



**BAZALT LİF İÇEREN HAFİF GEOPOLİMER
BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Murat DEMİREL

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZ
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

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

**BAZALT LİF İÇEREN HAFİF GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Mechanical and Durability Properties of Lightweight Geopolymer Concretes
Containing Basalt Fiber)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat DEMİREL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZ

Erzurum
Mayıs, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Murat DEMİREL tarafından hazırlanan “Bazalt Lif İçeren Hafif Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı çalışması 27/06/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

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 Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZ danışmanlığında sunulan “Bazalt Lif İçeren Hafif Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması” 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	10	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	6	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	12	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
Murat DEMİREL	Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZ
27.6.2024	27/06/2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* 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

Bu çalışma devam ederken her türlü yardım, destek ve anlayışını eksik etmeyen tez danışmanım Sayın Doktor Öğretim Üyesi Ali ÖZ'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın farklı aşamalarında yardım ve desteğini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri Sayın Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN ve Doç. Dr. Gökhan KAPLAN'a ayrıca Kafkas Üniversitesi Doktor Öğretim Üyesi Barış BAYRAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her zaman ve her konuda yanımda olan, desteklerini esirgemeyen çok değerli abim Melik DEMİREL'e ve aileme de şükranlarımı sunarım.

Murat DEMİREL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAZALT LİF İÇEREN HAFİF GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat DEMİREL

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Ali ÖZ

Amaç: Bu çalışmada, agregası olarak pomza ve genişletilmiş perlit içeren geopolimer beton numunelerinin bazalt lif oranı, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlarının öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve metakaolin esaslı geopolimer betonun fiziksel, mekanik, mikroyapı ve taşıyıcı özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yöntem: Bu araştırma için agregası olarak pomza ve genişletilmiş perlitten oluşan iki farklı karışım üretilmiştir. Her iki karışım da bağlayıcı miktarının %0, %1 ve %2 oranında bazalt lif kullanılmıştır. Alkali aktivatörlerin mekanik ve iç yapı özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması için Na_2SiO_3 ve NaOH 2, 2.5, ve 3 oranlarında katılarak numuneler üretilmiştir. Numuneler 8 saat süreyle 75 °C fırında kür edilmiştir. Numunelerde yüksek sıcaklığın (150 °C, 300 °C ve 600 °C) ağırlık kaybı, basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bir dizi mekanik, fiziksel test ve mikroyapı analizi yapılmıştır.

Bulgular: Basınç dayanımında agregası olarak pomza kullanılan numuneler, genişletilmiş perlit kullanılan numunelere göre genel olarak %2.49 ila %33.95 daha yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Pomzanın kullanıldığı numunelerde bazalt lif oranındaki artış, alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerin dayanımında düşüşe, alkali aktivatör oranı 3 olan numunelerin basınç dayanımında ise artışa neden olmuştur. Eğilme dayanımında ise agregası olarak pomza kullanılan numuneler, genişletilmiş perlit kullanılan numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Pomza kullanılan numunelerde aktivatör oranının 2 den 2,5 ve 3'e çıkması dayanımında azalmalara neden olurken bazalt lif oranının %0 dan %1 ve %2'ye çıkması dayanım artışı oluşturmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi altında hem pomza hem de genişletilmiş perlit kullanılan numunelerde 150 °C sıcaklıkta basınç dayanımında artışlar yaşanmışken sıcaklığın 300 °C ve 600 °C'ye çıkması basınç dayanımlarında azalmalara neden olmuştur.

Sonuç: Kısa kürleme süresi ile 28 gün kürlenen numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, ilave bazalt lif eğilme dayanımını arttırmıştır. Sonuçlar, pomzanın agregası olarak kullanılmasının, genişletilmiş perlitli numunelere kıyasla basınç dayanımını %25'e kadar artırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer beton, pomza agregası, genişletilmiş perlit, yüksek sıcaklık, bazalt lif, alkali aktivatör oranı

Haziran 2024, 74 Sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER CONCRETE WITH BASALT FIBER

Murat DEMİREL

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ali ÖZ

Purpose: In this study, basalt fibre ratio, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios on the physical, mechanical, microstructural and bearing properties of ground blast furnace slag and metakaolin based geopolymer concrete specimens containing pumice and expanded perlite as aggregates were investigated.

Method: For this research, two different mixtures consisting of pumice and expanded perlite were produced as aggregates. Basalt fibre was used in both mixtures at 0%, 1% and 2% of the binder amount. In order to investigate the effect of alkali activators on mechanical and internal structure properties, Na_2SiO_3 and NaOH were added at ratios of 2, 2.5, and 3. The specimens were cured in a 75 °C oven for 8 hours. The effect of high temperature (150 °C, 300 °C and 600 °C) on weight loss, compressive strength and compressive strength loss was investigated. A series of mechanical and physical tests and microstructural analyses were performed.

Findings: Specimens using pumice as aggregate had generally 2.49% to 33.95% higher compressive strength than specimens using expanded perlite. The increase in the basalt fibre ratio in the pumice specimens caused a decrease in the compressive strength of the specimens with an alkali activator ratio of 2 and an increase in the compressive strength of the specimens with an alkali activator ratio of 3. In flexural strength, the specimens using pumice as aggregate gave better results than the specimens using expanded perlite. Increasing the activator ratio from 2 to 2.5 and 3 in the pumice specimens caused a decrease in strength, while increasing the basalt fibre ratio from 0% to 1% and 2% caused an increase in strength. Under the effect of high temperature, both pumice and expanded perlite specimens showed increases in compressive strength at 150 °C, while the increase in temperature to 300 °C and 600 °C caused decreases in compressive strength.

Conclusion: The results of specimens cured for 28 days with a short curing time were compared. According to the results, additional basalt fiber increased the flexural strength. The results showed that the use of pumice as aggregate increased the compressive strength up to 25% compared to the specimens with expanded perlite.

Keywords: Geopolymer concrete, pumice aggregate, expanded perlite aggregate, high temperature, basalt fiber, alcali activatör ratio

June 2024, 74 Pages

İÇİNDEKİLER

BAZALT LİF İÇEREN HAFİF GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI	2
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.....	xi
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Önemi.....	4
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Geopolimer Tarihçesi.....	5
Geopolimer Beton Tanımı	6
Geopolimer Kimyası	6
Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)	7
Yüksek fırın cürufunun soğutulma işlemleri	8
Yüksek fırın cürufunun faydaları	10
Metakaolin.....	11
Pomza.....	11
Pomza'nın kullanım alanları.....	13
Genleştirilmiş Perlit	14
Perlit kullanım alanları.....	17
Alkali Aktivatörler	18
Sodyum hidroksit (NaOH)	19
Sodyum silikat (Na_2SiO_3)	19
Bazalt Lif.....	20
Bazalt lifin kullanımı.....	20
Bazalt lifin betonda kullanımı.....	22

MATERYAL ve YÖNTEM	23
Materyal	23
Kullanılan malzemeler	23
Deneyde kullanılan alet ve malzemeler	29
Yöntem.....	32
Karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları	32
ARAŞTIRMA BULGULARI	38
Test süreci	38
Fiziksel Özellikler	39
Etüv kurusu ağırlık.....	39
Porozite ve su emme	41
Kılcal geçirimsizlik	45
Mekanik Özellikler.....	47
Basınç dayanımı	47
Eğilme dayanımı	50
Yüksek sıcaklık etkisi	53
Mikroyapı Analizi	59
Isı ve su ile kürlenmiş numuneler	59
Yüksek sıcaklık etkisi	61
SONUÇLAR.....	63
KAYNAKÇA	66
ÖZGEÇMİŞ.....	74

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Türkiyedeki Pomza Rezervleri	14
Tablo 2. Perlit Rezervleri	16
Tablo 3. Genleştirilmiş Perlitin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları	17
Tablo 4. Genleştirilmiş Perlitin Endüstride Kullanım Alanları	17
Tablo 5. Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	23
Tablo 6. Metakaolinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	25
Tablo 7. Pomzanın Fiziksel Özellikleri	26
Tablo 8. Genleştirilmiş Perlitin Fiziksel Özellikleri	26
Tablo 9. Bazalt Lifin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Bazalt Lifinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	27
Tablo 10. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Bileşimi	28
Tablo 11. Sodyum Silikatın Kimyasal Bileşimi	28
Tablo 12. Genleştirilmiş Perlit İçeren Bazalt Lifli Hafif Geopolimer Betonun Malzeme Miktarları	33
Tablo 13. Pomza İçeren Bazalt Lifli Hafif Geopolimer Betonun Malzeme Miktarları	33
Tablo 14. Deneylerin Standart ve Açıklama Detayları	38
Tablo 15. 12 Saatlik ve 28 Günlük Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması	50
Tablo 16. Dökümden 15 Saat Sonra Ağırlık Kaybı Sonuçları	54
Tablo 17. Dökümden 28 Saat Sonra Ağırlık Kaybı Sonuçları	55
Tablo 18. Yüksek Sıcaklık Sonrası Ağırlık Kaybının Karşılaştırılması	55
Tablo 19. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Kaybı	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Polisialatların kimyasal yapı türleri	7
Şekil 2. Geopolimer prosesi	7
Şekil 3. Yüksek fırın cürufu üretim aşamaları	8
Şekil 4. Soğutma tipine göre yüksek fırın cürufları	9
Şekil 5. Yüksek fırın cürufunun betona etkileri	10
Şekil 6. Yüksek fırın cürufu kullanım alanları	11
Şekil 7. a) asidik pomza b) bazik pomza.....	12
Şekil 8. Türkiyedeki önemli pomza yatakları	14
Şekil 9. (a) Ham perlit (b) Genleştirilmiş perlit	15
Şekil 10. Perlit kaynakları	16
Şekil 11. Bazalt lifin farklı formları: a) sürekli lif b) kırılmış lif c) dokuma lif.....	21
Şekil 12. Yüksek fırın cürufu	24
Şekil 13. (a) ÖYFC’de anataz bileşiği (b) ÖYFC'nin tane boyutu dağılımı	24
Şekil 14. Metakaolin	25
Şekil 15. (a) MK'de anataz bileşiği (b) MK'nin tane boyutu dağılımı	25
Şekil 16. (a) Pomzanın görünümü (b) Pomzanın tane boyutu dağılımı	26
Şekil 17. (a) Genleştirilmiş Perlit (b) Genleştirilmiş Perlit tane boyutu dağılımı.....	27
Şekil 18. Bazalt lif.....	27
Şekil 19. Sodyum Hidroksit (Kostik).....	28
Şekil 20. Sodyum Silikat.....	28
Şekil 21. Karışım mikseri.....	29
Şekil 22. a,b Etüv fırını	29
Şekil 23. Yüksek sıcaklık fırını	30
Şekil 24. Üç noktalı kiriş eğilme dayanımı test cihazı	30
Şekil 25. Autotest 3000-Pres.....	31
Şekil 26. Kılcal su emme deney kabı	31
Şekil 27. (a) Gres yağı, (b) Yağlanmış 5x5x5 cm’lik küp ve 4x4x16 cm’lik kiriş kalıplar	32
Şekil 28. Hassas terazi.....	32
Şekil 29. Numunelerin üretimi	35
Şekil 30. 3 noktalı kiriş eğilme dayanımı.....	35
Şekil 31. Yüksek sıcaklık deneyi	36

Şekil 32. Kılcal su emme deneyi	37
Şekil 33. Autotest 3000-Pres	37
Şekil 34. Etüv kurusu ağırlığı sonuçları 15 saat için.....	40
Şekil 35. 28-gün için etüv kurusu ağırlığı sonuçları	41
Şekil 36. (a) 12 saat (b) 28 gün için görünür porozite sonuçları	43
Şekil 37. Su emme sonuçları (a) 12 saat (b) 28 gün için su emme sonuçları.....	45
Şekil 38. (a) 12 saat (b) 28 gün için kılcal geçirimsizlik sonuçları	46
Şekil 39. Dökümden 12 saat sonra basınç dayanımı sonuçları	49
Şekil 40. Dökümden 28 gün sonra basınç dayanımı sonuçları	50
Şekil 41. Dökümden 12 saat sonra eğilme dayanımı sonuçları.....	51
Şekil 42. Dökümden 28 gün sonra eğilme dayanımı sonuçları.....	53
Şekil 43. 12 saatlik ve 28 günlük eğilme dayanımlarının karşılaştırılması.....	53
Şekil 44. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı.....	56
Şekil 45. Isıyla sertleşen PO_2_0'ın mikroyapısı.....	60
Şekil 46. Su ile kürlenmiş GP_2_0'ın mikroyapısı	60
Şekil 47. Isıyla sertleşen PO_2.5_2'nin mikroyapısı.....	60
Şekil 48. Su ile kürlenmiş GP_2.5_2'nin mikroyapısı	61
Şekil 49. 600 °C'ye maruz bırakılmış PO_2_0 (Isıl kürlenmiş) numunesinin mikroyapısı.....	61
Şekil 50. 600 °C'ye maruz bırakılmış GP_2_0 (su ile kürlenmiş) numunesinin mikroyapısı	62
Şekil 51. 600 °C'ye maruz bırakılmış PO_2,5_2 (ısıyla sertleştirilmiş) numunesinin mikroyapısı	62
Şekil 52. 600 °C'ye maruz bırakılmış GP_2.5_2 (su ile kürlenmiş) numunesinin mikroyapısı	62

