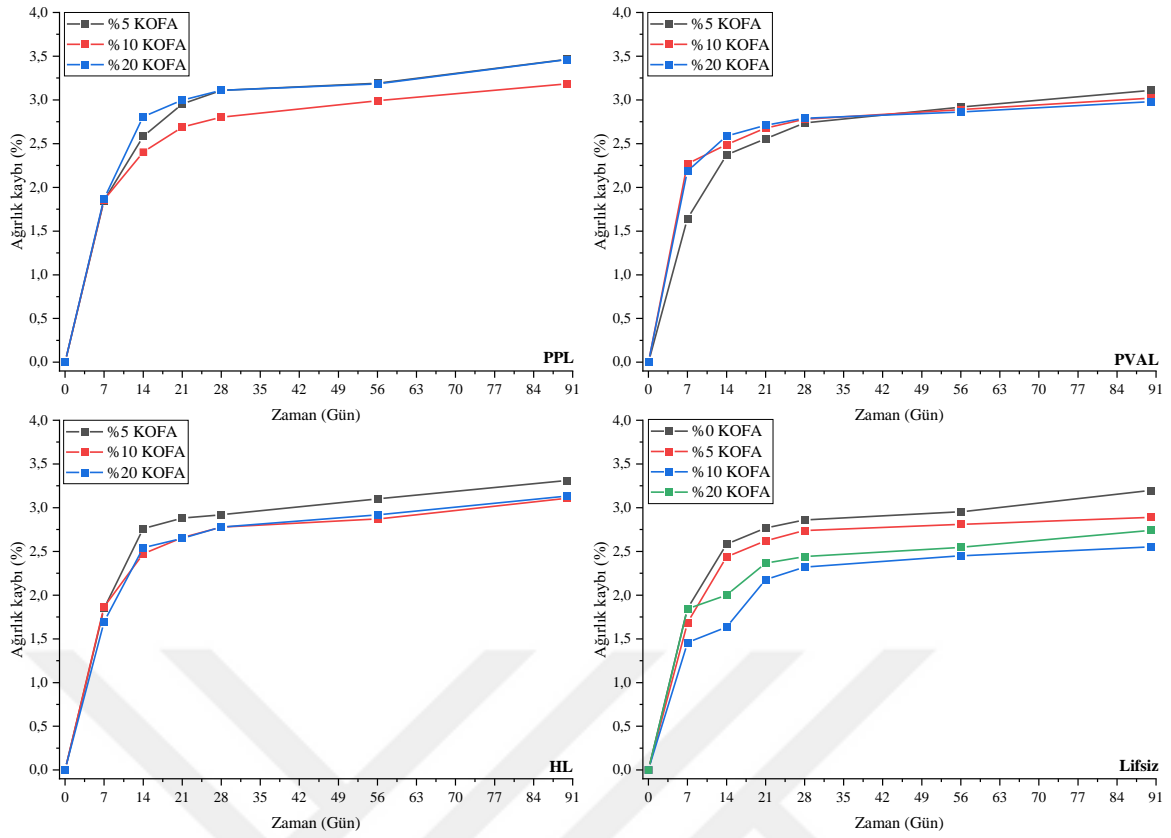
H₂SO₄ etkisi

Asit etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları

91 gün boyunca %5 H₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan geopolimer kompozit numuneler ağırlık kayıpları yaşanmıştır. Şekil 40'da sunulan verilere göre, maruz kalma süresinin artışı tüm gruplarda ağırlık kaybı oranında belirgin bir artışa neden olmuştur. Ağırlık kaybı, KOFA oranı ve lif katkısına bağlı olarak farklılık göstermiştir.

KOFA oranı ve lif türü, geopolimer numunelerin sülfürik asit ortamındaki dayanıklılığını üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. %10 KOFA oranı tüm gruplarda ağırlık kayıplarını minimize eden ideal KOFA oranı olmuştur.

%10 KOFA içeren liffsiz numuneler, sülfürik asit etkisine karşı en düşük dayanım kaybını gösteren kompozit olarak belirlenmiştir. %10 KOFA içeren lifli numuneler arasında ise PVA lif katkılı numuneler, HL kodlu (HL10) numune ile benzer ağırlık kaybı sergilemiştir.



Şekil 40. H₂SO₄ etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.

PVA liflerinin sağladığı avantaj, sülfürik asit penetrasyonunun sınırlanması ve iç yapının korunmasına katkı sunmasıyla ilişkilendirilmektedir. Sülfürik asit, bağlayıcı matriste kimyasal bozulmalara neden olmakta ve çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. PVA lifleri, yüksek elastisite modülü sayesinde bu gerilmeleri absorbe ederek mikro çatlak ilerlemesini yavaşlatmakta ve malzeme dayanımını artırmaktadır. Öte yandan, PP lif katkılı numunelerde daha fazla ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Bu durum, PP liflerinin düşük elastisite modülü ve matrisle zayıf bağlanması nedeniyle çekme gerilmelerini yeterince absorbe edememesi ve mikro çatlak ilerlemesini sınırlandıramamasıyla ilişkilendirilmektedir.

H₂SO₄ çözeltisine maruz kalan %10 KOFA içeren lifli ve lifsiz kompozitlerde, REF0 numunesine göre daha az ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte REF10 numunesi PVAL10 ve HL10 numunesine göre, bu iki kompozit numunede PPL10 numunesine göre daha az ağırlık kaybı göstermiştir.

%10 KOFA içeren lifsiz REF10 numunesi H₂SO₄ çözeltisi etkisi sonrası en az ağırlık kaybı yaşayan numune olmuştur. KOFA'nın oranı kompozitin kompakt hale gelmesinde ve porozitenin azalarak dış etkilere karşı direnç kazanmasındaki etkisi bu deneyde de gözlemlenmiştir.

Asit etkisindeki numunelerin basınç dayanım kayıpları

Tablo 11. H₂SO₄ Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları

Grup	KOFA Oranı	28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	91 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanım Kaybı (%)
PPL5	%5	33,7	24,3	27,9
PPL10	%10	38,1	29,9	21,5
PPL20	%20	35,6	25,7	27,8
PVAL5	%5	40,5	32,5	19,8
PVAL10	%10	46,5	38,5	17,2
PVAL20	%20	42,4	35,5	16,3
HL5	%5	37,1	27,9	24,8
HL10	%10	41,5	33,4	19,5
HL20	%20	40,5	32,3	20,2
REF5	%5	46,6	40,3	13,5
REF10	%10	52,5	44,5	15,2
REF20	%20	45,9	41,9	8,7
REF0	%0	38,6	30,2	21,8

Geopolimer kompozit numunelerin %5 H₂SO₄ çözeltisine 91 gün boyunca maruz kalması sonucu oluşan basınç dayanımı kayıpları Tablo 11’de sunulmuştur. Sülfürik asit etkisi, tüm geopolimer kompozit numunelerinde dayanım kaybına neden olmuş ve bu kayıplar lif türüne ve KOFA oranına bağlı olarak farklılık göstermiştir. Tüm gruplarda bu etki farklı sonuçlar doğurmuştur. Bununla birlikte optimum performans lif türüne bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

Lifsiz kompozit numuneler tüm KOFA oranlarında REF0 numunesinden daha az basınç dayanım kaybı göstermiştir. Bu durum KOFA’nın varlığının lifsiz numuneler içerisinde asit etkisine karşı daha fazla direnç gösterdiğinin tespitidir. Görünür porozite ve 28 günlük basınç dayanımları da dikkate alındığında lifsiz numunelerin lifli numunelere göre H₂SO₄ çözeltisine direncinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. KOFA’nın matristeki mikro çatlakları doldurarak kompakt bir yapı oluşturmasının etkisi görünmektedir.

Dayanım kayıpları arasında en az dayanım kaybı REF20 numunesinde gözlemlenmiştir. Dayanım kaybı KOFA oranları arasında bir dalgalanma oluşturmuştur sırasıyla lifsiz numuneler arasında en az dayanım kaybına sahip KOFA oranları, REF20, REF5 ve REF10 şeklinde olmuştur. REF20 numunesi %8,7 dayanım kaybı ile en iyi performansı göstermiştir. REF20’nin dayanım kaybı, REF10 numunesine göre %6,5, REF5 numunesine göre ise yaklaşık %4,8 daha azdır. REF5 numunesinde dayanım kaybı %13,5 olarak ölçülmüş ve REF10 numunesinden daha iyi bir performans sergilemiştir. KOFA katkısı ve lif içermeyen REF0 numunesinde ise dayanım kaybı %21,8 olarak kaydedilmiştir. KOFA, lif katkısı olmayan

numunelerde bile H₂SO₄ çözeltilisine karşı dayanıklılığı artıran bir parametre olarak kendini göstermektedir.

Lifli numunelerde de en düşük dayanım kaybı farklı KOFA oranlarında gözlenmiştir. PVA lif katkılı numunelerde %20 KOFA oranı, en düşük dayanım kaybını sağlayarak optimum dayanıklılığı sunmuştur. HL kompozit lifli numunelerde %10 KOFA oranı dayanım kaybını en iyi şekilde minimize etmiş, %20 KOFA oranı ise dayanıklılığı artırarak optimum performansın biraz gerisinde kalmıştır. PP lifli numunelerde %10 KOFA grup içerisinde en iyi sonucu vermiştir.

Lifsiz numunelerden sonra en az dayanım kaybı, %20 KOFA içerikli PVA lifli numunelerde gözlenmiştir. %20 KOFA oranındaki numune, sadece %16,3 dayanım kaybı ile lif grupları içerisinde en iyi performansı sergilemiştir. Bu değer, PVAL10 numunesine göre yaklaşık %0,9, % PVAL5 numunesine göre ise yaklaşık %3,5 daha azdır. REF0 numunesine göre ise %5,5 daha azdır. PVA lifli numunelerin her KOFA oranındaki dayanım kaybı REF0'a ve PP lifli kompozitlere göre daha iyi performans göstermiştir.