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Al	: Alüminyum
CO₂	: Karbondioksit
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
GP	: Genleştirilmiş Perlit
KOH	: Potasyum Hidroksit
MK	: Metakaolin
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
OH	: Hidroksil
PÇ	: Portland Çimento
ÖYFC	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
PO	: Pomza
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
UV	: Ultraviyole
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
SiO₂	: Silisyumoksit

GİRİŞ

İnşaatlarda yaygın olarak kullanılan geleneksel betonun yüksek dayanım, maliyet etkinliği, iyi işlenebilirlik gibi birçok avantajı vardır. Bu avantajlara rağmen, geleneksel betonun düşük çekme dayanımı, düşük dayanıklılık, yüksek karbon ayak izi gibi çeşitli dezavantajları vardır. Geopolimer beton, PÇ'ye göre daha yüksek erken dayanım, daha iyi yangın dayanımı, kimyasal ve donma-çözülme direnci gibi daha iyi malzeme özellikleri gösterir; aynı basınç dayanımına sahip PÇ ile karşılaştırılabilir, daha yüksek yapışma dayanımına sahiptir (Wu et al. 2020; Shaikh et al. 2018; Kürklü 2016; Fu et al. 2011; Castel et al. 2015). Günümüzde, PÇ'ye en iyi alternatif beton ve araştırmacıların ilgi odağı, çevre dostu ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer betondur. Geopolimer beton ilk olarak 1970'lerde Fransız malzeme bilimci Joseph Davidovits tarafından keşfedilmiş ve geliştirilmiştir. Davidovits, Mısırlılar ve Romalılar gibi eski uygarlıkların yüzyıllar boyunca dayanabilen dayanıklı yapılar oluşturmak için doğal malzemeler kullandığına dikkat çekmektedir (Davidovits 2019; Davidovits 2017; Davidovits 1984). Bu malzemelerin mevcut kimya ve teknoloji kullanılarak yeniden yaratılabileceğine inandığı için, alüminosilikat minerallerinin alkali aktivasyonundan oluşan bir çimento geliştirmeye çalıştı. Bu, farklı bir kimyasal süreç kullanması nedeniyle geleneksel Portland çimentosu bazlı betondan farklı olan geopolimer betonun geliştirilmesiyle sonuçlandı. Geopolimer beton, tipik Portland çimentosu bazlı betona yeni ve çevre dostu bir alternatiftir. Bağlayıcıdaki çimentoya uçucu kül veya cüruf gibi silisyum ve alüminyum açısından zengin endüstriyel atık malzemelerle ikame edilmesiyle oluşturulur. Geopolimer beton, olağanüstü dayanıklılığı ve çevresel faydaları nedeniyle son zamanlarda popülerlik kazanmıştır. Bu çalışmada, betonda dayanım ve dayanıklılığın önemi ile bazalt lif ekleme ve alkali aktivatör oranı modifikasyonunun geopolimer betonda bu özellikleri nasıl geliştirebileceği tartışılacaktır.

Portland çimentosu gibi geleneksel çimento bazlı bağlayıcıların aksine, uçucu kül, cüruf veya kil gibi silisyum (Si) ve alüminyum (Al) bakımından zengin mineraller geopolimer betonda birincil bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bu malzemeler ile potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) gibi bir alkali aktivatör arasında kimyasal bir reaksiyonu içeren geopolimerizasyon işlemi sırasında üç boyutlu bir alüminosilikat polimer ağı üretilir. Bu ağ, bir bağlayıcı görevi görerek betona güç ve dayanıklılık kazandırır. Portland çimentosu ile oluşturulan sıradan betonla karşılaştırıldığında, geopolimer beton daha düşük karbon ayak

izi ve yangın, asit ve diğer aşındırıcı unsurlara karşı direnç gibi birçok avantaj sunar. Ayrıca ağır yükleri ve zorlu koşulları destekleyebilen yüksek dayanımlı beton oluşturmak için de kullanılabilir (Asrani et al. 2019; Ma et al. 2018; Al-Majidi et al. 2017; Sakulich (2011); Asrani et al. 2019).

Çimento endüstriyel atıklarla değiştirilerek hafif geopolimer beton oluşturulur. Bu betonun bileşimi, karışımın bileşenleri (örneğin uçucu kül, cüruf ve diğer alüminosilikat mineralleri) eklenerek değiştirilebilir. Bu bileşenlerin alkali çözeltiler kullanılarak aktive edilmesi, hafif geopolimer betonun dayanımını artıran bir bağlayıcı matris oluşturur (Jamal et al.). Geleneksel Portland çimentosu bazlı betonla karşılaştırıldığında, bu tür bir beton, olumsuz çevresel etkilerin azaltılması, daha fazla dayanım ve dayanıklılık, daha düşük ağırlığı, yangın ve ısı direnci gibi bir dizi avantaja sahiptir. Geopolimer beton, Portland çimentosunun aksine üretim sürecinde çöp olarak değerlendirilecek endüstriyel atıkları kullanarak karbondioksit emisyonlarını ve doğal kaynak kullanımını azaltır (Tayeh et al. 2021; Hu et al. 2009; Abdullah et al. 2014; Posi et al. 2016).

Volkanik kayalardan elde edilen yüksek performanslı bir takviye malzemesi olan bazalt lifin inşaat sektöründe kullanımı artmıştır. Bazalt lif, eklendiğinde geopolimer betonun çekme dayanımını, eğilme dayanımını ve darbe direncini artırır. Bazalt lif mevcut olduğundan, beton matrisi, basınçları eşit olarak dağıtmaya ve çatlakların yayılmasını önlemeye yardımcı olan üç boyutlu bir takviye ağı içerir. Sonuç olarak, geopolimer beton yapıların genel dayanım ve dayanıklılığını artırmıştır (Şahin vd. 2021; Ganesh et al. 2021; Mahmood et al. 2021; Sachet et al. 2020).

Alkali aktivatörler geopolimer beton için önemlidir ve mekanik özellikleri, tehlike stabilizasyonu ve karbon emisyonunun azaltılması onu Portland çimentosuna iyi bir yeşil alternatif haline getirmektedir. Bu, katı bir geopolimer oluşturmak için bağlayıcı ve alkali çözelti arasında kimyasal bir reaksiyonu aktive etmek için çalışır (Sivakumar et al. 2014; Cao et al. 2018; Ganesan et al. 2019). Geopolimer betonun özellikleri, alkalın aktivatörün bağlayıcı madde ile olan oranından önemli ölçüde etkilenir. Alkali aktivatör oranı ayarlanarak daha iyi mekanik dayanıma, işlenebilirliğe ve kimyasal dirence sahip geopolimer beton üretilir. Tipik olarak alkali silikatlardan veya alkali metal hidroksitlerden (potasyum veya sodyum hidroksit gibi) yapılan alkali çözeltiler, alüminosilikat bileşiklerini aktive eder. Bu kimyasal bir reaksiyon başlatır. Bu reaksiyon hammaddelerdeki silika ve alüminayı çözerek betonda bağlayıcı faz olarak işlev gören polimerik bir jel oluşturur (Phoongernkham 2015; Kantarcı 2019). Alkali aktivatör mevcut olduğunda, hammaddelerdeki reaktif bileşenler çözülür ve daha kolay polimerize olur. Taneleri bağlayan ve betona sağlam yapısını veren

geopolimer jel, gelişmesi için gerekli koşulları sağlar. Alkali aktivatör bileşenlerinin türü, miktarı ve oranı bitmiş geopolimer beton ürünün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bunlar betonun işlenebilirliğini, dayanım gelişimini, priz süresini ve dayanıklılığını etkileyebilir. İstenen performans özelliklerini elde etmek için bu parametreleri ayarlamak çok önemlidir. Alkali aktivatör, geopolimer beton karışımının reolojik özelliklerini etkiler. Mühendisler ve beton uzmanları, aktivatörün türünü ve konsantrasyonunu değiştirerek, daha iyi yerleştirme ve sıkıştırmayı kolaylaştırmak için karışımın işlenebilirliğini ve akışkanlığını düzenleyebilirler. Geopolimer betonun uzun vadeli dayanıklılığı uygun aktivasyona bağlıdır. Geopolimer jelin uygun şekilde bağlanması ve kimyasal stabilitesi, korozyona, kimyasal saldırıya ve diğer çevresel değişkenlere karşı direnci artıran iyi aktive edilmiş bir karışımla sağlanır (Nagaraj . et al. 2018; Hadi et al. 2017; Hadi et al. 2019).

Poroziteli bir yapıya sahip hafif bir volkanik kaya olan pomza, geopolimer betonda ince agregaların kısmi ikamesi olarak kullanılabilir. Köpüğe benzeyen magmatik kayaya pomza denir ve şiddetli volkanik patlamalarla oluşur. Bir yanardağın yüksek derecede ısıtılmış, basınçlı kayayı hızla püskürtmesiyle üretilir (Kabay, vd. 2021; Asayesh et al. 2021; Top et al. 2020; Wongs a et al. 2018). Pomza, karakteristik poroziteli dokusunu kayanın hızlı soğuması ve basınçsızlaşması sırasında oluşan kabarcıklardan alır. Pomza açık bir renge sahiptir ve yüksek poroziteliliği nedeniyle su üzerinde yüzer. Kesecik duvarlarının daha ince ve daha az yoğun olması nedeniyle skorya adı verilen başka bir volkanik kayadan farklıdır (Yadollahi et al. 2015). Pomza agrega olarak, hafif betonda, temizlik ve cilalama bileşiklerinde aşındırıcı olarak ve peyzajda kullanılır. Tüm dünyada karada ve okyanusta bulunur. Pomzanın geopolimer betona eklenmesi, mekanik özelliklerini korurken betonun yoğunluğunda bir azalmaya yol açar (Montaño et al. 2017; González et al. 2017). Pomza, bir dolgu maddesi olarak kullanıldığında kullanılan bağlayıcı miktarını azaltır ve beton karışımının işlenebilirliğini artırır. Ayrıca, pomzanın poroziteli yapısı iç kürlenmeyi garanti ederek geopolimer betonun dayanıklılığını ve dayanımını artırır. Geopolimer beton yapımında kullanılabilecek volkanik kayaç türlerinden biri de pomzadır (Occhipinti et al. 2020). Başlangıçta, pomza reaktivitesini artırmak için mekanik olarak çalkalanır. Bu işlemle özgül yüzey alanı artırılarak kireci emme ve geopolimerizasyon sürecinden geçme kapasitesi geliştirilir. Artan basınç dayanımı, pomzanın özgül yüzey alanı ve öğütme süresi ile doğrudan ilişkili olan sonuçtaki geopolimer betonun bir özelliğidir. Pomzanın amorflaşması geopolimerin dayanımını önemli ölçüde artırır. Her şey göz önüne alındığında, pomza geopolimer betonun temel bir bileşeni olarak umut vaat ediyor gibi görünmektedir (Yadollahi, et al. 2015; Mobasheri et al. 2022).

Perlit, geopolimer betonun özelliklerini iyileştirmek için de kullanılabilen yüksek su içeriğine sahip volkanik bir camdır. Betonda ince agrega yerine kullanıldığında perlit, malzemenin kimyasal saldırılara karşı direncini güçlendirir ve geçirgenliği azaltır. Ayrıca perlit, beton karışımının genel işlenebilirliğine katkıda bulunarak yerleştirme ve sıkıştırmayı kolaylaştırır. Geopolimer betona dayanıklılık ve sürdürülebilirlik için perlit eklendiğinde daha sürdürülebilir bir yapı malzemesi haline gelir (Pasupathy et al. 2020; Aziz vd. 2021; Baran vd. 2021). Perlitin hafifliği ve poroziteli yapısı, beton karışımının yoğunluğunu azaltmasını sağlar. İnşaat gibi ağırlığın sorun olduğu durumlarda daha hafif binalar tercih edildiğinden, bu betonu daha hafif hale getirir ve bu da yararlıdır. Perlitin genleşmesiyle oluşan boşluklar betonun yalıtım özelliklerine katkıda bulunur. Bu, örneğin binalarda veya diğer yapılarda sıcaklığı düzenlemek veya enerji kullanımını azaltmak için ısı yalıtımı gerektiğinde kullanılabilir (Hristov et al. 2014; Kioupis et al. 2022; Taxiarchou et al. 2013; Azız vd. 2021). Perlit beton karışımının işlenebilirliğini artırabilir. Düşük ağırlığı ve küresel şekli nedeniyle, karışımın taşınması ve yerleştirilmesi daha kolay olabilir, bu da inşaatı hızlandıracak ve daha az insan gücü gerektirecektir. Geopolimer beton, kütleme işlemi sırasında büzülme azaltmak için perlit ilavesinden faydalanabilir. Perlitin poroziteli yapısı sayesinde betonun genel büzülmesi azaltılabilir ve malzemenin çatlaklara karşı direnci güçlendirilebilir. Perlitin doğal özellikleri betonu yangına karşı daha dayanıklı hale getirir. Genişletilmiş perlit, betonda onu aşırı ısıdan koruyabilecek ve yangın direncini artıracak boşluklar oluşturur (Ariyaratne et al. 2022; Mohabbi 2019; Sokołowska 2015; Lahoti et al. 2019).

Araştırmanın Önemi

Bu çalışmanın amacı, özellikle farklı oranlarda bazalt lif, genleştirilmiş perlit ve pomza katkılarının yanı sıra değişen sodyum silikat sodyum hidroksit ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) oranlarının etkisine odaklanarak, yüksek sıcaklık koşulları altında geopolimer betonun mikro yapısını, fiziko-mekanik özelliklerini, basınç ve eğilme dayanımlarını değerlendirmektir. Üç farklı sodyum silikat sodyum hidroksit ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) oranı ve üç farklı bazalt lif oranı içeren metakaolin ve cüruf bazlı geopolimer betonun 8 saatlik kısa süreli kür ve 28 günlük kür sonrası sonuçları deneysel olarak incelenmiştir. Dokuzu öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), metakaolin (MK) ve genleştirilmiş perlit, diğer dokuzu ise ÖYFC, MK ve pomza içeren on sekiz karışım oluşturulmuştur. Üç farklı sodyum silikat sodyum hidroksit ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) oranı (2, 2.5 ve 3) ve üç farklı bazalt lif oranı (%0, %1 ve %2) içeren numuneler 75 °C'de 8 saat kürlenmiştir. Ayrıca, 150 °C, 300 °C ve 600 °C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerin ağırlık kaybı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı incelenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Geopolimer Tarihçesi

1950’li yıllarda Avrupa’nın doğu bölgesinde 2. Dünya Savaşı’ndan sonra Normal Portland Çimentosunun çevreye olumsuz etkilerinin sonucunda Glukhovsky ve ark. alüminyum ile silisyum içerikli malzemelerin alkali aktivatörlerle tepkimesi ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmaların sonucunda elde ettikleri malzemelerin yüksek dayanıma sahip olduklarını görmüşlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda güncel, temel ve etkili metotlar sayesinde bilimsel araştırmaların ileriye dönük yapılmasına olanak sağlayan adımlar atılmasını sağlamışlardır. Metakaolin geopolimer betona 1970’li yıllarda Davidovits tarafından eklenerek alümina silikatların silikat ve alkali hidroksit çözeltileri ile tepkimesini incelemiştir (Duxon et al. 2008).

Ukrayna asıllı bilim adamı Glukhovsk 1940-1950’li yıllarda inorganik malzemelerin ilk incelemesini ve çalışmasını yapmıştır. Glukhovsky tarafından yapılan çalışmalarda yüksek kalsiyumlu cürufklar ve alkali çözeltileri karıştırarak ürettiği dayanımı yüksek betonu bina yapımında kullanmıştır. Glukhovsky geopolimer kompozitleri genel olarak alkali aktifleştirilmiş çimentolar olarak adlandırmıştır. Purdon 1940’lı senelerde ise geopolimer çalışmalarına daha fazla katkı sağlamıştır. (Duxson et al. 2005).

Geopolimer kelimesi ilk defa 1979 yılında Fransız bilim adamı Davidovits tarafından dile getirilmiştir. (Davidovits 1989). Davidovits geopolimer bağlayıcıların sınıflandırılmasını yaparak tanımlamıştır. Geopolimerin geçmiş zamanlarda Mısır’daki piramitlerin yapımında kullanıldığını yaptığı bilimsel çalışmalarda ortaya koymuştur. Piramitlerin yapımı için önemli olan kalker taşlarının üretiminde boksit gibi alüminli bileşenler içeren Nil’deki toprağın sodyum karbonatla karıştırılarak beton üretilebileceğini söylemiştir. Davidovits üretilen bu betonun geopolimer beton olduğunu ve günümüzde de bu betonun kullanılabileceğine yaptığı çalışmalarında yer vermiştir. Davidovits geopolimer betonun mühendislik alanındaki çalışmalarda da kullanılabileceğini göstermiştir. (Davidovits 1989). Normal Portland çimentosunun yerine geçebilecek olan geopolimer beton geçmişte yapılan önemli tarihi anıtsal yapıtlarda ve özellikle de kireçtaşının yeniliklerde kullanılmaya başlanması ile birlikte bilinen eski Roma uygarlığından beri kullanılmıştır (Davidovits 2015).

Geopolimer Beton Tanımı

'Geopolimer' kelimesi, konsantre sulu silikat, katı alümina silikat veya konsantre sulu alkali hidroksit ile katı alümina silikat arasındaki reaksiyon yoluyla oluşan sentetik alkali alümina silikatı ifade eder (Duxson et al. 2007).

Davidovits tarafından İlk defa 1979 yılında ortaya atılan geopolimer terimi aslında alümina silikat içerikli malzemelerin alkali silikatlarla aktifleştirilmesi ile oluşan alkali alümina silikat bağlayıcı malzemeler olarak tanımlanmıştır (Boyacı 2018).

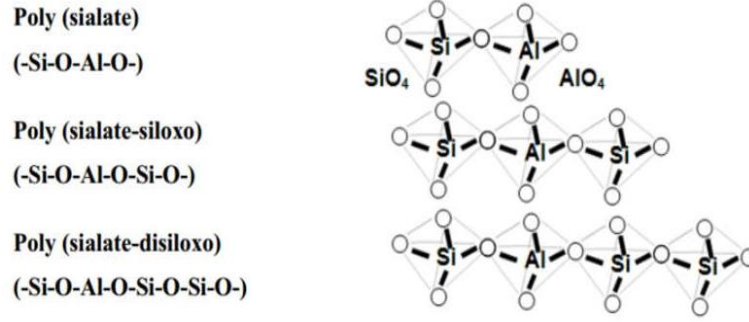
Davidovits tarafından geliştirilmesinden beri bu malzemeler için farklı isimler de kullanılmıştır. Alkali aktifleştirilmiş çimentolar, düşük sıcaklığa sahip alümino silikatlar, alkali bağlı seramikler, hidroseramik ve inorganik polimer betonlar en çok kullanılan isimlerdendir (Yonar 2014).

Geopolimer beton, asitli bir aktivatör tarafından aktive edilen alüminat ve silikat malzemelerden oluşur. Kararlı yapıya sahip geopolimerlerin üretimi, kaynak malzemenin yeterli reaktif camsı içeriğe, düşük su ihtiyacına sahip olması ve kolaylıkla alüminyum salabilmesidir (Yonar 2014). Geopolimer kompozit malzemeler, alkali silikat çözeltilerin aktivasyonundaki veya öğütülmüş yüksek fırın cürufunun, uçucu külün ve metakaolin gibi endüstriyel atıkların sodyum-silikat polimerin oluşturduğu ürünlerdir (Davidovits 2008).

Geopolimer Kimyası

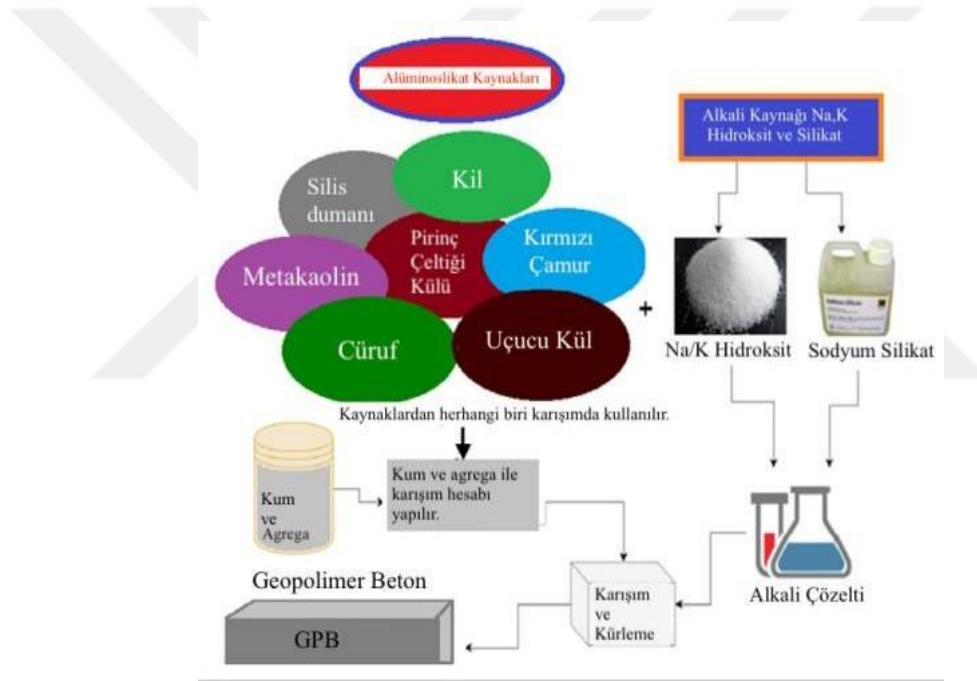
Geopolimerlerin kimyasal oluşum süreci alkali çözeltilerin olduğu ortamda Si-O-Al ve Si-O-Si gibi kovalent bağların polimerleşmeye başlaması ile devam eder. Geopolimerizasyon teknolojisinde kaolin ve endüstriyel katı atıkların (Uçucu Kil, Yüksek Fırın Cüruf, Maden Atıkları vb.) gibi alüminosilikat yapı malzemeleri katı hammadde olarak kullanılmaktadır. Alüminosilikat bazlı kaynakların reaktiflikleri bu malzemelerin kimyasal mineralojik kompozisyonlarına, yapılarına, morfolojilerine, inceliklerine ve camsı faz içeriklerine bağlıdır. Kaynak malzemelerinin yeterli reaktif camsı yapıya ve amorf olmaları geopolimer için ana kriterdir. (Singh et al. 2015)

Geopolimerizasyon, alüminosilikat oksitlerin amorf veya yarı kristal olan üç boyutlu siliko-alüminat yapıları olan polimerik Si-O-Al bağları üretmek için Şekil 1'de kimyasal yapı türleri verilen, alkali poli-silikatlarla yaptığı kimyasal reaksiyonudur. Davidovits, çalışmasında geopolimerizasyonun yapı taşlarını açıklamak için Poli (Sialite) (-Si-O-Al-O-), Poli (Sialat-Silokso) (-Si-O-Al-O-Si-O-) ve Poli (Sialate-Disiloxo) (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) olarak üç ana model tanımlamıştır (Davidovits 1991).



Şekil 1. Polisialatların kimyasal yapı türleri (Davidovits 1989, 1991)

Silikat ve alüminatın çözünmesini ve polimerizasyon reaksiyonunu içerisinde barındıran işleme geopolimerizasyon işlemi denir. Süreç Şekil 2’de gösterilmiştir. Geopolimerizasyon ekzotermik bir işlemdir. Çözünme, yeniden yönlendirme ve katılaşma gibi aşamalardan oluşur (Sing ve Middendorf 2020).



Şekil 2. Geopolimer prosesi (Sing ve Middendorf, 2020)

Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)

Roma dönemi yapılarına ait yapılan bilimsel araştırmalara göre cürufların o dönemde kullanıldığı bilinmektedir. İngiltere’de 1813’te modern yolların yapımında cüruf kullanılmıştır. 1880’li yıllarda ise Avrupa ve Amerika’da yol kaplama çalışmalarında da cüruf kullanılmıştır (Germany 2016.).

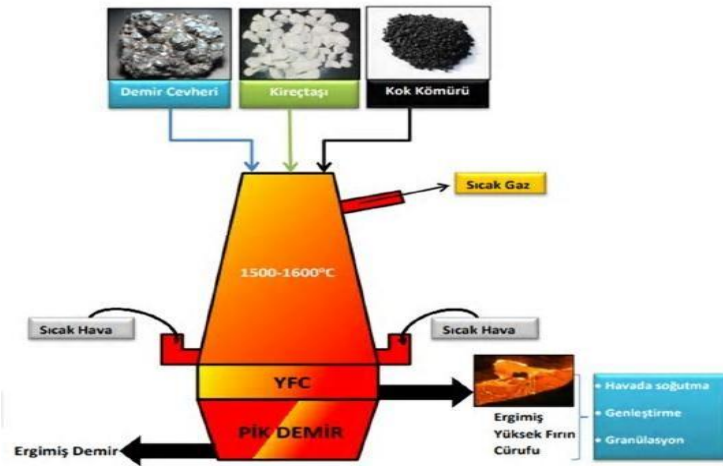
1862 yılında Alman bilim adamı tarafından YFC granüle hale getirilmesiyle YFC ile ilgili ilk çalışmalara başlanmıştır. 1865 yılında Almanya’da bir fabrikada ilk YFC’li çimento üretilmiştir. Ticari amaçla Cürufllu üretilen çimentolar ilk kez 1892’de Almanya’da, 1896’da ise ABD’de üretilmeye başlanmıştır. 1889’da Paris’te bir yeraltı metrosu yapımı için YFC’li

çimento kullanılmıştır. 1950’li yıllarında YFC betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaya başlanıldı (Uğurlu 2020).