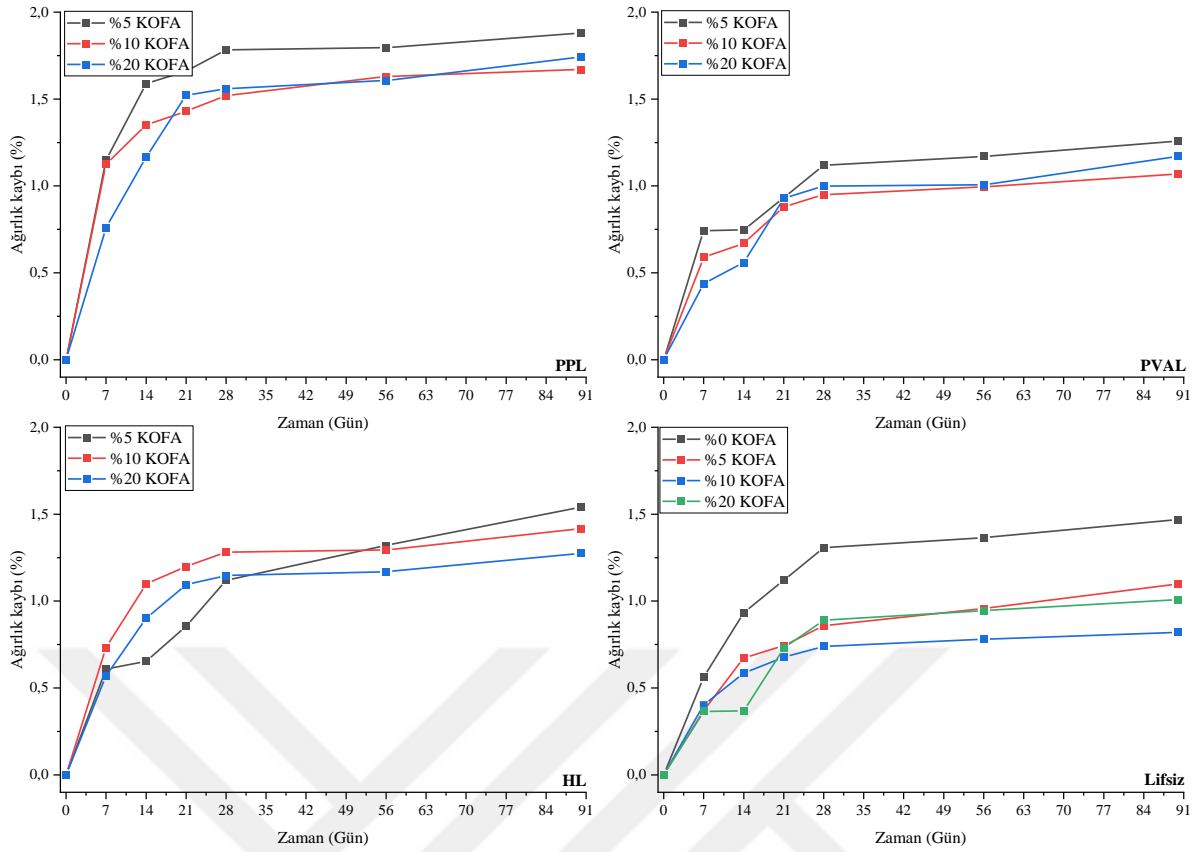
PP lifli numunelerde ise en iyi performans, %10 KOFA oranına sahip PPL10 numunesinde gözlemlenmiş ve dayanım kaybı %21,5 olarak ölçülmüştür. Bu oran, PPL5 numunesine kıyasla %6,4, PPL20 numunesine göre ise dayanım kaybı %6,3 daha düşüktür. REF0'da gözlemlenen dayanım kaybına göre %0,3 daha düşük dayanım kaybı göstermiş olsa da PVA lifi kadar asit etkisine karşı etkili bir direnç sağlayamamıştır.

Islanma kuruma etkisi

Islanma kuruma etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları

Islanma kuruma döngüsüne 91 gün boyunca maruz bırakılan geopolimer kompozit numunelerinde, farklı oranlarda ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. Şekil 41'deki verilere göre, maruz kalma süresinin artışı tüm gruplarda ağırlık kaybında kademeli bir yükselişe neden olmuştur. Ağırlık kayıplarının KOFA oranı ve lif katkısı gibi parametrelere bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir.

Tüm kompozit numunelerin ağırlık kayıpları incelendiğinde REF10 numunesinin, ıslanma kuruma döngüsüne en dayanıklı numune olduğu gözlemlenmiştir. KOFA oranının optimum seçilmesinin kompozit içindeki mikro çatlakların doldurularak kompakt bir yapı oluşmasındaki etkisinin önemi bu deneyde de ortaya çıkmıştır.



Şekil 41. İslanma kuruma etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.

Lifli numuneler arasında ise PVAL10 numunesi ıslanma kuruma döngülerine PVA lifi ile %10 KOFA içeriğinin sinerjik etkisi ile en güçlü direnci göstermiş ve en iyi performansı sağlamıştır. %10 KOFA oranı, PVA liflerinin mikro çatlak köprüleme kapasitesini etkili şekilde kullanmasını sağlamış ve dayanıklılığı optimize etmiştir.

Hibrit lifler ise ıslanma kuruma döngüsüne %5 ve %20 KOFA oranlarında ilk 28 günde benzer direnci gösterse de uzun vade de %5 KOFA içeren numunelerin hızlı bir ağırlık kaybına uğradığı fakat %20 içeren numunelerin direncini koruduğu görülmektedir.

PP lifleri en iyi performansı %10 KOFA oranında gösterse de referans numunesi dahil tüm gruplar içinde en kötü performansı sergilemişlerdir.

Tuz çözeltisi içinde ağırlık kaybı, tuz kristallerinin gözeneklerde birikmesi, kimyasal çözünme ve matrisin mekanik bozulması sonucu gerçekleşmektedir. İslanma kuruma döngüleri sırasında numune içine nüfuz eden tuz çözeltisi, suyun buharlaşmasıyla kristalleşerek iç gerilmeler oluşturmaktadır. Bu kristaller, mikro çatlakları genişleterek malzemenin parçalanmasına neden olmaktadır. Ayrıca, Na^+ ve Cl^- iyonları bağlayıcı jel ile etkileşime girerek kimyasal bozunmaya yol açmakta ve bağlayıcı malzemenin çözünerek ortamdaki uzaklaşmasına sebep olmaktadır.

PVA lifleri, matrisle güçlü aderans sağlayarak mikro çatlakları sınırlandırıp tuzun girişini engelleyerek ağırlık kaybını azaltmaktadır. Hidrofilik yapısı sayesinde bağlayıcı matris ile daha güçlü aderans oluşturmakta ve çözeltinin içeriye nüfuz etmesini zorlaştırmaktadır. PP lifleri ise hidrofobik yapıda olup, matrise daha zayıf aderans gösterdiğinden, ara yüzeyde daha fazla boşluk oluşturmaktadır. Bu durum, tuz çözeltisinin daha kolay nüfuz etmesine ve daha fazla ağırlık kaybına sebep olmasına neden olmaktadır. PVA lifleri ayrıca yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü sayesinde çatlak köprüleme kapasitesini etkin kullanarak hasarı sınırlandırırken, PP lifleri düşük elastisite modülü nedeniyle çatlakların büyümesini yeterince engelleyememekte ve tuzun daha derine nüfuz etmesine yol açmaktadır.

KOFA içeriği arttıkça, matris yoğunlaşarak tuz iyonlarının içeriye nüfuzu zorlaşmakta ve kimyasal bozunma ile ağırlık kaybı azalmaktadır. Özellikle %10 KOFA içeren numuneler, kompakt yapı oluşturarak ve lif katkısının etkisini optimize ederek en iyi performansı göstermiştir. %5 KOFA içeren numuneler, daha düşük yoğunluk nedeniyle uzun vadede daha fazla ağırlık kaybı sergilerken, %20 KOFA içeren numuneler daha yoğun yapıları sayesinde tuz etkisine karşı daha yüksek koruma sağlamıştır. Lifsiz numuneler, lif-matris ara yüzey boşlukları bulunmadığından, tuz giriş noktaları daha sınırlı olup en düşük ağırlık kaybını göstermiştir.

Şekil 41 bütünsel olarak incelendiğinde, %10 KOFA içeren lifsiz numune, lif varlığı olmadan da ıslanma kuruma döngülerine karşı güçlü bir direnç göstermiştir. PVA lif varlığı ise REF0 numunesine göre yüksek dayanıklılık gösterebileceğini kanıtlamıştır.

Islanma kuruma etkisindeki numunelerin basınç dayanım kayıpları

Tablo 12. Islanma Kuruma Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları

Grup	KOFA Oranı	28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	91 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanım Kaybı (%)
PPL5	%5	33,7	31,7	5,9
PPL10	%10	38,1	35,4	7,1
PPL20	%20	35,6	33,2	6,7
PVAL5	%5	40,5	36,9	8,9
PVAL10	%10	46,5	43,9	5,6
PVAL20	%20	42,4	38,1	10,1
HL5	%5	37,1	32,5	12,4
HL10	%10	41,5	37,8	8,9
HL20	%20	40,5	36,3	10,4
REF5	%5	46,6	41,1	11,8
REF10	%10	52,5	51,0	2,9
REF20	%20	45,9	43,3	5,7
REF0	%0	38,6	36,5	5,4

Geopolimer kompozit numunelerinin ıslanma kuruma döngüsüne 91 gün boyunca maruz kalması ve klorür iyonlarının zararlı etkisi sonucu oluşan basınç dayanımı kayıpları Tablo 12’de bulunmaktadır. Bu döngü sırasında, klorür iyonları betonun matrisine nüfuz ederek hem basınç kaybına hem de ağırlık kaybına neden olmuştur. Islanma kuruma sırasında döngüsel olarak suyun buharlaşması ve klorür iyonlarının kristalleşmesi, mikro çatlakların ilerlemesini hızlandırmış ve matrisin mekanik dayanımını azaltmıştır.