“Thurament” adı ile Almanya’da cüruf satışları yapılmış ve Almanlar bazı baraj inşaatlarında ve çok fazla yapıda cüruf kullanmışlardır (Şahin 2007).

Yüksek fırın cürufunun bağlayıcı özelliğinin olduğu 19. yüzyılın ikinci yarısında keşfedilmiş ve cüruf ilaveli bağlayıcıların ticari amaçlarla üretimine başlanmıştır. Yüksek fırın cürufu Portland çimentosuna 1883’te hammadde 1892’de ise mineral katkı olarak eklenmiştir. Günümüzde yüksek fırın cürufu pek çok ülkede çimento üretiminde kullanılmaktadır (Tokyay ve Erdoğan 2011).

Yüksek fırın cürufunun, çimento ve beton teknolojisine önemli katkıların anlaşılmasından sonra aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek fırın cürufu doğal yollarla oluşmayan yapay puzolanlar sınıfında yer almaktadır. Demir çelik tesislerindeki fırınlarda kok, kireç ve demir filizi gibi maddelerin 1500-1600 °C sıcaklığa maruz kalarak demir üretimi sonrasında ergimiş halde ortaya çıkan atık maddeye yüksek fırın cürufu denir. Yüksek fırın cürufu ana ürünün tipine ve üretimin yöntemine göre farklı özelliklerde ortaya çıkabilmektedir (Erdoğan ve Kurbetci 2003). Şekil 3’te yüksek fırın cürufu üretim evreleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Yüksek fırın cürufu üretim aşamaları (Erdoğan ve Kurbetci 2003)

Yüksek fırın cürufunun soğutulma işlemleri

Havada soğutma

Yüksek fırın cürufu havada soğutma yönteminde atmosfer koşullarında kademeli soğutulursa mineralojik olarak büyük kristalli yapıya sahip yapay puzolan bir malzeme oluşur. Yapay puzolan olan bu maddelerin camsı fazı düşük olduğundan kırılarak beton veya asfalt için agrega olarak yada yollarda stabilize malzemesi olarak kullanılabilir.

Genleştirme

Kademeli olarak su, basınçlı hava ve buharın etkisi altında soğutulduğu zaman yüksek fırın cürufu poroziteli yapıda, iri kristal taneli bir malzemeye dönüşür. Bu malzeme hafifliğinden ötürü hafif betonların üretiminde kullanılır.

Granülasyon

Genleştirmede kullanılan sudan, daha fazla suyun kullanıldığı hızlı soğutma işleminde kum gibi amorf (camsı) yapıda, hidrolik özelliğı olan granüle bir malzemenin değirmende öğütülmesi sonucu öğütölmüş yüksek fırın cürufu oluşur. 1000 kg granüle yüksek fırın cürufunun elde edilmesi için 10000 litre suyun kullanıldığı bu yöntemin en verimli yol olmasının yanında ekonomi değeri yoktur. Son zamanlarda bu ekonomik olmayan suyun kullanılmasının yerine peletleme yöntemi daha avantajlı kılmaktadır. Peletleme sonucu elde edilen malzemeden 4 mm'den ufak olan belirli kısımları camsı yapıdadır. Bu camsı yapılar öğütölerek granüle yüksek fırın cürufu elde edilir.



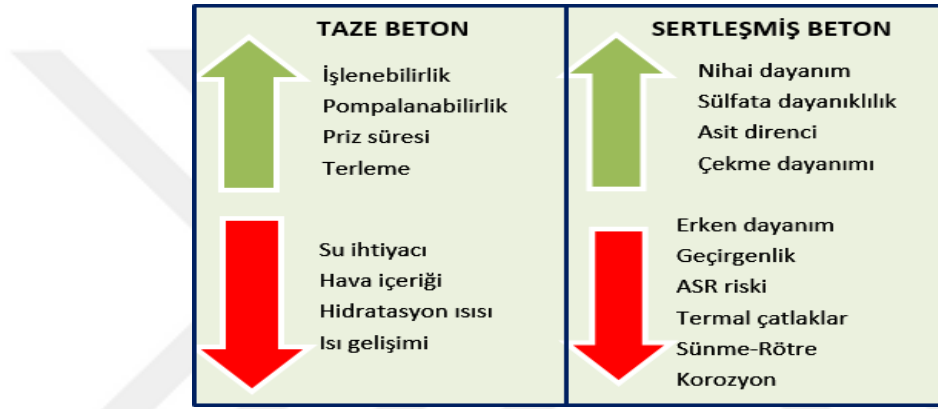
Şekil 4. Soğutma tipine göre yüksek fırın cürufları (Anonim a 2024)

Yüksek fırın cürufunun depolanması ve imha edilmesinin zorluğundan çevre kirliliğinde büyük sorunların oluşmasına neden olabilir. Bu sorunun ortadan kaldırılması gerekmektedir. İnşaat sektöründeki kaynak kullanımı ve maliyetleri ele alındığında dünya ekonomisinde büyük pay sahibi olduğu görülür. Bu yüzden yüksek fırın cürufunun beton sektöründe kullanılması ekonominin sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Yüksek fırın cürufunun betondaki kullanımın uygunluğunu belirlemek için pek çok laboratuvar çalışması yapılmıştır. Öğütölmüş yüksek fırın cürufu beton ile birlikte kullanıldığında çimento hamurunda daha az boşluklar elde edilmesine ve betondaki kalıcılığının daha fazla artmasına yardımcı olur (Şahin vd. 2011).

Yüksek fırın cürufunun faydaları

Yüksek fırın cürufunun üretiminde çimento üretiminden daha az CO₂ salınımının olması, bir endüstriyel yan atık ürünü olduğu için enerjinin olabildiğince az kullanımının ve çevreye olan olumsuz etkilerinin önüne geçmesinin yanında yapısındaki silis, kalsiyum, alümina silis gibi dayanıma etkisi olan yapıların bulundurulması, hidrasyon sırasında oluşan C-S-H gibi jellerin dayanıma etkisi olan yapı oluşturmalarından dolayı dayanıklı yapılar oluşmasına önemli derecede katkısı oluşur (Zichao ve Tarun 2002).

YFC'nin betonda mineral katkı olarak kullanımı; ekonomik ve ekolojik faydalarının yanında betonun durabilitesinin gelişmesine de önemli etkilere sahiptir. YFC'nin taze ve sertleşmiş beton üzerindeki etkileri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Yüksek fırın cürufunun betona etkileri (Uğurlu 2020)

Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısından dolayı erken yaş dayanımı düşüktür. Ancak betonun nihai dayanımını önemli derecede artırmaktadır. Yüksek fırın cürufu çok ince yapıda olduğundan betondaki işlenebilmeyi artırır, su geçirimsizliğini azaltıcı etkisi vardır. Yüksek fırın cürufunda çimentodaki gibi reaksiyonu hızlandıran ve ısı açığa çıkaran C3A fazı olmadığı için terlemeyi ve hidrasyon sonucu oluşan ıslığı azaltarak priz süresini geciktirir. Bu özelliklerinin yanında yüksek fırın cürufu betonlardaki klorür geçirgenliği, sülfat direnci, donatı paslanması gibi çevresel etkiler üzerinde de olumlu etkileşimleri de vardır (Emiroğlu vd. 2011). Şekil 6'da Yüksek fırın cürufunun kullanım yerleri gösterilmiştir.

Kütle Betonları	Deniz Yapıları	Sanat Yapıları
Barajlar Büyük temeller HES	Kıyı ve liman yapıları Açık deniz yapıları	Köprüler Tüneller
Kimyasal Tesisler	Altyapı	Yollar
Nükleer tesisler Biyolojik tesisler Kimyasal tesisler Depolar Arıtma tesisleri	Kanalizasyon boruları Menfezler Kuyular Fore kazıklar Sulama kanalları Zemin enjeksiyonları	Otoyollar Endüstriyel zeminler Havaalanı pistleri Köprü yolları

Şekil 6. Yüksek fırın cürufu kullanım yerleri (Uğurlu 2020)

Metakaolin

Metakaolinin puzolan amaçlı olarak çimentodaki kullanımına ilk olarak 1960'lı yıllarda rastlanır. 1990'lardan günümüze ise metakaolinin dayanımının yüksek olması ile dayanıklılık özelliklerinin iyi olmasından ötürü beton üretiminde kullanımı yaygınlık göstermiştir. (Yonar 2014).

Metakaolin, kaolin kilinin saflaştırılması ile yüksek sıcaklık altında kalsinasyon ile elde edilen ak renkli, puzolanik niteliği yüksek olan bağlayıcı bir alüminosilikat yapı malzemesidir. Kaolin kili 100 ile 200 °C'ler arasında bünyesinde barındırdığı bağlı suyunu kaybeder. Kaolin kilinin bağlı sularını yitirdiği sıcaklık aralıkları 500 ile 800 °C düzeyindedir. Bu sıcaklıkta kaolin kili bünyesinde barındırdığı suyun yaklaşık %10 ile 14'ünü yitirir ve metakaoline dönüşümü sağlanır. Dönüşümü sağlanmış olan kaolin kilinin alümina ve silika katmanları, kristal yapısındaki dizilişini yitirir. Bunun sonucunda kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı elde edilir. Etkili ve verimli bir ısı verildiği durumda artırılmış oranda puzolanik niteliğe sahip amorf fazlı metakaolin ortaya çıkar (Yonar 2014).

Davidovits yaptığı çalışmalarda geopolimerlerin elde edilmesinde ana bileşik olarak birden fazla puzolanik malzemeyi deneylerinde kullanmış, ancak çıkan sonuçlara göre, metakolin-cüruf esaslı geopolimer kompozitlerin çevreye olumsuz etkisi olmaması ile birlikte kabul edilebilecek mekanik ve dayanıklılık yönünden en iyi üretilen kompozitler olarak kabul edilmiştir (Aygörmez 2018).

Pomza

Açık renk tonlu, hafifimsi ve silisyum açısından zengin içerikli volkanik bir kayaç çeşidi olan pomza, magmanın volkanik çıkımlar esnasında hızlı soğumasına ve basıncın hızlı inmesine bağlı olarak bünyesindeki çözünmüş gazların ve suyun eriyikten çabucak uzaklaşması pomzaya poroziteli bir özellik kazandırır.

Volkanın çıkıntıların şiddeti ve pomzanın porozitelilik kademesi magmadaki çözünmüş gaz miktarı ile artarken, çıkıntı sonucu oluşan küçük ebatlı olanlar pümisit büyük ebatlı olanları ise pomza ismini almaktadır (Presley 2006).

Pomza taşının farklı PH düzeylerinde asidik ve bazik pomza olmak üzere iki türü vardır. İnşaat sektöründe genellikle asidik pomza seçilmektedir. Asidik pomza açık renk tonlu, bazik pomza ise koyu renk tonludur. Pomzanın yapısında yüksek miktarda silisyum bulunurken ayrıca demir, alüminyum, kalsiyum, potasyum gibi çeşitli elementler de bulunmaktadır. Pomza aynı zamanda çok küçük miktarlarda da olsa bile kükürt ve titanyum gibi elementleri de bünyesinde barındırmaktadır. Özellikle jeoloji biliminde kullanılan Mohs sertlik cetvelinde pomzanın sertliğinin 5 ile 6 mohs arasında, özkütlesinin ise $0,5 \text{ g/cm}^3$ ile 2 g/cm^3 arasındadır. Şekil 7’de asidik ve bazik pomza gösterilmektedir. (MTA 2020).



a



b

Şekil 7. a) asidik pomza b) bazik pomza (Anonim b, 2024)

Pomza, geçirgen yapısı, hafif olması, güçlü yalıtım etkisi ile atmosferik şartlara karşı direnci ve yüksek puzolanik aktivitesi nedeniyle, eski medeniyetler tarafından asırlar önce kullanılan en eski ve önemli yapı malzemeleri arasında yerini alır. Eski Yunan ve Roma antik dönemlerinde pomza, birden çok sanat yapılarında sıkça kullanılan yapı malzemesi olmuştur. Eski yapılar günümüzde de halen varlığını korumaktadırlar. Teknolojik nitelikleri ve birden fazla hammadde çeşidine göre farklı olumlu yanları olan pomza taşı giderek yaygın bir eğilimle, farklı sanayi alanlarında kullanılmaktadır (Tolğay vd. 2004). Hafif yapı malzemelerinin kullanımının yaygınlaşması ile beraber pomzanın mükemmel ısı yalıtımı, iklimlendirme özelliği, sıvanın kolayca tutması, akustik ses yalıtım özelliği, deprem yükü karşısında elastik özelliği alternatiflerine göre daha ucuz olması gibi önemli özellikleri ile inşaatта geniş bir kullanım ağı vardır. Pomza, sadece inşaatта kullanılmadığı gibi tarımda, kimyada, tekstilde, sanayide de çok değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Fakat pomzanın

kullanım aşamaları ile özellikleri, sanayi alanlarında tatbiki ile ülkemizdeki pomza ile ilgilenen kuruluşlar tarafından deneysel inceleme ve araştırmalar istenen düzeye ulaştırılamamıştır. Pomzaya gerekli önemin verilerek üzerinde incelemeler yapılması ve ülkemizdeki rezervleride göz önüne alırsak kullanım alanlarının geliştirilmesiyle beraber ülke ekonomisine önemli katkıları sunacağı kaçınılmazdır. (Tolğay vd. 2004).

Pomza'nın kullanım alanları

İnşaat sektöründe pomza kullanımı

Pomza inşaat sektöründe günden güne kullanımı yaygınlaşan önemli bir yapı malzemesi olarak adından söz ettirmektedir. İnşaat sektöründe bimsbloklar önemli bir yere sahiptir. Bimsblok hafifliği ile bina üzerindeki ölü yüklerin taşıyıcı elemanlara daha az aktarılmasını sağlayan en önemli özelliğidir. Ayrıca mükemmel ısı ve ses yalıtımıyla daha az enerji ve gürültülü çevrede örneğin; havaalanları, otoyolların bulunduğu yerlerde mükemmel ses yalıtımı sağlar. Beton üretiminde kum yerine pomzanın kullanımı ile betondaki ağırlığın azalmasıyla temele iletilen yükün azalmasından dolayı inşaat demirinin daha az kullanılmasına olanak sağlar. Beton yerleştirme işlemlerinde zamandan tasarruf sağlaması da diğer bir avantajıdır. Hazır sıva ve harçların üretimi, prefabrik yapıların üretimi, çatı ve dekoratif kaplamaların üretimi diğer kullanım alanlarındandır.

Tekstil sektöründe pomzanın kullanımı

Tekstil sektöründe pomza genel olarak kot taşlama, kumaşlarda renk açıcı olarak ve kumaşların yumuşatılması işlemlerinde sıkça kullanılır.

Tarım endüstrisinde pomza kullanımı

Pomzanın yüksek su tutma kapasitesi, bünyesindeki suyu uzun süre muhafaza etmesi ve ortama vererek bulunduğu ortamı sürekli nemli tutması tarım sektöründeki kullanımının yaygınlaşmasına neden olmaktadır. Sıcak iklimlerde pomza toprağa belirli mesafelerde ve kalınlıkta serilerek yine toprak altından su verilmesiyle bitki köklerinin ihtiyacı olan suyu rahatça almaları gerekmektedir. Ayrıca verimsiz topraklarda ve topraksız bitki yetiştirmek içinde kullanılmaktadır.

Kimya ve diğer endüstri alanlarında kullanımı

Pomza kimya ve diğer endüstri alanlarında yaygın olarak; yiyeceklerin sağlıklı ve hijyenik ortamlarda korunmasına yönelik yapılan kapların üretiminde, gübre üretiminde gübrenin topaklaşmasını önlemek amacıyla, temizlik ve deterjan üretiminde katkı maddesi

olarak, diş macunlarında ve diş laboratuvarlarında dişleri parlatmak amacıyla ve daha birçok alanda kullanılmaktadır

(Anonim c 2024).

Pomzanın lkemizdeki önemli rezerv alanları şekil 8’de gösterilmektedir.



şekil 8. Türkiyedeki önemli pomza yatakları (Anonim d 2024)

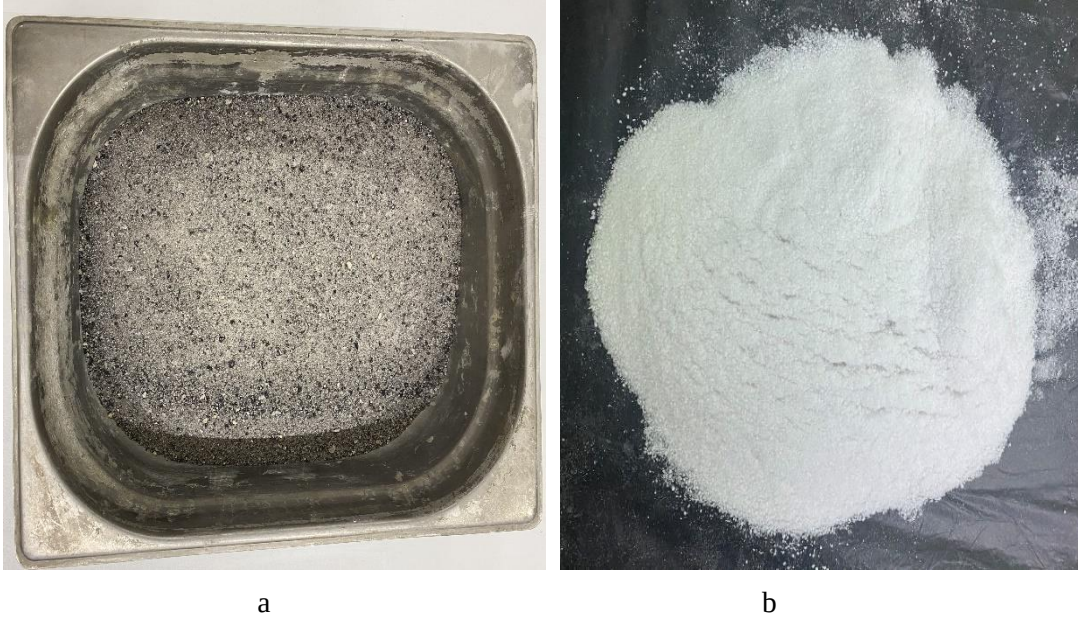
Tablo 1. Türkiyedeki Pomza Rezervleri

Yeri	Rezerv Miktarı (m ³)
Nevşehir, avanos, Ürgüp bölgesi	400.412.834
Derinkuyu bölgesi	48.660.500
Kayseri-Gömeç bölgesi	13.250.000
Kayseri-Talas-Tomarza bölgesi	525.000.000
Bitlis-Tatvan bölgesi	1.100.000.000
Bitlis-Ahlat bölgesi	210.000.000
Van-Erciş-Kocapınar bölgesi	154.625.000
Van-Mollakasım bölgesi	5.950.000
Ağrı-Patnos bölgesi	27.812.000
Ağrı-Doğubeyazıt bölgesi	26.875.000

(Anonim e 2024)

Genleştirilmiş Perlit

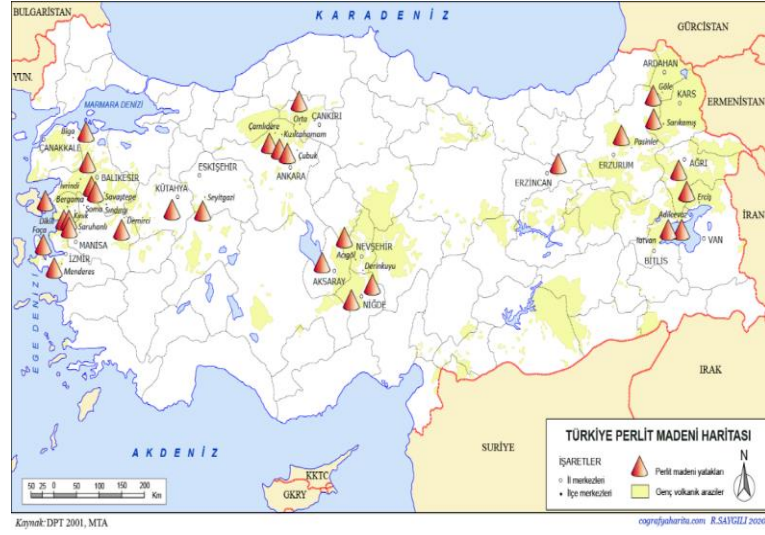
Perlit, asidik karakteristiğliğ ile volkanik zelliğliğ olan camsı madde olarak tanımlanmaktadır. Isı verildiğinde açılma karakteristiğliğ olan perlit ısı etkisi altında poroziteli bir hale geçmeye meyillidir. Perlit, ham perlit ve genleştirilmiş perlit olarak iki sınıfta görünmektedir. Yapısı ve rengi bakımından perlitler farklı özellikler gösterebilmektedir. Ham perlitin rengi açık gri-siyah tonlarında iken genleştirilmiş perlitin rengi tamamen atır. Perlit camsı silika yapısında %2 ile 5 aralığında su içermektedir. (Anonim f 2024)



Şekil 9. (a) Ham perlit (b) Genleştirilmiş perlit

Perlit sözcüğü Fransızcada inci'de denen perle sözcüğünden gelmektedir. Perlitin yapısı volkanik bir camı madde olan asitlik özelliğindeki bir yapıya sahiptir. Perlit 750°C ile 1200°C referans arasında ısıya maruz kaldığında hacmi 20 katına kadar genişlebilmektedir. Bu genişleme sonucunda meydana gelen poroziteli ve hafif malzemeye genleştirilmiş perlit adı verilmiştir. Saydam gri renk tonunda oluşan perlit kayacı parlak siyaha kadar değişebilen geniş bir renk skalasına sahip olabilmektedir. Ancak ısıyla genleştirildiğinde beyaz renk almaktadır. Yapısında bulunan suyun genişleme sırasında buharlaşmasıyla bünyesindeki suyu kaybeder. Suyun uzaklaşması sırasında perlitte oluşan patlama nedeni ile poroziteliliği artar ve hafif bir yapıya dönüşmektedir. İçeriğinde ağır metalleri ve organik maddeleri içermeyen suda ayrıışmayan perlit bu kimyasal karakteristliği ile istikrarlı bir yapıya sahiptir (Anonim g 2024).

Perlitin esnek olması, yüksek ses yutması, düşük özkütlesi, hafif olması, yanmaz özelliği ve kimyasal istikrarı en bilinen özelliklerinden başlıcalarıdır. Perlit yapı sektöründe; hem ses hem de ısı yalıtım malzemesi olarak, çimentolarda dayanımı artırmak için, sıvaların tutmasını sağlayan malzeme olarak kullanılmaktadır. Poroziteli yapısından dolayı toprağı havalandırmada ve su da çözünmemesinden dolayı suyu toprağıın bünyesinde tutmak amacı ile tarım alanında da perlit sıkça kullanılmaktadır (Azizi 2007).



Şekil 10. Perlit kaynakları
(Anonim h 2024)

Türkiye’de perlit rezervleri aşağıdaki Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Perlit Rezervleri (Kaya 2019)

Bölge	Rezerv	Bölge	Rezerv
Kars,Sarıkamış bölgesi	2.403.000	Ankara,Çubuk bölgesi	51.000
Van,Erciş bölgesi	1.400.000	Ankara,Kızılcahamam ,Güvem bölgesi	31.500
Bitlis,Adilcevaz ve Tatvan bölgesi	940.000	Balıkesir,Savaştepe bölgesi	26.000
Nevşehir,Derinkuyu,Acıgöl bölgesi	800.000	Balıkesir,Sındırgı bölgesi	21.206
Erzurum,Pasinler bölgesi	386.824	Manisa,Saruhanlı bölgesi	17.700
Çankırı,Orta,Kalfat bölgesi	128.200	Kütahya,Avdan bölgesi	11.500
İzmir,Bergama,Cumaovası-Foça bölgesi	88.000	Ankara,Kızılcahamam , Çankoru bölgesi	8.000
Erzincan,Mollatepe bölgesi	71.500	Ankara,Kızılcahamam Korkmazlar bölgesi	3.700
Toplam kaynak	6.388.130 ton		

Perlit kullanım alanları

İnşaat

Perlitin en yaygın kullanım alanlarından biride inşaat sektörüdür. Özellikle geliştirilmiş perlit son yıllarda inşaat sektöründe kullanılması yaygınlığı artmıştır. Geliştirilmiş perlitin inşaattaki kullanım alanı Tablo 3'te verilmiştir (Anonim 1 2024).

Tablo 3. Geliştirilmiş Perlitin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları (Anonim 1 2024)

Kullanım Alanları	Kullanım Yerleri
Yalıtım Malzemelerinde	Çatı ve zemin işlerinde
Perlitli Sıvalarda	Yapı işlerinde
Perlitli Hafif Betonda	bağlayıcı madde olarak
Perlitli Hafif Yapı malzemelerinde	Çatı kiremitleri, boru izolasyonları vs.
Seyrek Dolgu ürünlerinde	Zemin, duvar boşlukları ve tavan aralarında köpük yalıtım malzemesi
Yüzey Döşemelerinde	Isı ve ses yalıtım malzemesi
Özel Amaçlı olarak	Çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan perlit betonlarında

Tarım

Perlit topraktaki fiziki yapıyı arttıran “substrat” olarak, topraktaki şartların istenen seviyeye gelmesini sağlayan, topraktaki sertliğin artmasının yanı sıra, suyun süzülmesini azaltarak toprağı nemli hale getirmek, fidelerin gelişim ortamını oluşturmak ve toprağın havalanmasını sağlamak için; tarımda, çimli spor sahalarında, bahçe işlerinde çoğunlukla yararlanılmaktadır (Anonim 1 2024).