Islanma kuruma deneyi sonucunda neredeyse tüm gruplar (REF10 hariç (%2,9)) REF0 (%5,4) numunesinden daha fazla dayanım kaybı göstererek tuz etkisine karşı yeterli direnci sağlayamamıştır.

Numunelerin porozite, su emme ve taşınım özellikleri değerlendirildiğinde, ıslanma kuruma etkisine karşı yalnızca REF10 numunesinin en iyi performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Lifli numuneler arasında, PVA lifinin diğer deneylerde sergilediği performansın aksine klor etkisine karşı beklenen performansı sağlayamamıştır. Bu durum, PVA lifinin klor iyonlarının nüfuzuna karşı yeterli bariyer oluşturamaması veya matris içerisindeki etkileşimlerin beklenenden farklı gerçekleşmesiyle açıklanabilir.

PVA ve PP lifleri aynı KOFA oranlarıyla karşılaştırıldığında, %10 KOFA içeriğine sahip numuneler arasında PVA lifleri, PP liflerine kıyasla daha az dayanım kaybı göstermiştir. Ancak, yukarıda belirtildiği gibi REF0 numunesine göre daha yüksek basınç dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Diğer KOFA oranlarında ise PP lif içeren numuneler, PVA lif içeren numunelere kıyasla daha az dayanım kaybı sergilemiştir. Bu durum, PVA liflerinin suya ve kimyasal çözeltilere karşı daha iyi bağlanma özelliklerine sahip olması nedeniyle beton ve geopolimer sistemlerinde dayanıklılığı artırıcı bir etki sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak, klor iyonları gibi agresif çevresel etkiler söz konusu olduğunda, hidrofilik yapısı nedeniyle PVA lifleri daha fazla etkilenmiştir. Bu etkileşim sonucunda PVA lifleri suyu emerek şişmiş ve zamanla mekanik özelliklerinde kayıplara neden olmuştur. PP lifleri ise hidrofobik özellikleri sayesinde klor etkisine karşı KOFA'nın varlığıyla birlikte ıslanma kuruma etkilerine karşı daha dirençli bir performans sergilemiştir. PP liflerinin su ve kimyasalları emmemesi, onları klor iyonlarının neden olduğu bozulmalara karşı daha az dirençli hale getirmiştir. Bununla birlikte, PP liflerinin bağlayıcı matrisle kimyasal bağ oluşturmada zayıf kalabileceği de dikkate alınması gereken bir husustur.

Lifli numunelerde farklı oranlarda KOFA kullanımı, PP ve HL numunelerinde %5 oranı, PVA numunelerinde ise %10 oranı en iyi sonucu vermiştir.

Lifsiz numunelerde, en iyi performans %10 KOFA oranına sahip REF10 numunesinde dayanım kaybı %2,9 olarak ölçülmüştür. Bu durum, KOFA'nın matrisi yoğunlaştırarak klorür

iyonlarının malzeme içerisine nüfuzunu etkili bir şekilde sınırlandırdığını göstermektedir. %5 KOFA katkısı ise dayanım kaybını engellemede yeterli olamamıştır. Bu bulgular, KOFA katkısının lif katkısı bulunmayan koşullarda klorür iyonlarının zararlı etkilerine karşı dayanıklılığı artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, KOFA oranı ve lif katkıları, ıslanma kuruma döngüsü ve klorür iyonlarının zararlı etkilerine karşı dayanıklılığı artırmada farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Bu bulgular, KOFA ve lif katkılarının, geopolimer kompozitlerin çevresel etkiler altındaki uzun vadeli performansını optimize etmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

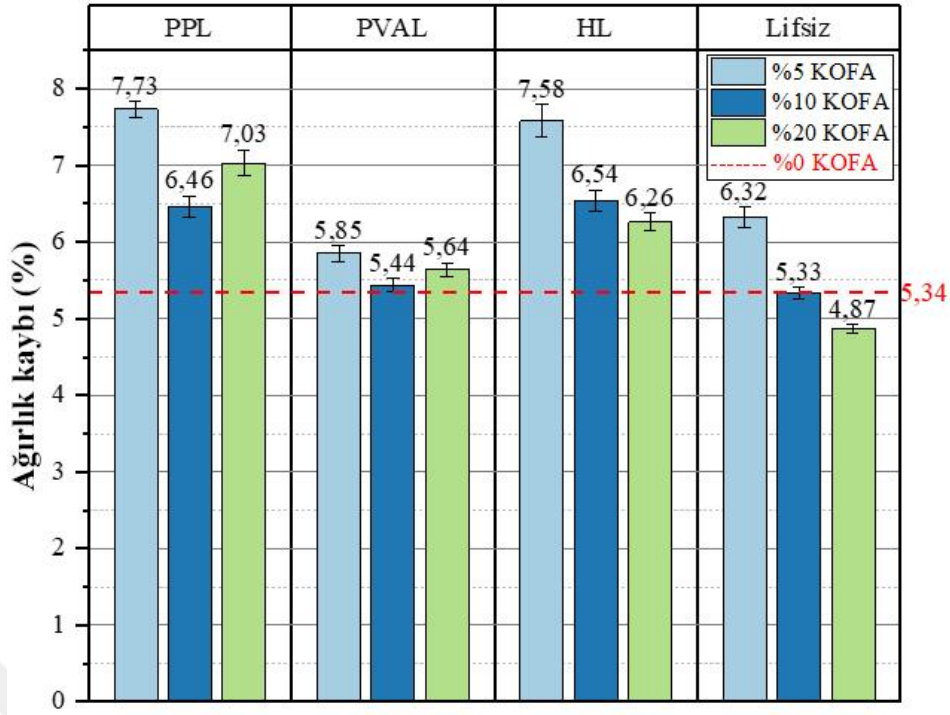
PP liflerin klorür iyonlarına karşı dayanıklılığı artırıcı etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu katkının beton mikro yapısını güçlendirme potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Aisheh *et al.* (2022); Gorji Azandariani *et al.* (2023) PP liflerin beton içerisindeki çatlak oluşumunu sınırlandırarak gözenekliliği azalttığını ve bu sayede klorür iyonlarının beton içerisine nüfuzunu etkili bir şekilde engellediğini bildirmiştir. Bu çalışma, PP lif katkılı betonların, lif içermeyen numunelere kıyasla ıslanma kuruma etkilerine karşı daha yüksek direnç gösterdiğini ve özellikle agresif çevresel koşullarda betonun uzun vadeli dayanıklılığını artırdığını vurgulamaktadır.

Rashad *et al.* (2023) tarafından yapılan simüle edilmiş gelgit bölgesi ve deniz suyu etkisi altında yapılan çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer çimentosuna %10-20 oranında kireçtaşı tozu (LS) eklenmesinin basınç dayanımını artırdığı ve mikroyapıyı sıkılaştırarak tuzlu suya ve ıslanma kuruma döngülerine karşı dayanıklılığı geliştirdiği belirtilmiştir. Ancak, %20'nin üzerindeki oranlarda gözeneklilik artışı nedeniyle dayanımda belirgin düşüşler gözlenmiştir. Bu bulgular, çalışmamızda elde edilen sonuçlarla uyumlu olup hem lif katkılarının hem de LS'nin beton dayanıklılığı üzerindeki olumlu etkilerini desteklemektedir.

Donma çözülme etkisi

Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları

Tüm numunelerde, %5 KOFA oranı, en fazla ağırlık kaybının yaşandığı oran olmuştur. KOFA oranı %10 ve %20 seviyelerine yükseltildiğinde, ağırlık kaybında belirgin bir azalma gözlenmiştir (Şekil 42).



Şekil 42. Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık kayıpları.

Donma çözülme sürecinde en az ağırlık kaybı gösteren numune, lifsiz numunelerden %20 KOFA içeriğine sahip REF20 numunesi olmuştur. Bu numune, REF0'a göre %0,47 daha az ağırlık kaybı göstermiştir. Lifsiz numunelerden REF10 numunesi ise yaklaşık olarak REF0 kadar ağırlık kaybı sergilemiştir. REF5 numunesi ise daha fazla ağırlık kaybı göstermiştir. Bu durum, lifsiz kompozitler için donma-çözülme direncinde yoğun KOFA içeriğine sahip numunelerin daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Lifsiz numunelerde, KOFA katkısının matristeki yoğunluğu artırarak donma çözülme döngülerine karşı dayanıklılığı önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. KOFA, kompozitin yapısını daha kompakt hale getirerek su penetrasyonunu sınırlamakta ve bu sayede donma çözülme sırasında oluşabilecek mikro çatlakların etkisini minimize etmektedir.

Lifli numuneler, genel olarak REF0 numunesine kıyasla daha yüksek ağırlık kaybı göstermiştir. Özellikle PP lif içerikli ve HL kodlu numuneler, tüm KOFA oranlarında REF0'a göre daha fazla ağırlık kaybı sergilemiştir. PVA lifli numuneler ise %10 KOFA oranında REF0 numunesine göre %0,10 daha yüksek ağırlık kaybı göstermiş olmakla birlikte, referans numunesine oldukça yakın bir ağırlık kaybı gözlemlenmiştir.

PP lifleri, mikro çatlak ilerlemesini sınırlayarak matrisin stabilizasyonuna katkı sağlasa da düşük elastisite modülü nedeniyle donma çözülme sürecinde beklenen dayanımı tam olarak sağlayamamaktadır. PVA lifleri ise yüksek çatlak köprüleme kapasitesi ve matrise güçlü aderansı sayesinde donma çözülme etkisine karşı daha etkili bir koruma sağlamaktadır.

Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanım kayıpları

Tablo 13. Donma Çözülme Etkisindeki Numunelerin Basınç Dayanım Kayıpları

Grup	KOFA Oranı	28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	91 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanım Kaybı (%)
PPL5	%5	33,7	28,8	14,5
PPL10	%10	38,1	33,1	13,1
PPL20	%20	35,6	31,8	10,7
PVAL5	%5	40,5	35,9	11,4
PVAL10	%10	46,5	41,4	11,0
PVAL20	%20	42,4	38,1	10,1
HL5	%5	37,1	30,1	18,9
HL10	%10	41,5	35,4	14,7
HL20	%20	40,5	36,6	9,6
REF5	%5	46,6	33,2	28,8
REF10	%10	52,5	40,3	23,2
REF20	%20	45,9	46,1	-0,4
REF0	%0	38,6	42,7	-10,6

Tablo 13'te, donma çözülme etkisi altında %5, %10 ve %20 KOFA oranına sahip numunelerde basınç dayanım kaybının farklı lif türlerine bağlı olarak değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.

Donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanım testi yapılan numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarıyla olan mukayese sonucunda en az dayanım kaybı gözlemlenen lifli numune HL20 numunesi olmuştur. Bunu PVAL20 ve PPL20 numuneleri takip etmiştir.

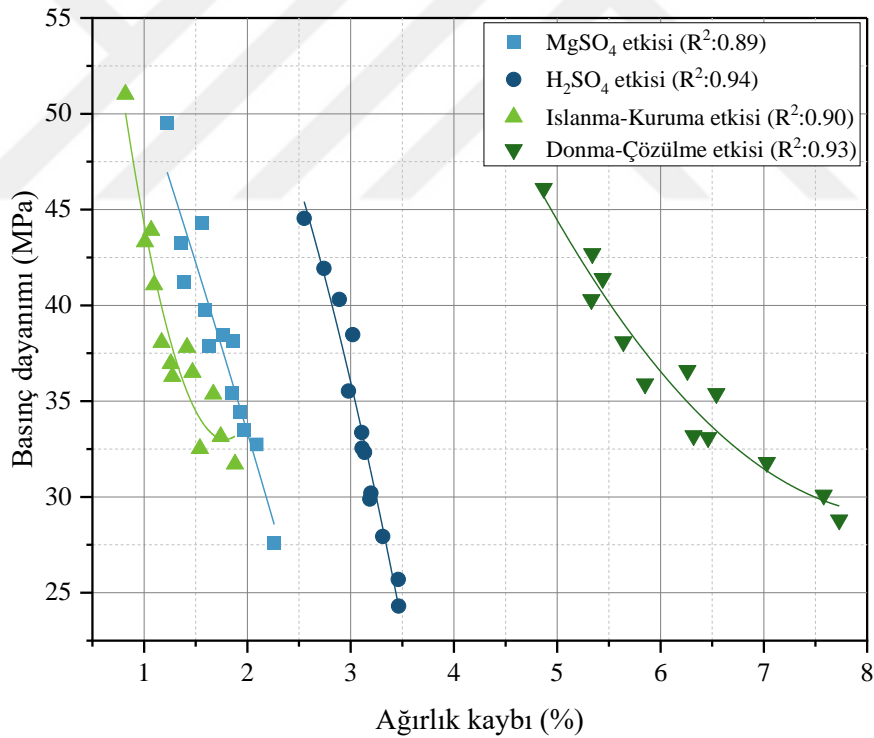
Lifli numuneler dayanım kaybı %20 KOFA oranında minimum seviyeye indiği tespit edilmiştir. Özellikle HL20 numunesi, tüm lif grupları içinde en düşük dayanım kaybını sergileyerek, KOFA'nın matrisi yoğunlaştırıcı etkisi ile lif katkılarının sinerjik etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur. PVA liflerinin dayanıklılığa olan etkisinin PP liflerinden daha fazla olduğu tabloda yer alan dayanım kayıplarından görülmektedir.

Lif katkısı bulunmayan %5 ve %10 KOFA içerikli referans numunelerde dayanım kaybının, lif katkılı numunelere kıyasla daha yüksek olmuştur. %5 KOFA oranına sahip REF5 numunesinde dayanım kaybı %28,8 ve %10 KOFA oranına sahip REF10 numunesinde dayanım kaybı %23,2 olarak ölçülürken, %20 KOFA oranına sahip REF20 numunesinde dayanım kaybı sıfıra (-%0,4) inmiştir. REF0 numunesinde ise %10,6'lık bir dayanım artışı gözlenmiştir. Bu, donma çözülme döngüsü sırasında numunenin çözülme aşamasında geç hidrasyon veya geç başlayan geopolimerizasyon süreçlerinin etkili olabileceğini göstermektedir. KOFA, belirli bir oranda kullanıldığında matrisin daha homojen hale gelmesini sağlar. Ancak %5 KOFA içeren numunelerde bağlayıcı malzeme ile tam entegrasyon sağlanamaz. %5 KOFA içeren numunelerde boşlukların tam olarak kapanmaması, kapiler

boşlukların fazla olmasına neden olur. Kapiler boşluklar, donma-çözülme döngüsünde suyun daha hızlı ilerlemesine ve matris içinde genişleme basınçlarının artmasına yol açar. Bu durum, mikro çatlakların oluşmasına ve donma çözülme döngülerinde ilerlemesine neden olabilir. Bu da dayanım kaybını artırır.

Literatür taramaları, PP ve PVA liflerinin donma çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ele almıştır. Yuan *et al.* (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, PP liflerinin mikro çatlak ilerlemesini baskılayarak matrisi stabilize ettiği ancak düşük elastisite modülü nedeniyle erken donma çözülme döngülerinde sınırlı bir dayanıklılık sergilediği ifade edilmiştir. Buna karşılık, PVA liflerinin, mikro çatlakların köprülenmesi ve matris yoğunluğunun optimize edilmesi sayesinde donma çözülme dayanıklılığını artırmada daha üstün performans sergilediği belirtilmiştir.

Geopolimer kompozitin farklı çevresel koşullar etkisi altında gösterdiği basınç dayanımı ve ağırlık kaybı Şekil 43'te incelenmiştir. Kompozitin fiziksel ve kimyasal etkilere performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 43. Geopolimer kompozitin çevresel koşullara verdiği tepkiler.

Magnezyum sülfat etkisi altında geopolimer kompozitin basınç dayanımı, ağırlık kaybı ile doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. MgSO₄ etkisi genellikle bağlayıcı matrisin kimyasal yapısına sülfat iyonlarının nüfuz etmesiyle gerçekleşen içsel bir bozulmaya yol açmaktadır. Şekil 43'te dayanım kaybının %2'lik ağırlık kaybı seviyesinde belirgin hale geldiğini göstermektedir. Ancak bu düşüş, diğer çevresel koşullarla karşılaştırıldığında daha sınırlı kalmakta ve geopolimer kompozitin sülfat etkisine karşı kısmen dirençli bir yapı

sergilediğini ortaya koymaktadır. $MgSO_4$ etkisi altında geopolimer kompozit kısmen direnç gösterse de dayanım kaybı belirgin bir şekilde gözlemlenmekte ve bu durum uzun süreli kullanım için iyileştirme gerekliliğini ortaya koymaktadır.

H_2SO_4 etkisi, geopolimer kompozitin kimyasal dayanıklılığı açısından en kritik zayıflık noktasını temsil etmektedir. H_2SO_4 , geopolimer bağlayıcının aluminosilikat yapısını hızlı bir şekilde bozarak kütle kaybını ve dayanım kaybını şiddetlendirmektedir. Grafik, ağırlık kaybının %3 seviyesine ulaştığında basınç dayanımının 25-30 MPa aralığına düştüğünü göstermektedir. Bu aşırı düşüş, sülfürik asidin bağlayıcı matrisin kimyasal bütünlüğünü hızla yok ettiğini ve geopolimer kompozitin bu tür agresif kimyasal etkilere karşı dirençsiz olduğunu göstermektedir. Sülfürik asit etkisi altındaki performansın yetersizliği, bu malzemenin asidik ortamlar için geliştirilmiş kimyasal dayanım katkılarına ihtiyaç duyduğunu işaret etmektedir.

$MgSO_4$ geopolimer kompozitler üzerindeki etkisi, sülfürik asit (H_2SO_4) gibi aşındırıcı kimyasallara kıyasla daha sınırlıdır. Bunun temel sebeplerinden biri, $MgSO_4$ 'ün matris içerisindeki bileşenlerle daha az agresif reaksiyonlara girmesidir. Sülfat iyonları, bağlayıcı yapı içinde çözünerek belirli düzeyde bozulmalara yol açsa da bu süreç oldukça yavaş ilerler ve genellikle yüzeysel kalmaktadır. Ayrıca, Mg^{2+} iyonları bazı durumlarda mikro çatlakları doldurabilecek çökeltiler oluşturabilir, bu da malzemenin daha uzun süre dayanmasına yardımcı olur. Buna ek olarak, geopolimerlerin çimento bazlı sistemlere göre daha düşük kalsiyum içeriğine sahip olması, etrenjit gibi genişleyen zararlı bileşiklerin oluşumunu sınırlandırarak iç gerilmeleri azaltmaktadır. Sonuç olarak, $MgSO_4$ etkisi altında malzeme belirli bir dayanıklılık sergileyebilirken, H_2SO_4 gibi daha güçlü asidik ortamlar bağlayıcı yapıyı hızla tahrip ederek ciddi dayanım kayıplarına neden olmaktadır.

Islanma kuruma döngüsü etkisi altında, geopolimer kompozitin dayanımı daha yavaş bir şekilde azalmaktadır. Sürekli su alımı ve buharlaşma, malzemenin gözenek yapısında iç gerilmeler oluşturarak mikro çatlakların büyümesine neden olmaktadır. Grafik, ağırlık kaybı %1-2 seviyesinde iken basınç dayanımının 35-45 MPa arasında kaldığını göstermektedir. Bu durum, geopolimer kompozitin fiziksel etkilere kimyasal etkilerden daha dayanıklı olduğunu ortaya koymaktadır.

Donma çözülme döngüsü etkisi, geopolimer kompozitin fiziksel dayanımını sınırlandıran bir diğer önemli çevresel etkidir. Gözeneklerde hapsolan suyun donup çözülmesiyle meydana gelen genişleme ve büzüşme, malzeme içerisinde mikro çatlakların büyümesine yol açmaktadır. Grafik, ağırlık kaybı %7 seviyesine ulaştığında basınç dayanımının 35 MPa'ın altına düştüğünü göstermektedir.

Genel olarak grafik, geopolimer kompozitlerin çevresel koşullara karşı dayanıklılığı farklı şekilde performans göstermiştir. Sulfirik asit gibi agresif kimyasal etkiler, malzemenin kısa sfirede ciddi bozulmalar yaşamasına neden olurken, donma ozölme ve ıslanma kuruma gibi fiziksel etkiler daha kademeli bozulmalarla dayanımı azaltmaktadır. Geopolimer kompozit, özellikle kimyasal etkilere karşı özel tedbirler alınmadığı sfirece, bu tür koşullarda sınırlı bir dayanım sergilemektedir.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KOFA ve farklı lif türlerinin geopolimer kompozit üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, KOFA oranlarının ve lif türünün geopolimer kompozitin taze hal, dayanım, fiziksel ve dayanıklılık performansları üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Bulgular, geopolimer kompozitin performansını optimize etmek için KOFA oranı ve lif türlerinin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

❖ Taze hal özellikleri açısından, lifsiz numuneler en yüksek yayılma çapına sahip olmuş ve işlenebilirlik açısından en iyi performansı göstermiştir. KOFA oranının artışıyla taze hal yayılma çapında iyileşme gözlenmiş, %20 KOFA oranı en yüksek değerleri sağlamıştır. Lif katkılarının işlenebilirlik üzerinde sınırlayıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. İşlenebilirliği en çok sınırlayan lif, yüksek kohezyon ve su tutma kapasiteleri nedeniyle PVA lifleri olmuştur.

❖ Fiziksel özellikler açısından, %10 KOFA oranı, matris yoğunluğunu artırarak poroziteyi azaltmış ve su emme oranlarını optimize etmiştir. Lifsiz numunelerde KOFA oranının artışıyla su emme oranlarında azalma gözlenmiş ve %10 KOFA oranı, düşük geçirgenlik ve yüksek yoğunluk açısından optimum sonuçlar sağlamıştır. PVA lifleri, düşük geçirgenlik ve kapiler su emme oranlarıyla fiziksel özelliklerin iyileştirilmesinde en etkili lif türü olmuştur.

❖ Dayanım performansı değerlendirmelerinde, lifsiz numunelerde özellikle %10 KOFA içerikli REF10 numunesi en iyi performansı sunmuştur. Lif katkılı numunelerde ise PVA lif katkılı PVAL10 numunesi, mikro çatlak köprüleme kapasitesi ve matrisle güçlü aderans özellikleri sayesinde en yüksek dayanımı sağlamıştır. Hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımında, lifli ve lifsiz numuneler için optimum KOFA oranı %10 olarak belirlenmiş, nihai dayanım sonuçlarına göre bu oran en iyi performansı sunmuştur.

❖ Kuruma büzülmesi deneylerinde, %10 KOFA oranının nem kaybını dengeleyerek, büzülme kontrolünü en etkili şekilde sağlamıştır. Lifsiz numunelerin kuruma büzülme değerleri, lif katkılı numunelere göre daha iyi performans sergilemiştir. Lifli numuneler arasında ise, %10 KOFA içerikli PVA lif katkılı kompozitler, büzülme kontrolünde daha etkin olmuştur.

❖ Taşınım özelliklerinde ise, %10 KOFA içerikli lifsiz numuneler kapiler su emme performansı açısından en iyi performansı göstermesi, KOFA'nın ideal oranlarda kullanıldığında dolgu etkisinin gözenek bağlantılarını büyük ölçüde sınırladığını ve su taşınımını etkin bir şekilde kontrol ettiğini ortaya koymuştur. %10 KOFA içeren PVAL10

numunesinde kapiler su emme miktarı REF0 göre %11,94 azalarak 0,59 kg/m²'ye düşmüş ve lifli numuneler içindeki en düşük değeri göstermiştir.

❖ Durabilite özelliklerinde ise geopolimer kompozitin farklı çevresel koşullar etkisi altında gösterdiği basınç dayanımı ve ağırlık kaybı incelenmiştir. Kompozitin fiziksel ve kimyasal etkilere performansı değerlendirilmiştir. Geopolimer kompozit, fiziksel koşullara karşı performansı nispeten iyi iken, magnezyum sülfat ve asit gibi kimyasal etkilere daha az direnç gösterebilmiştir.

- ◆ Sülfat (MgSO₄) etkisi sonrası %10 KOFA oranı, lifsiz REF10 numunesinin basınç dayanım kaybı %4,7 ile dayanıklılığı optimize ederek sülfat etkisine karşı en iyi performansı sağlamıştır. Aynı oran, PVAL10 numunesinde dayanım kaybını %5,7 minimize etmiştir.
- ◆ Asit (H₂SO₄) etkisi sonrası ağırlık kayıpları, sülfat etkisi sonrası ağırlık kayıpları sıralaması ile benzer olmakla birlikte % oranları daha yüksek çıkmıştır. Basınç dayanım kaybı en az numune %8,7 ile REF20 numunesi olmuştur. Lifsiz numuneler KOFA'nın etkisi ile asit çözeltisine en iyi direnci gösteren numuneler olmuştur.
- ◆ Islanma kuruma döngüsü sonrası sülfat ve asit etkisi sonrası ağırlık kayıpları sıralaması ile benzer olmakla birlikte % oranları daha düşük çıkmıştır. %10 KOFA içerikli, PVA (%5,6), HL (%8,9) ve REF (%2,9) numunelerinde en iyi dayanıklılık sonuçlarını sağlamıştır. PP lif katkılı numunelerde ise en düşük dayanım kaybı, %5 KOFA oranında (%5,9) elde edilmiştir. Tüm gruplar (REF10 hariç (%2,9)), REF0 (%5,4) numunesinden daha fazla dayanım kaybı göstermiştir.
- ◆ Donma çözülme döngüsü sonrası ağırlık kayıpları, diğer çevresel faktörlere göre çok yüksek oranlarda olmuştur. KOFA varlığı diğer deneylerde olduğu kadar etkili olmamıştır. %20 KOFA oranı tüm numunelerde en düşük dayanım kaybını sağlayarak dayanıklılık açısından en iyi performansı göstermiştir. PVA ve PP lif katkılı numunelerde %10 KOFA oranı ile minimum ağırlık kaybı elde edilirken, hibrit lif katkılı ve lifsiz numunelerde %20 KOFA oranı en düşük ağırlık kaybını sağlamıştır.

Bu çalışmada, %10 KOFA oranının hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerinde optimum sonuçlar sağladığı ve PVA lif katkısının dayanıklılığı artırmada en etkili katkı olduğu görülmüştür. HL lif katkısının ise, PVA ve PP liflerinin sinerjik etkisi dayanım ve dayanıklılığın yanı sıra maliyet konusunda da avantaj sağlaması, alternatif lif katkısı olarak değerlendirilmelidir. KOFA oranlarının ve lif türlerinin dikkatle optimize edilmesi, geopolimer kompozitin dayanıklılık ve dayanım performansını artırmak için kritik bir tasarım stratejisi olarak önerilmektedir.

Geopolimer alışmaları için öneriler kapsamında, %15 gibi ara KOFA oranlarının yanı sıra alternatif mineral katkı maddelerinin etkileri detaylı şekilde incelenmelidir. Sulfat, asit ve donma çözölme gibi çevresel etkilerin ötesinde, karbonatlaşma, yüksek sıcaklık ve aşırı nem gibi koşulların uzun vadeli etkileri ele alınmalıdır. Gelecekteki araştırmalar, sürdürülebilir ve yeşil bir evre hedefi doğrultusunda geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanım potansiyelini de değerlendirmelidir.



KAYNAKLAR

- Aboulayt, A., Riahi, M., Ouazzani Touhami, M., Hannache, H., Gomina, M., & Moussa, R. (2017). Properties of metakaolin based geopolymer incorporating calcium carbonate. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2393–2401. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2017.06.022>
- Acun, S. (2000). *Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametresi olarak lifsel katkıların irdelenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü. <http://hdl.handle.net/11527/22134>
- Ahmed, T., Burley, E., Rigden, S., & Abu-Tair, A. I. (2003). The effect of alkali reactivity on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 17(2), 123–144. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00009-0)
- Ahıskalı, A., Ahıskalı, M., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., & Assaad, J. (2024). Mechanical and durability properties of polymer fiber reinforced one-part foam geopolymer concrete: A sustainable strategy for the recycling of waste steel slag aggregate and fly ash. *Construction and Building Materials*, 440, 137492. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137492>
- Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01234. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01234>
- Akçaözoğlu, K., Emre GÜLDÜR, Ş., Ömer Halisdemir Üniversitesi, N., Fakültesi, M., & Mühendisliği Bölümü, İ. (2017). Mikronize Kalsit ve Uçucu Kül Katkısının Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(2), 658–668. <https://doi.org/10.5578/fmbd.58620>
- Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., Emad, W., Tayeh, B. A., & Azevedo, A. R. G. (2022). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01271. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01271>
- Akkaya, Y., & Kesler, Y. E. (2012). Mikrokalsit Katkısının Betonun İşlenebilirliğine, Mekanik Özelliklerine ve Dayanıklılığına Etkisi *. *Yazı*, 384, 6051–6061.
- Al-Akhras, N. M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1727–1734. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2006.03.026>
- Albitar, M., Mohamed Ali, M. S., Visintin, P., & Drechsler, M. (2017). Durability evaluation of geopolymer and conventional concretes. *Construction and Building Materials*, 136, 374–385. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.01.056>
- Al-Kerttani, O. M. G., & Mutar, A. (2021). Studying the behavior of geopolymer concretes under repeated loadings. *Journal of Engineering and Applied Science*, 68(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S44147-021-00013-Z/TABLES/7>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.02.061>

- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). A review on alkali-activated slag concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1475–1499. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.12.003>
- Amran, M., Al-Fakih, A., Chu, S. H., Fediuk, R., Haruna, S., Azevedo, A., & Vatin, N. (2021). Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00661. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00661>
- Arslan, A. A. (2019). *Metakaolin tabanlı geopolimer harçlara farklı kür koşullarının etkisinin incelemesi*. <http://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/6136>
- Arslan, A. A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Şahin, F., & Aygörmöz, Y. (2019). Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 225, 909–926. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.235>
- Aslan, S., & Erkan, İ. H. (2024). The Effects of Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Limestone Powder on the Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. *Applied Sciences 2024, Vol. 14, Page 553, 14(2)*, 553. <https://doi.org/10.3390/APP14020553>
- ASTM 441-97, Standard Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground BlastFurnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction.
- ASTM C666/C666M-15, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- ASTM C642 (2013), Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- ASTM C989, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars.
- ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.
- ASTM 4842-90 (1996), Standard Test Method for Determining the Resistance of Solid Wastes to Freezing and Thawing.
- Atahan, H. N., Pekmezci, B. Y., & Tuncel, E. Y. (2013). Behavior of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Static and Impact Flexural Effects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10), 1438–1445. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000691](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000691)
- Aydin, S., & Baradan, B. (2012). Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars. *Materials & Design*, 35, 374–383. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.10.005>
- Aygörmöz, 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. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117502>
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224–1232. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.031>
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.06.005>
- Baron, J., & Douvre, C. (1987). ÇİMENTODA KIREÇTAŞI DOLGU İLAVELERİNİN KULLANIMININ TEKNİK VE EKONOMİK YÖNLERİ. *Dünya Çimentosu*, 18(3), 100–104.
- Bayrak, B., Benli, A., Alcan, H. G., Çelebi, O., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2023). Recycling of waste marble powder and waste colemanite in ternary-blended green geopolymer composites:

- Mechanical, durability and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 73, 106661. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.106661>
- Bayrak, B., Alcan, H. G., Tanyıldızı, M., Kaplan, G., İpek, S., Cüneyt Aydın, A., & Güneyisi, E. (2024). Effects of silica fume and rice husk ash contents on engineering properties and high-temperature resistance of slag-based prepacked geopolymers. *Journal of Building Engineering*, 92, 109746. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109746>
- Bayrak, B., Alcan, H. G., Özelmacı Durmaz, Ö. Ç., İpek, S., Kaplan, G., Güneyisi, E., & Aydın, A. C. (2025). Studying the metakaolin content, fiber type, and high-temperature effects on the physico-mechanical properties of fly ash-based geopolymer composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/S43452-024-01071-9/FIGURES/14>
- Brown, P. W. (1981). An evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment. *Cement and Concrete Research*, 11(5–6), 719–727. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90030-2)
- Chakkor, O., Altan, M. F., Canpolat, O., Dilbas, H., & Uysal, M. (2022). Relative Performance of Limestone, Marble, and Basalt Powders in Replacement of a Recycled Fine Aggregate from Red Mud and Metakaolin-Based Geopolymer Mortar. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 46(4), 2961–2974. <https://doi.org/10.1007/S40996-021-00810-9/FIGURES/6>
- Çiftçi, E., & Erdağ, İ. (2015). *Micronized Calcite Potential, Production, and Principal Characteristics of Nigde (Turkey)*. 99–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13948-7_11
- Comrie, D. C., Paterson, J. H., & Ritcey, D. J. (n.d.). *ABSTRACI-APPLICATIONS OF GEOPOLYMER TECHNOLOGY TO WASTE STABILIZATION*.
- Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century - Google Kitaplar*. (n.d.). Retrieved January 1, 2024, from https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=9ApI3WKJpWoC&oi=fnd&pg=PA226&ots=zama5C2Sp6&sig=aSG823DiyNFlw8O4qXea6F-Tp9s&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., de la Torre, A. G., Aranda, M. A. G., & Palomo, A. (2007). An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 671–679. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.01.013>
- Cwirzen, A., Provis, J. L., Penttala, V., & Habermehl-Cwirzen, K. (2014). The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 66, 53–62. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.022>
- Dalı, A., İnşaat, ., Programı, M., & Mühendisliği, Y. (2009). *Kalsit esaslı betonların geçirimsizlik ve durabilite özellikleri*. Fen Bilimleri Enstitüsü. <http://hdl.handle.net/11527/6489>
- Davidovits, J. (n.d.). *PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS*. Retrieved October 20, 2024, from www.geopolymer.org
- Davidovits, J. (2022). Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition. *J. Davidovits.–Saint-Quentin, France*, 5(April), 680.
- Davidovits, J. (1991). GEOPOLYMERS Inorganic polymerie new materials. *Journal OfThamalAnalysis*, 37, 1633–1656.
- Davidovits, J. (1994). *PROPERTIES OF GEOPOLYMER CEMENTS*.
- Davidovits, J. (2005). *Geopolymer chemistry and sustainable development*. <https://www.researchgate.net/publication/284514069>

- Davidovits, J. (2005). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- De Vargas, A. S., Dal Molin, D. C. C., Vilela, A. C. F., Silva, F. J. Da, 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(6), 653–660. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.006>
- Degirmenci, F. N. (2018). Freeze-Thaw and fire resistance of geopolymer mortar based on natural and waste pozzolans. *Ceramics - Silikaty*, 62(1), 41–49. <https://doi.org/10.13168/CS.2017.0043>
- Demortier, G. (2000). The construction of the Cheop's great pyramid revisited. *Physicalia Magazine*, 22(4), 207–221. <https://researchportal.unamur.be/en/publications/the-construction-of-the-cheops-great-pyramid-revisited>
- Deng, Z., & Deng, Z. (2023). Short-term improvement of ductile geopolymer composites exposed to magnesium sulfate: Mechanical properties, sorptivity, and mechanisms. *Construction and Building Materials*, 408, 133648. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.133648>
- Dodo, Y., Arif, K., Alyami, M., Ali, M., Najeh, T., & Gamil, Y. (2024). Estimation of compressive strength of waste concrete utilizing fly ash/slag in concrete with interpretable approaches: optimization and graphical user interface (GUI). *Scientific Reports*, 14(1), 4598. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-54513-Y>
- Dong, M., Elchalakani, M., & Karrech, A. (2020). Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate. *Construction and Building Materials*, 236, 117611. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117611>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0637-Z>
- Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). Designing Precursors for Geopolymer Cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(12), 3864–3869. <https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2008.02787.X>
- Elgalhud, A. A., Dhir, R. K., & Ghataora, G. (2016). Limestone addition effects on concrete porosity. *Cement and Concrete Composites*, 72, 222–234. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.06.006>
- Farooq, M., Bhutta, A., & Banthia, N. (2019). Tensile performance of eco-friendly ductile geopolymer composites (EDGC) incorporating different micro-fibers. *Cement and Concrete Composites*, 103, 183–192. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.05.004>
- Farooq, M., Krishna, A., & Banthia, N. (2022). Highly ductile fiber reinforced geopolymers under tensile impact. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104374. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104374>
- Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., & Palomo, A. (2007). Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3055–3065. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0584-8>
- Fernandez-Jimenez, A., & Puertas, F. (2003). Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali-activated slag cements. *Advances in Cement Research*, 15(3), 129–136. <https://doi.org/10.1680/ADCR.15.3.129.36623>
- Ferone, C., Roviello, G., Colangelo, F., Cioffi, R., & Tarallo, O. (2013). Novel hybrid organic-geopolymer materials. *Applied Clay Science*, 73(1), 42–50. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2012.11.001>

- Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282–288. <https://doi.org/10.1065/LCA2007.05.327/METRICS>
- Fu, Q., Xu, W., Zhao, X., Bu, M. X., Yuan, Q., & Niu, D. (2021). The microstructure and durability of fly ash-based geopolymers: A review. *Ceramics International*, 47(21), 29550–29566. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2021.07.190>
- Gao, X., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2015). Properties of alkali activated slag–fly ash blends with limestone addition. *Cement and Concrete Composites*, 59, 119–128. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2015.01.007>
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.01.021>
- Glukhovskiy: *Soil silicates*. Kiev - Google Akademik. (n.d.). Retrieved September 22, 2024, from https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Soil%20silicatesKiev&publication_year=1959&author=V.%20Glukhovskiy
- Gorji Azandariani, M., Vajdian, M., Asghari, K., & Mehrabi, S. (2023a). Mechanical properties of polyolefin and polypropylene fibers-reinforced concrete—An experimental study. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100410. <https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2023.100410>
- Gorji Azandariani, M., Vajdian, M., Asghari, K., & Mehrabi, S. (2023b). Mechanical properties of polyolefin and polypropylene fibers-reinforced concrete—An experimental study. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100410. <https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2023.100410>
- Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., & Bhattacharjee, B. (2009). Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 273–283.
- Guo, L., Wu, Y., Xu, F., Song, X., Ye, J., Duan, P., & Zhang, Z. (2020). Sulfate resistance of hybrid fiber reinforced metakaolin geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107689. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107689>
- Güllü, H., Al Nuaimi, M. M. D., & Aytok, A. (2021). Rheological and strength performances of cold-bonded geopolymer made from limestone dust and bottom ash for grouting and deep mixing. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2), 1103–1123. <https://doi.org/10.1007/S10064-020-01998-2/FIGURES/12>
- Habert, G., D’Espinose De Lacaillerie, J. B., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2011.03.012>
- Hardjito, D. (2005). *Faculty of Engineering and Computing Department of Civil Engineering Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. https://espace.curtin.edu.au/bitstream/20.500.11937/5594/2/19327_downloaded_stream_419.pdf
- Hassan, A., ElNemr, A., Goebel, L., & Koenke, C. (2024). Effect of hybrid polypropylene fibers on mechanical and shrinkage behavior of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134485. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134485>
- Hobbs, D. W. (2001). Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimising risk. *https://doi.org/10.1179/095066001101528420*, 46(3), 117–144. <https://doi.org/10.1179/095066001101528420>