Sanayi

Sanayi endüstrisinde perlitin, kimyasal özelliğinin nötr olmasından dolayı gıda, farmakoloji ve diğer kimyasal maddelerin imalatında süzme yardımcı maddesi olarak değerlendirilmektedir. Geliştirilmiş perlitin endüstrideki kullanım alanları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Geliştirilmiş Perlitin Endüstride Kullanım Alanları (Anonim 1 2024)

Kullanım Alanları	Kullanım Yerleri
Gıda, İlaç ve Kimya Sanayi sektörleri	Gıda endüstrisinde; yağlarda, meyve sularının süzülme işleminde İlaç endüstrisinde antibiyotiklerin süzülme işleminde, sitrik asit, fosforik asit süzülmede, soda külü erimişlerinin, sülfürik asit, uranyum şerbeti filtreleme işleminde

Tablo 4. (devamı)

İlaç ve endsütrisinde ürün olarak	Kimya Dolgu	Atık yağların, içme sularının temizleme işleminde Her türlü ilaçların üretiminde dinamitlerin imalatında, gübre üretiminde, , kozmetik endüstrisinde
Sanayide Isı Yalıtım Olarak		Soğuk hava deposunun ısı yalıtım işinde, sıvı hale getirilmiş gazın tank içerisindeki ısı yalıtımı için
Seramik ve endsütrisinde	Cam	Katkı maddesi olarak
Metalürjide		Döküm yapılacak kumlarda ilave madde, potada erimişi halde bulunan metalin güvende olmasında, demir çelik endüstrisinde erimişi metalin cüruf denetiminde, demirin dövme işleminde veya sıcak metalin haddeleme işleminde ısıyı korumada, perlitli yalıtıcı ürünlerin imalatında

Diğer alanlardaki uygulamalar

- 1) Çimentolamadaki işlenebilirliği kolaylaştırmak için katkı maddesi olarak ve sondajlama işlemlerinde
- 2) Gemi altını kaplamada bılar olarak ve yalıtımı işlerinde
- 3) Denizlerde gemilerin sızan petrol ve yağların temizlenmesinde
- 4) Açık su kanallarında göletlerde buharlaşmanın neden olduğu su kayıplarında
- 5) Köpük ve plakaların karışımında dolgu işlemi ve katkı malzemesi olarak
- 6) Plastik mobilyaların ağırlığını azaltmada ve ekonomik olmasında
- 7) Çelik yapılarda yangın çıkışını önlemek içi yalıtım malzemesi olarak kullanılır (Anonim ı 2024).

Alkali Aktivatörler

Çimentonun üretiminde atmosfere salınan CO_2 miktarını düşürmek, dolayısıyla CO_2 kaynaklı çevre etkisini en aza indirmek için çimentoya gerek duymadan veya mümkün olduğu kadar en az seviyede çimento tüketerek beton üretimi yapılabilinmelidir. Çimentonun betona kazandırdığı en önemli özellik olan bağlayıcılığı elde etmek için alternatif bağlayıcı malzemeler tercih edilmelidir. Endüstriyel atıklardan uçucu kül, YFC gibi mineral katkı maddeleri bağlayıcılık özelliği olan puzolanlardır. Bu puzolanik maddelerin betonda tek başlarına kullanılması bağlayıcılık özelliklerinin ortaya çıkarmaz. Bu malzemelerin bağlayıcılık özelliği için alkali aktivatörler kullanılarak faydalanılır.

Puzolanların yapısında olan SiO_2 ile Al_2O_3 alkalilerle aktifleştirildiğinde betonda bağlayıcılık özellikleri ortaya çıkar. Aktive edilmesi için ise sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) en çok kullanılan alkali aktivatörlerdendir. (Palomo et al. 1999)

Alkali aktivatörlerin kullanılması sonucu puzolanlar ile bağlayıcılık özelliği kazanan betonlar incelendiğinde, çimento ile bağlayıcılık kazanan betonlara göre erken yaş ve nihai basınç dayanımları daha yüksektir. Aynı zamanda bu betonlar ile oluşan hidrasyon ısıları daha az ve kimyasal maddelere karşı daha dirençli duruma gelirler. Fakat bu betonların ani prize uğraması ile yapılarında mikro yapıda çatlakların izlenmesi, çiçeklenme ve yüksek buruşma oluşur. (Baradan vd. 2012).

Yüksek fırın cürufunun aktivatörlerle tepkimesinden, çimentonun su ile tepkimeye girmesinden meydana gelen ve betona bağlayıcı özelliği kazandıran C-S-H jellerine benzer hidrate kalsiyum silikatlar oluşur. (Aydin 2010)

Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit, diğer ismi kostik sodadır. Baziklik derecesi çok yüksektir. NaOH formülü ile gösterilir. Sodyum hidroksit (NaOH), ak renk tonunda nem tutma özelliği olan bir maddedir. Suda ekzotermik olarak çözünen yumuşak, kaygan ve sabun gibi bir çözelti meydana getirir. Sodyum hidroksit, laboratuvar ortamında CO₂ gibi asitlik derecesi yüksek gazları tutması için faydalanılır. Sodyum hidroksit birden fazla kimyasal maddenin oluşumunda, kağıt üretiminde, tarımda ilaçlama ürünleri, sabun yapımında, kağıt, boya, deterjan sanayi ve petrol rafinerisinde sıklıkla tercih edilir. Ekonomik olması, kolay ve istenilen miktarlarda elde edilebilmesi önemli tercih sebeplerindendir. Geopolimer beton üretiminde alkali aktivatör olarak yaygın şekilde tercih edilmektedir. (Luga 2015).

Çimentonun hidrasyonunda sodyum hidroksit priz hızlandırıcı özelliğiyle katkı maddesi olarak kullanılır. Bunun yanında 7 ile 14 günlük basınç dayanım değerlerinde düşümlere neden olur. Geopolimer beton üretiminde yaygın olarak sodyum hidroksit katı halinin aksine su içerisinde tam ayrılmış halde kullanılır. Ancak ani sıcaklık değişimlerinin önüne geçebilmek için ayrılmamış her sodyum hidroksit tanesinin tamamen ayrıştığından emin olarak ayrıştırılması sağlanmalıdır. Hidratasyonu hızlandırma amacı ile kullanılan en iyi ayrılmış sodyum hidroksit, ılık su kullanılarak ayrışması sağlanmış ve yeteri kadar karıştırılmış olması gerekir.

Çalışmada kullanılan Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri materyal-yöntem bölümünde tablo halinde sunulmuştur. (Shi et al. 2006).

Sodyum silikat (Na₂SiO₃)

Sodyum silikat sıvı, rengi olmayan ve saydam bir maddedir. Katı halde opak berrak ve yeşilin açık rengindedir. Su içerisinde ayrıştığında şuruba benzer bir sıvı meydana getirir. Su

içerisinde ayrışması diğer alkalilere göre düşük seviyede olup, alkole daldırıldığında ayrışma olmaz.

Beton üretiminde sodyum silikat en çok priz hızlandırıcı olarak tercih edilir. Püskürtme betonların en önemli özelliği olan hızlı priz almalarından dolayı sodyum silikat priz hızlandırıcı olarak püskürtme betonlarda priz hızlandırıcı olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Aynı zamanda çimento içerikli malzemelerde önemli bir alkali aktivatör olarakta kullanılır. Hidrate silikat tozlarının oluşumunda ki bilimsel gelişme ile beraber, yapı sektörünün ayrılmış cam uygulamalarında da artış görülmektedir.

Çalışmada kullanılan Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri materyal-yöntem bölümünde tablo halinde sunulmuştur.

Bazalt Lif

Bazalt lif yer kabuğunun yaklaşık 3'te birini oluşturan içerisinde bol miktarda silisyumoksit bulunduran ve ince taneli magmatik bir kayaç türüdür.

Bazalt kayaçlarının erime sıcaklığı 1500-1700 °C'lerdeki sıcaklık değerlerinde erimeye başlar. Yoğunluğu yaklaşık olarak 2.7 gr/cm³'tür.

Bazalt liflerin üretimi bazalt kayacının kırıcı yardımı ile kırılarak yıkanması ile başlar. Kırılıp yıkanan bu kayaçlar kurutularak fırına verilmeye başlanır. Fırına verilen bazalt kayaçlar hızla soğumasıyla amorf yapıya dönüşür. Erimiş halde bulunan bazalt üzerinde yüzlerce mikro deliklerin bulunduğu platin uca doğru iletilir. Bu deliklerin akıcılığı sayesinde bazalt daima lif durumunda çekilmeye başlar. Lif yarıçapı, deliklerin yarıçapı ve eriyiğin özkütlesi ile denetlenir. Çekilen lifler su yardımıyla soğutularak katılaştırılır ve bazalt lifler oluşur (Gümölcine 2014; Swink et al. 2002).

Bazalt lifin hammaddesi bazalt taşıdır. Bazalt taşı yapıların mimari uygulamalarda sıkça kullanılan bir malzemedir. Aşınma ve iklim şartlarına dayanıklı olmasından dolayı yapıların çevre uygulamalarında tretuvarlarda bordür, oluk taşı ve döşeme kaplaması olarak kullanılmaktadır. Estetik görünümü sağlamak amacıyla dış cephe kaplamalarda da kullanılmaktadır. Bazalt taşının ısıtılmasıyla elde edilen taş yünü yapıların dış cephelerinde ve tavan izolasyonlarında yalıtım malzemesi olarak ve yanmaz özelliğinden ötürü yangına dayanımlı kapıların içerisinde kullanılmaktadır.

Bazalt lifin kullanımı

Bazaltın radyasyonu geçirmemesinden ötürü nükleer mahsullerin üretimi ile taşınmalarında kullanılabilen iyi bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı radyasyonlu

alanlarda kullanılması insan sağlığına ve çevreye oldukça faydalı bir malzemedir (Singha et al. 2012; Artemenko et al. 2008). Bazalt lifin etimi ısı ile olduğundan, ısıya ve yangına dayanımlı malzemedir.

Bazalttan elde edilen taş yn ksek sıcaklığa olan dayanımından ötürü yangın kapılarında, kalorifer kazanlarında ve sıcak su borularının yalıtımında, klima donanımları ve kanallarında, baca ve baca gazı kanallarında, tank ve depolarında, dış cephe duvar yalıtımlarında ve tavan izolasyonunda kullanılmaktadır.

Bazalt lif, iyi mekanik özellikleri, matrisle iyi ıslanması nedeniyle kompozit malzemelerinde yaygın bir kullanımı vardır. Bazalt lif ultraviyole, asidik ve alkali direncinin yanında düşük su absorpsiyonu özellikleriyle dış mekan uygulamaları için iyi bir alternatif malzemedir

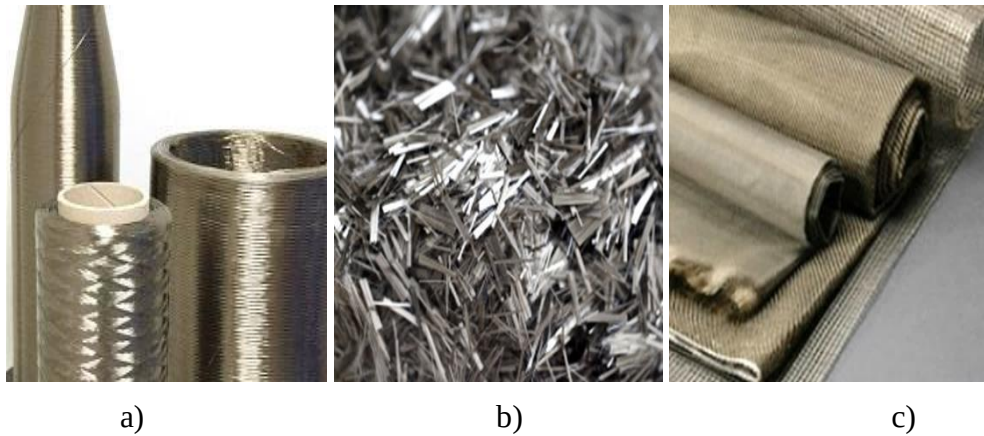
(Anonim i 2024).

Otomotiv sektörünün de tüm panellerinde, gövde de kullanılan parçaları ve ses yalıtımlarında bazalt liflerden yararlanılmaktadır.

Spor sektöründe tenis raketleri, hokey sopaları, kayak takımları ve yaylar bazalt lifin kullanım alanlarındandır

(Anonim i 2024).

Bazaltın korozyon direncinin yüksek olmasından dolayı kanal borularında, su yapılarında ve denize yakın yerlerdeki yüksek korozyonlu ortam uygulamalarında bazalt lif sıkça kullanılır (Anonim j 2024).