- Hooton, R. D. (n.d.). Silika tozu ikamesinin çimentonun fiziksel özellikleri ve sülfat saldırısına, donma ve çözülmeye ve alkali-silika tepkimesine karşı direnci üzerindeki etkisi. *ACI Malzeme Dergisi*, 90(2), 143–151. <https://doi.org/10.14359/4009>
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M., Sammour, M., & Sonebi, M. (2012). Influence of Polyvinyl Alcohol, Steel, and Hybrid Fibers on Fresh and Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(9), 1211–1220. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000490](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000490)
- Jan, A., Pu, Z., Khan, I., & Khubaib, M. (2024). A Comprehensive Review on the Effect of Fibers on Fresh and Engineering Properties of Geopolymer Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 48(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/S40996-023-01166-Y/FIGURES/4>
- Jat, D., Motiani, R., Dalal, S., & Thakar, I. (2023). Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Reinforced with Various Fibers: A Review. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 294, 139–156. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6297-4_11
- Jindal, B. B. (2018). Feasibility study of ambient cured geopolymer concrete -A review. *Advances in Concrete Construction*, 6(4), 387–405. <https://doi.org/10.12989/ACC.2018.6.4.387>
- Jindal, B. B. (2019). Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and Building Materials*, 227, 116644. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.08.025>
- Jindal, B. B., Singhal, D., Sharma, S. K., Ashish, D. K., & Parveen. (2017). Improving compressive strength of low calcium fly ash geopolymer concrete with alccofine. *Advances in Concrete Construction*, 5(1), 17–29. <https://doi.org/10.12989/ACC.2017.5.1.17>
- Joseph, D. (2008). Geopolymer CHEMISTRY and Applications, 5th edition. *J. Davidovits.–Saint-Quentin, France*, 1(January 2008), 1–698. <https://www.researchgate.net/publication/265076752>
- Kabirova, A., Uysal, M., Hüsem, M., Aygörmez, Y., Dehghanpour, H., Pul, S., & Canpolat, O. (2023). Physical and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer mortars containing various waste powders. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2050303>
- Kara, I. B. (2020). (PDF) *Kalsitin Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanımının Basınç Dayanımına Etkisi Effect of the Use of Calcite as a Substitute for Cement on Compressive Strength* Keywords Concrete Cement Strenght Calcite. https://www.researchgate.net/publication/349063811_Kalsitin_Cimento_Ikame_Malzemesi_Olarak_Kullaniminin_Basinc_Dayanimina_Etkisi_Effect_of_the_Use_of_Calcite_as_a_Substitute_for_Cement_on_Compressive_Strength_Keywords_Concrete_Cement_Strenght_Calcite
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729–746. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0401-4/FIGURES/10>
- Kılınçkale Fahriye. (2003, May). *BETONDA DAYANIKLILIK*. <https://izmir.imo.org.tr/Eklenti/1314,Betonda-Dayaniklilikpdf.Pdf?0>
<https://izmir.imo.org.tr/TR,83132/427.html>
- Koloušek, D., Brus, J., Urbanova, M., Andertova, J., Hulinsky, V., & Vorel, J. (2007). Preparation, structure and hydrothermal stability of alternative (sodium silicate-free) geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(22), 9267–9275. <https://doi.org/10.1007/S10853-007-1910-5/FIGURES/7>

- Komljenović, M., Baščarević, Z., & Bradić, V. (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 35–42. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.04.064>
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261–1277. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2007.07.011>
- Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. S. J. (2002). Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 211(1), 49–66. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00237-6)
- Lee, W. K. W., & van Deventer, J. S. J. (2007). Chemical interactions between siliceous aggregates and low-Ca alkali-activated cements. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 844–855. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.03.012>
- Lei, J., Fu, J., & Yang, E. H. (2020). Alkali-Silica Reaction Resistance and Pore Solution Composition of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Infrastructures 2020, Vol. 5, Page 96*, 5(11), 96. <https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES5110096>
- Li, K. L., Huang, G. H., Jiang, L. H., Cai, Y. B., Chen, J., & Ding, J. T. (2006). Study on Abilities of Mineral Admixtures and Geopolymer to Restrain ASR. *Key Engineering Materials*, 302–303, 248–254. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.302-303.248>
- Li, Q., Zhang, P., Wang, J., Wan, J., & Ling, Y. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiberreinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299–313. https://doi.org/10.1515/SECM-2021-0030/ASSET/GRAPHIC/J_SECM-2021-0030_FIG_018.JPG
- Li, W., & Du, H. (2018). Properties of PVA Fiber Reinforced Geopolymer Mortar. *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*, 557–564. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78175-4_71
- Li, W., Li, F., Chen, D., & Li, S. (2024). Effect of granulated blast furnace slag on uniaxial compression fatigue properties of engineered geopolymer composites. *Structures*, 69, 107513. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2024.107513>
- Li, X., Ma, X., Zhang, S., & Zheng, E. (2013). Mechanical Properties and Microstructure of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Paste and Mortar. *Materials 2013, Vol. 6, Pages 1485-1495*, 6(4), 1485–1495. <https://doi.org/10.3390/MA6041485>
- Liu, S., Liu, C., Hao, Y., Zhang, Y., Chen, L., & Li, Z. (2024). Experimental investigation of engineered geopolymer composite for structural strengthening against blast loads. *Defence Technology*, 32, 496–509. <https://doi.org/10.1016/J.DT.2023.05.010>
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). One-part alkali-activated materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 103, 21–34. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.10.001>
- Lyu, B. C., Ding, C., Guo, L. P., Chen, B., & Wang, A. guo. (2021). Basic performances and potential research problems of strain hardening geopolymer composites: A critical review. *Construction and Building Materials*, 287, 123030. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123030>
- Mallikarjuna Rao, G., & Kireety, C. H. (2019). Durability studies on alkali activated fly ash and GGBS-Based geopolymer mortars. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 25, 85–97. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_8

- Mallinadh, A. K., Chandra Sekhar Rao, T., & Ramana Rao, N. V. (2020). Strength and Behavior of Hybrid Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Columns Under Uniaxial Compression. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 68, 3–19. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3361-7_1
- Maras, M. M. (2021). Tensile and flexural strength cracking behavior of geopolymer composite reinforced with hybrid fibers. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-08579-X/FIGURES/13>
- Martys, N. S., & Ferraris, C. F. (1997). Capillary transport in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(5), 747–760. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00052-5)
- Masoud, L., Hammoud, A., Mortada, Y., & Masad, E. (2024). Rheological, mechanical, and microscopic properties of polypropylene fiber reinforced-geopolymer concrete for additive manufacturing. *Construction and Building Materials*, 438, 137069. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137069>
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2006.10.013>
- Mehta, P. K. (1983). Mechanism of sulfate attack on portland cement concrete — Another look. *Cement and Concrete Research*, 13(3), 401–406. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90040-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(83)90040-6)
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2008.12.010>
- Najafi Kani, E., Allahverdi, A., & Provis, J. L. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.07.007>
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., & Yang, E. H. (2017). High ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced one-part geopolymer composite: A micromechanics-based investigation. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3), 555–563. <https://doi.org/10.1016/J.ACME.2016.12.005>
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Qiu, J., & Yang, E. H. (2017). Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, 131, 552–563. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.11.117>
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Shaikh, F. U. A. (2015). Synthesis of heat and ambient cured one-part geopolymer mixes with different grades of sodium silicate. *Ceramics International*, 41(4), 5696–5704. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2014.12.154>
- Neupane, K. (2016). “Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry.” *Mechanics of Materials*, 103, 110–122. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2016.09.012>
- Ngo, T. P., Bui, Q. B., Phan, V. T. A., & Tran, H. B. (2022). Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting–drying cycles at different conditions of pH and salt. *Construction and Building Materials*, 329, 127168. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127168>
- Noushini, A., Samali, B., & Vessalas, K. (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 374–383. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.08.035>

- Nuaklong, P., Sata, V., Wongsu, A., Srinavin, K., & Chindaprasirt, P. (2018). Recycled aggregate high calcium fly ash geopolymer concrete with inclusion of OPC and nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*, 174, 244–252. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.123>
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42(2), 3000–3006. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2015.10.084>
- Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., & Cüneyt Aydın, A. (2023). Effect of waste colemanite and PVA fibers on GBFS-Metakaolin based high early strength geopolymer composites (HESGC): Mechanical, microstructure and carbon footprint characteristics. *Construction and Building Materials*, 377, 131064. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131064>
- Öz, A., Kılıç, D., Benli, A., Tortum, A., Kaplan, G., & Aydın, A. C. (2024). Sustainable use of waste marble powder and reclaimed asphalt pavement as aggregates in slag/metakaolin-based self-compacting geopolymer composites: Properties and durability. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 42, 101876. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2024.101876>
- Pacheco-Torgal, F., Gonzalez, J., & Jalali, S. (2012). Sustainable monitoring of concrete structures: strength and durability performance of polymer-modified self-sensing concrete. *International Journal of Sustainable Engineering*, 5(2), 170–174. <https://doi.org/10.1080/19397038.2011.599075>
- Panagiotopoulou, C., Kontori, E., Perraki, T., & Kakali, G. (2007). Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2967–2973. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0531-8>
- Pangdaeng, S., Sata, V., Aguiar, J. B., Pacheco-Torgal, F., & Chindaprasirt, P. (2015). Apatite formation on calcined kaolin–white Portland cement geopolymer. *Materials Science and Engineering: C*, 51, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2015.02.039>
- Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 77, 370–395. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.12.065>
- Patankar, S. V., Ghugal, Y. M., & Jamkar, S. S. (2014). Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Indian Journal of Materials Science*, 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/938789>
- Paudel, S. R., Yang, M., & Gao, Z. (2020). pH Level of Pore Solution in Alkali-Activated Fly-Ash Geopolymer Concrete and Its Effect on ASR of Aggregates with Different Silicate Contents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003344](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003344)
- Pelisser, F., Pozo Rodríguez, M., Derouiche, R., Zribi, M., & Baklouti, S. (2023). Study of Carbonated Clay-Based Phosphate Geopolymer: Effect of Calcite and Calcination Temperature. *Minerals* 2023, Vol. 13, Page 284, 13(2), 284. <https://doi.org/10.3390/MIN13020284>
- Pilehvar, S., Szczotok, A. M., Rodríguez, J. F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R., & Kjøniksen, A. L. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, 200, 94–103. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.057>
- Provis, J. L. (2009). Activating solution chemistry for geopolymers. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, 50–71. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.1.50>
- Provis, J. L. (2014). Introduction and Scope. *RILEM State-of-the-Art Reports*, 13, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_1

- Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry* 59.9, 191–202.
- Qian, J., & Song, M. (2015). Study on Influence of Limestone Powder on the Fresh and Hardened Properties of Early Age Metakaolin Based Geopolymer. *RILEM Bookseries*, 10, 253–259. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_31
- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., & Wu, X. (1996). Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part I. Low-temperature reaction stoichiometry and structure of a model compound. *Journal of Materials Science*, 31(1), 71–79. <https://doi.org/10.1007/BF00355128/METRICS>
- Rakhimova, N. R., Rakhimov, R. Z., Morozov, V. P., Gaifullin, A. R., Potapova, L. I., Gubaidullina, A. M., & Osin, Y. N. (2018). Marl-based geopolymers incorporated with limestone: A feasibility study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 492, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.JNONCRY SOL.2018.04.015>
- Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrali, M., Kuenzel, C., Cornelis Metselaar, H. S., & Jumaat, M. Z. (2016). Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Composites Science and Technology*, 122, 73–81. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2015.11.009>
- Rashad, A. M. (2022). Effect of limestone powder on the properties of alkali-activated materials – A critical overview. *Construction and Building Materials*, 356, 129188. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129188>
- Rashad, A. M., Ezzat, M., ElNagar, A. M., & El-Nashar, M. H. (2023). Valorization of limestone powder as an additive for fly ash geopolymer cement under the effect of the simulated tidal zone and seawater attack. *Construction and Building Materials*, 369, 130616. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.130616>
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2014). Properties of alkali activated silica fume–Al(OH)₃–fluidized bed combustion fly ash composites. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(3), 531–540. <https://doi.org/10.1617/S11527-014-0413-5/FIGURES/8>
- Rattanasak, U., Pankhet, K., & Chindaprasirt, P. (2011). Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(3), 364–369. <https://doi.org/10.1007/S12613-011-0448-3/METRICS>
- Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T., & Song, S. (2021). Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. *Chemosphere*, 267, 128900. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128900>
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023>
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409–418. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.05.069>
- Saludung, A., Azeyanagi, T., Ogawa, Y., & Kawai, K. (2021). Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag. *Journal of Cleaner Production*, 315. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128210>
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.03.019>

- Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2003). Alkali-Activated Cements and Concretes. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. <https://doi.org/10.1201/9781482266900>
- Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z., & Ou, Z. (2018). Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, *108*, 10–19. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.002>
- Silva, P. De, Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, *37*(4), 512–518. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.01.003>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, *85*, 78–90. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.03.036>
- Singh, S., Shukla, A., & Brown, R. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*, *34*(10), 1919–1925. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.02.014>
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindapasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, *90*(6), 2118–2124. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.01.018>
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2007). Fly ash-based geopolymer concrete: Study of slender reinforced columns. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 3124–3130. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0523-8>
- Tang, X. C., Nail, S. L., & Pikal, M. J. (2006). Evaluation of manometric temperature measurement (MTM), a process analytical technology tool in freeze drying, part III: Heat and mass transfer measurement. *AAPS PharmSciTech*, *7*(4). <https://doi.org/10.1208/PT070497>
- Tayeh, B. A., Bayrak, B., Zeyad, A. M., Kaplan, G., Öz, A., & Aydın, A. C. (2024). Effect of hybrid fibers and high temperatures on the properties of geopolymer composites based on slag, metakaolin, and natural zeolite. *Construction and Building Materials*, *451*, 138898. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.138898>
- Tigue, A. A. S., Dungca, J. R., Hinode, H., Kurniawan, W., & Promentilla, M. A. B. (2018). Synthesis of a one-part geopolymer system for soil stabilizer using fly ash and volcanic ash. *MATEC Web of Conferences*, *156*, 05017. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201815605017>
- Toniolo, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, *43*(17), 14545–14551. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.07.221>
- Topçu, B., İ., Demirel, E., O., Uygunoğlu, T., Osmangazi Üniversitesi, E., Fakültesi, M.-M., Mühendisliği Bölümü, İ., Kocatepe Üniversitesi, A., Fakültesi, M., & Mühendisliği Böl., İ. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, *20*(1), 91–96. <https://doi.org/10.2339/2017.20.1>
- TS EN 196-3 (2017). Çimento deney yöntemleri-Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1008 (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-18 (2004). Kâgir harcı-Deney yöntemleri-Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3 (2019). Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 12390-5. 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 12390-7. 2019. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 15167-1 (2006). Öğütülmüş yüksek fırın cürufu-Beton, harç ve şerbette kullanım için-Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (n.d.). Jeopolimer çimentonun benimsenmesinde teknik ve ticari ilerleme. *Mineral Mühendisliği*, 29, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.009>
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Schwartzman, A. (1999). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics. *Minerals Engineering*, 12(1), 75–91. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(98\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(98)00121-6)
- Wang, A., Zheng, Y., Zhang, Z., Liu, K., Li, Y., Shi, L., & Sun, D. (2020). The Durability of Alkali-Activated Materials in Comparison with Ordinary Portland Cements and Concretes: A Review. *Engineering*, 6(6), 695–706. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2019.08.019>
- Wang, T., Fan, X., Gao, C., Qu, C., Liu, J., & Yu, G. (2023). The Influence of Fiber on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete: A Review. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 827, 15(4)*, 827. <https://doi.org/10.3390/POLYM15040827>
- Wang, Y., Zheng, T., Zheng, X., Liu, Y., Darkwa, J., & Zhou, G. (2020). Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 251, 118960. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118960>
- Wee, T. H., Suryavanshi, A. K., Wong, S. F., & Anisur Rahman, A. K. M. (2000). Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures. *Materials Journal*, 97(5), 536–549. <https://doi.org/10.14359/9286>
- Weil, M., Dombrowski, K., & Buchwald, A. (2009). Life-cycle analysis of geopolymers. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, 194–210. <https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>
- Willson-Levy, R., Peled, A., Klein-BenDavid, O., & Bar-Nes, G. (2023). Development of One-part geopolymers based on industrial carbonate waste. *Construction and Building Materials*, 365, 130009. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.130009>
- Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F., & Lee, E. T. (2008). Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1981–1989. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2007.07.003>
- Yang, S., Zhao, R., Ma, B., Si, R., & Zeng, X. (2023). Mechanical and fracture properties of fly ash-based geopolymer concrete with different fibers. *Journal of Building Engineering*, 63, 105281. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105281>
- Yankwa Djobo, J. N., Elimbi, A., Kouamo Tchakouté, H., & Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 606–614. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.141>
- Yavuz Bayraktar, O., Salem Taher Eshtewı, S., Benli, A., Kaplan, G., Toklu, K., & Gunek, F. (2021). The impact of RCA and fly ash on the mechanical and durability properties of polypropylene fibre-reinforced concrete exposed to freeze-thaw cycles and MgSO₄ with ANN modeling. *Construction and Building Materials*, 313, 125508. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125508>

- Yuan, Y., Zhao, R., Li, R., Wang, Y., Cheng, Z., Li, F., & John Ma, Z. (2020). Frost resistance of fiber-reinforced blended slag and Class F fly ash-based geopolymer concrete under the coupling effect of freeze-thaw cycling and axial compressive loading. *Construction and Building Materials*, 250, 118831. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118831>
- Zhang, M., Yue, F., & Chen, B. (2024). Optimizing toughness and cost-effectiveness in one-part geopolymers via fiber reinforcement: A comprehensive investigation of PVA, PE, and glass fibers. *Construction and Building Materials*, 437, 136999. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136999>
- Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2020). Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120896. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120896>
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., & Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79–95. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.06.031>
- Zhang, Z. H., Zhu, H. J., Zhou, C. H., & Wang, H. (2016). Geopolymer from kaolin in China: An overview. *Applied Clay Science*, 119, 31–41. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2015.04.023>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Ma, X., Reid, A., & Wang, H. (2018). Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 92, 165–177. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.06.010>
- Zhong, H., & Zhang, M. (2021). Effect of recycled tyre polymer fibre on engineering properties of sustainable strain hardening geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104167. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104167>
- Zhou, J., Li, Z., Liu, X., Yang, X., & Lv, J. (2024). Mechanical Properties and Stress–Strain Relationship of PVA-Fiber-Reinforced Engineered Geopolymer Composite. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 1685, 16(12), 1685. <https://doi.org/10.3390/POLYM16121685>
- Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107–122. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)
- Zribi, M., & Baklouti, S. (2022). Phosphate-based geopolymers: a critical review. *Polymer Bulletin*, 79(9), 6827–6855. <https://doi.org/10.1007/S00289-021-03829-0/TABLES/1>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Zehra GÜRBÜZ
Doğum Tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Bildiri	