şekil 11. Bazalt lifin farklı formları: a) sürekli lif b) kırpılmış lif c) dokuma lif (Anonim k, 2024)

Bazalt lifin betonda kullanımı

Bazalt lifin betonda kullanımı ile betona fiziksel ve mekanik olarak bazı önemli avantajlar sağlamaktadır. Örnek olarak betonda oluşabilecek çatlaklar önemli oranda azalmakta, betonun eğilme ve çekmeye karşı dayanım performansını yükseltmekte, geçirgenliği olmayan ve donatıya karşı dirençli betonlar üretilmektedir. Aynı şekilde betonun yorulma ve aşınma dayanımları da artmaktadır. Bazalt lif betona ilave edilirken beton içerisine giren agrega ve çimento ile beraber normal beton karışımından daha fazla karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmesi gerekmektedir. Topaklanma riskinin en aza indirebilmek açısından taze betona sonradan ilave edilmemesi gerekmektedir. İstenilen kalitedeki betonlara bağlı olarak 1m³ beton içerisine 1-10 kg bazalt lif karıştırılabilir. Bazalt lifli betonların avantajları nedeniyle, temeller ve alt yapıda, su kıyıları ve limanların yapımında, su altında kalan köprülerin temellerinde, beton yolda, hava alanı pistlerinde, su kanallarında ile tünellerde ayrıca yapı sektörünün birçok alanında da kullanılabilmektedir. (Kayhan vd. 2011).

MATERYAL ve YÖNTEM

Deney programı kapsamında 50x50x50 mm ebatlarında 540 adet küp üretilmiş, bunlardan 270 adedi 8 saatlik kısa kür süresinde, diğer 270 adedi ise 28 günlük kür süresinde üretilmiştir. Her numuneden üçer adet üretilmiştir ve Sonuçlar bölümünde sunulan tablo ve grafiklerdeki sonuçlar üç numunenin ortalamasıdır. 28 gün ve 8 saat sonra basınç ve su emme testi için 50x50x50 mm boyutlarında 216 küp üretilmiştir. Her bir sıcaklık testi için ayrı küp numuneler üretilmiştir. 150 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 28 günlük ve 8 saatlik basınç dayanımı için 108 küp üretilmiştir. Benzer şekilde, 300 °C sıcaklık etkisi altında kalan numunelerin basınç dayanımı için 108 küp üretilmiştir. 600 °C sıcaklık etkisi altında kalan numunelerin basınç dayanımı için 108 küp üretilmiştir. Ayrıca, eğilme testleri için 40x40x160 mm boyutlarında 108 prizmatik kiriş üretilmiştir.

Materyal

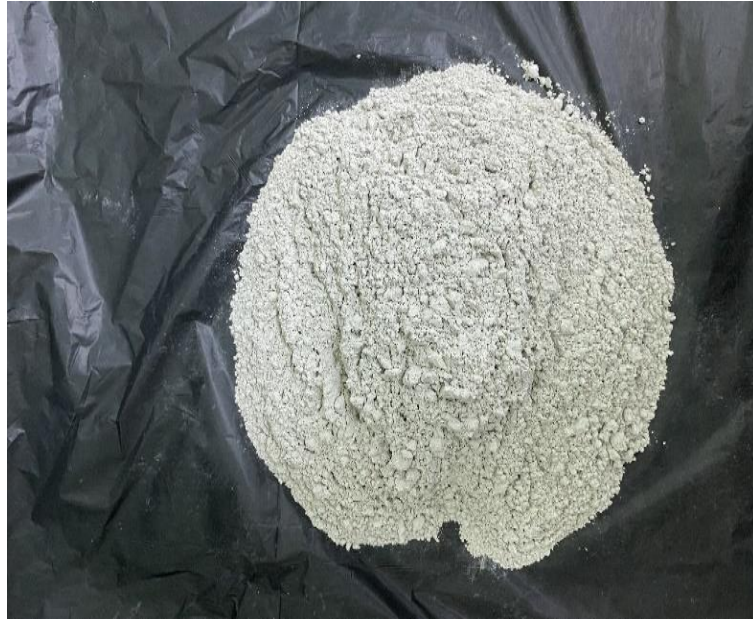
Kullanılan malzemeler

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

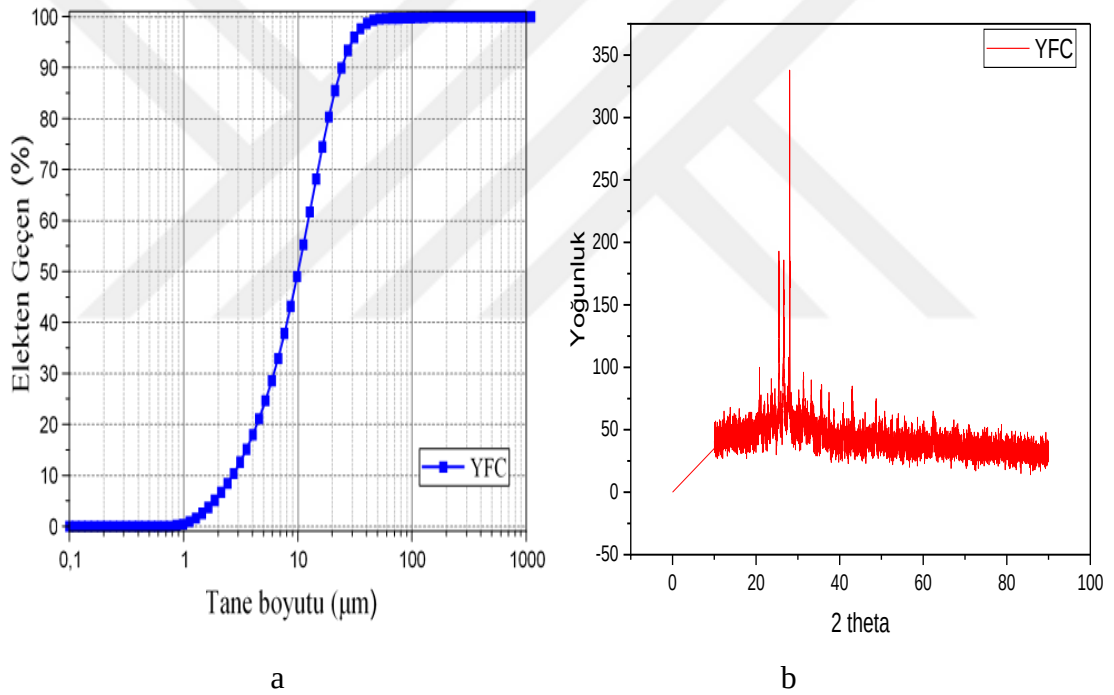
Geopolimer kompozit, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, metakaolin ve perlit/pomzadan oluşmuştur. Geopolimer beton karışımı üretmek için iki farklı bağlayıcı tozdan biri olan ÖYFC kullanılmıştır. Tablo 5'te bağlayıcı malzeme ÖYFC'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerini gösterilmektedir. Karışımda kullanılan ÖYFC ASTM C 618 [ASTM C618 (2010).] standardına uygundur ve ÖYFC'nin özkütlesi ve özgül yüzey alanı sırasıyla 90 g/cm³ ve 5090 cm²/g'dır. ÖYFC'nin mineralojik özellikleri Şekil 13'te gösterilmektedir. Şekil 13'te görüldüğü gibi, ÖYFC'de belirgin bir camsı faz vardır. Şekil 12'de bağlayıcı malzeme ÖYFC'nin görünümü, şekil 13'te bağlayıcı malzemenin ÖYFC'nin partikül boyutu dağılımı gösterilmektedir. ÖYFC'nin ortalama partikül boyutu (d₅₀), 22,6 µm'dir.

Tablo 5. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Birleşim (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK	Özgül Ağırlık
ÖYFC	40,2	36,1	9,8	1,1	10,3	0,4	0,8	0,2	0,9	2,88



Şekil 12. Öğütülmüş Yüksek fırın cürufu



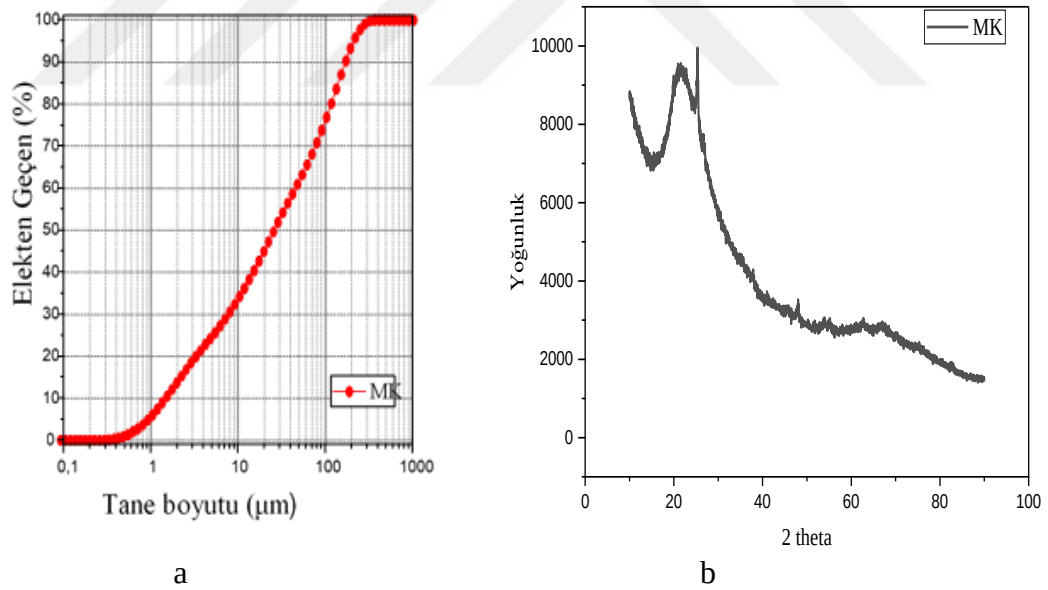
Şekil 13. (a) ÖYFC’de anataz bileşiği (b) ÖYFC'nin partikül boyutu dağılımı

Metakaolin

Geopolimer kompozitin diğer bileşeni metakaolindir. Tablo 6 bağlayıcı malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini gösterilmektedir. Karışımda kullanılan MK'nın özkütle ve özgül yüzey alanı (BET yöntemi) sırasıyla $2,63 \text{ g/cm}^3$ ve $20 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir. MK'nın mineralojik özellikleri Şekil 15'te gösterilmektedir. Şekil 15'te görüldüğü gibi, MK'de anataz bileşiği bulunmuştur ve MK'nın anataz pikine sahip olduğu da gözlemlenmiştir. Şekil 14'te bağlayıcı malzeme MK'nın görünümü Şekil 15 'te MK'nın partikül boyutu dağılımı gösterilmektedir. MK'nın ortalama partikül boyutu (d_{50}) $3,4 \text{ µm}$ 'dir.

Tablo 6. Metakaolinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Birleşim (%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK	Özgül Ağırlık
Metakaolin	0,8	57,6	38,2	0,7	0,3	0,5	0,8	0,2	0,7	2,63

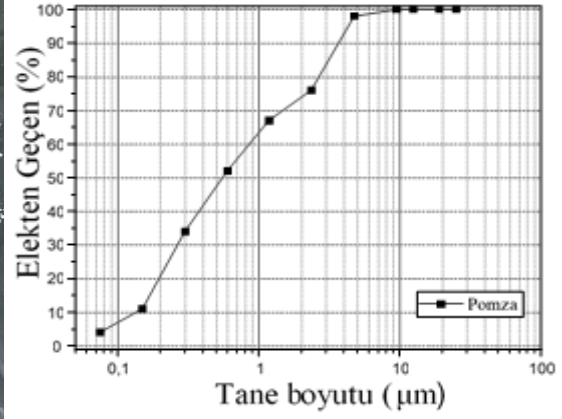
**Şekil 14.** Metakaolin**Şekil 15.** (a) MK'de anataz bileşiği (b) MK'nin partikül boyutu dağılımı

Pomza

Geopolimer beton karışımında agrega olarak iki farklı malzeme kullanılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan agregalardan biri pomzadır. Şekil 16'te pomzanın görünümü ve tane boyutu dağılımını göstermektedir. Pomzanın fiziksel özellikleri Tablo 7'te gösterilmiştir.



a



b

Şekil 16. (a) Pomzanın görünümü (b) Pomzanın tane boyutu dağılımı

Tablo 7. Pomzanın Fiziksel Özellikleri

	Pomza
Tane boyutu (mm)	0-4
Özgöl ağırlık	1,86
Su emme (24 saat)	16,3
İncelik modülü	2,95

Genleştirilmiş perlit

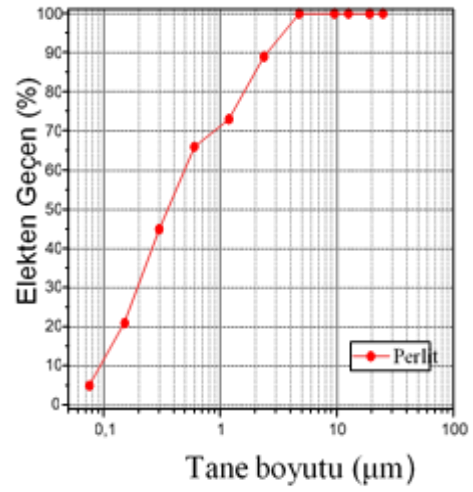
Geopolimer beton karışımında agrega olarak iki farklı malzeme kullanılmıştır. Geopolimer betonda kullanılan agregalardan bir diğeri genleştirilmiş perlittir. Şekil 17’da genleştirilmiş perlitin görünümü ve tane boyutu dağılımını göstermektedir. Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri Tablo 8’te gösterilmiştir.

Tablo 8. Genleştirilmiş Perlitin Fiziksel Özellikleri

	Genleştirilmiş Perlit
Tane boyutu (mm)	0-4
Özgöl ağırlık	1,97
% Su emme (24 saat)	6,5
İncelik modülü	2,78



a



b

Şekil 17. (a) Genleştirilmiş Perlit (b) Genleştirilmiş Perlit tane boyutu dağılımı

Bazalt lif

Ayrıca, lifli Geopolimer karışımlarında bağlayıcının %0, %1 ve %2'si oranında bazalt lifi kullanılmıştır. Karışımda 6 mm uzunluğunda bazalt lif kullanılmıştır. Bazalt lifin görünümü Şekil 18'de, teknik özellikleri ise Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 9. Bazalt Lifin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Bazalt Lifinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite (GPa)	Kopma Uzama (%)
6	16	2200	90	2,7



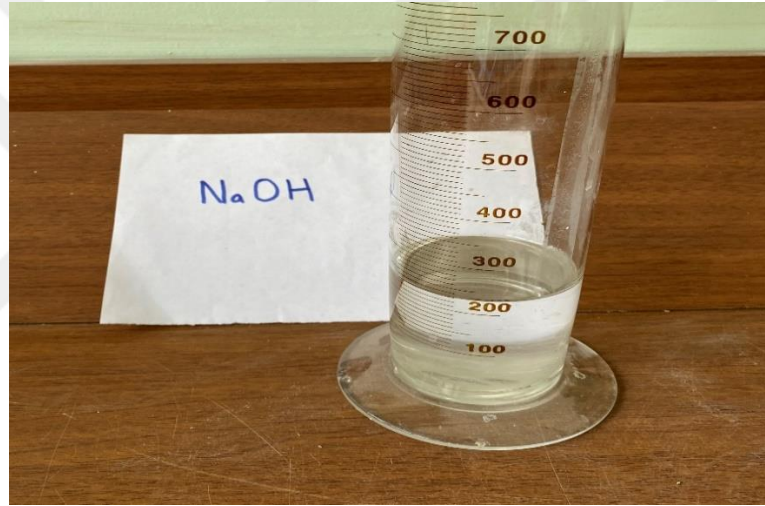
Şekil 18. Bazalt lif

Alkali aktivatörler

Sodyum silikat ve sodyum hidroksit, geopolimer beton karışımında alkali aktivatörler olarak kullanılmıştır. Ayrıca, alkali çözeltiler kütlece yüzde 8,8 Na₂O, yüzde 28,2 SiO₂, yüzde 63,0 H₂O içeren sodyum silikat çözeltisi ile 12 M sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi içermiştir. Sodyum hidroksit ile sodyum silikat içeren çözeltilerin özgül ağırlıkları sırasıyla 1,37 ve 1,56'dır. Sodyum hidroksit Şekil 19'da ve sodyum silikat Şekil 20'de gösterilmiştir. Ayrıca Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın kimyasal bileşenleri Tablo 10 ve Tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 10. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Bileşimi

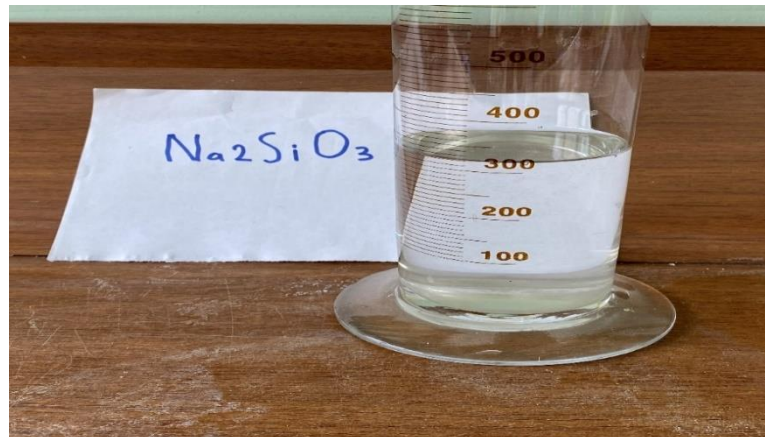
NaOH	Na ₂ CO ₃	Cl	SO ₄	Fe	Al
99	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01



Şekil 19. Sodyum Hidroksit (Kostik)

Tablo 11. Sodyum Silikatın Kimyasal Bileşimi

Na ₂ O	SiO ₂	H ₂ O	Fe	Ağır metaller
8,8	28,2	63,0	<0,01	<0,01



Şekil 20. Sodyum Silikat

Deneyde kullanılan alet ve malzemeler

Karışım mikseri

Fore markalı 60 dm³ kapasiteye sahip, 60 devir/dk karıştırıcı hızına sahip karışım mikseri kullanılmıştır. Deneyde kullanılan karışım mikseri Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Karışım mikseri

Etüv

Üretilen geopolimer beton numunelerinin 75 °C’de 8 saat boyunca priz alması için ısı kürü uygulanması aşamalarında hava dolaşımli etüv kullanılmıştır. Deneyde kullanılan etüv fırını Şekil 22’de gösterilmiştir.



a



b

Şekil 22. a,b Etüv fırını

Yüksek sıcaklık fırını

Numunelere yüksek sıcaklık uygulanabilmesi için kapasitesi 1000 °C sıcaklığa kadar ulaşabilen fırın kullanılmıştır. Fırının süresi ve sıcaklığı dijital olarak isteğe bağlı ayarlanabilmektedir. Deneyde kullanılan yüksek sıcaklık fırını Şekil 23’de gösterilmiştir



Şekil 23. Yüksek sıcaklık fırını

Üç noktalı kiriş eğilme dayanımı test cihazı

Çalışmada üretilen 4x4x16 cm’lik kiriş numuneler 3 noktalı eğilme deneyi Besmak marka test cihazında testleri yapılmıştır. Deneyde kullanılan kiriş eğilme test cihazı Şekil 24’te gösterilmiştir



Şekil 24. Üç noktalı kiriş eğilme dayanımı test cihazı

Basınç dayanım test cihazı

Numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında ASTM C109 standardındaki Autotest 3000-Pres cihazı kullanılarak diğer yöntemler göz önüne alınmıştır.

Basınç dayanımı tayini için 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Şekil 25'te basınç tayininde kullanılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 25. Autotest 3000-Pres

Kılcal su emme deneyi

Geopolimer beton numune örneklerinin alt tarafı bant ile dört tarafından bantlanarak kılcal su emme kabına bırakılmış ve kuru ağırlığı tartıldıktan sonra 12 dk - 30 dk - 60 dk - 2 saat - 4 saat ile 24 saat süreleri sonlarındaki ağırlıkları hassas terazi ile tartılmıştır. Deneyde kullanılan kılcal su emme deney kabı Şekil 26'da gösterilmiştir.

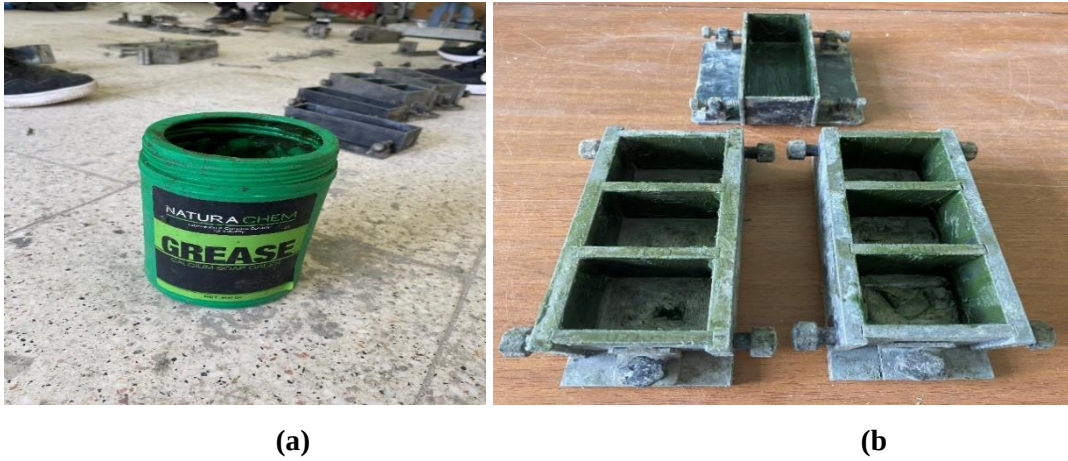


Şekil 26. Kılcal su emme deneyi

Kalıplar

Betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüksek sıcaklık etkisi altındaki dayanımı ve ağırlık kaybı testlerinde kullanılmak üzere 5x5x5 cm'lik küp ve 4x4x16 cm'lik

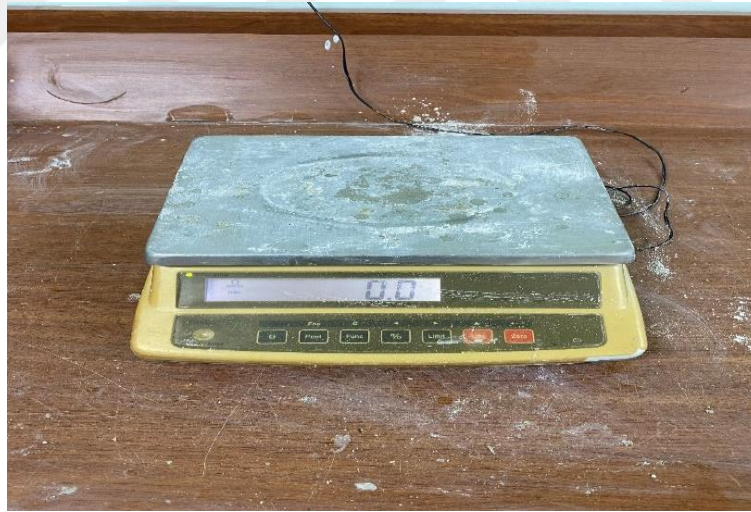
kiriş kalıplar greslenerek kullanılmıştır. Demir kalıplara ait görseller Şekil 27’de gösterilmektedir.



Şekil 27. (a) Gres yağı, (b) Yağlanmış 5x5x5 cm’lik küp ve 4x4x16 cm’lik kiriş kalıplar

Hassas terazi

Geopolimer beton karışımına girecek malzemelerin tartımı, yüksek sıcaklık ve kılcal su emme sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlıkların deneylerde kullanılan malzemelerin tartılması için elektronik terazi Şekil 28’de gösterilmiştir.



Şekil 28. Hassas terazi

Yöntem

Karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

Numunelerin üretimi

Geopolimer karışımlarının oranları Tablo 12 ve Tablo 13’te listelenmiştir. Tablo 12’de görüldüğü üzere agrega olarak genişletilmiş perlit ve Tablo 13’te pomza kullanılarak iki farklı tip karışım oluşturulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında 18 farklı karışım elde edilmiştir. Tüm karışımlarda pomza ve genişletilmiş perlit miktarı sırasıyla 55063 kg/m³ ve

63 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Tüm geopolimer karışımlarında ÖYFC ana hammadde olarak seçilmiştir; bu nedenle ÖYFC miktarı tüm karışımlar için 700 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. MK, sırasıyla 100 kg/m³ sabit miktarla ÖYFC'ye tamamlayıcı bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Aktivatör çözeltisinin miktarı ÖYFC içeriğine bağlı olarak belirlenmiştir. Kullanılan aktivatör çözeltisi miktarı ÖYFC içeriğinin %75 ila 90'ı arasında değişmiş ve işlenebilir bir karışım elde etmek için numune karışımları temel alınarak seçilmiştir ve aktivatör çözeltisi döküm gününden 24 saat önce hazırlanmıştır. Ayrıca, alkali aktivatör oranının geopolimer beton üzerindeki etkisini araştırmak için üç farklı sodyum silikat sodyum hidroksit (Na₂SiO₃/NaOH) oranı belirlenmiştir. Ayrıca, bazalt lifi bağlayıcı miktarının (ÖYFC + MK) %0, %1 ve %2'si oranında ilave edilmiştir. Numuneler agrega tipi (pomza için PO ve perlit için GP), alkali aktivasyon oranı (2; 2,5; 3) ve bazalt lif içeriği (%0 için 0, %1 için 1, %2 için 2) kullanılarak etiketlenmiştir. Örneğin PO_2_2, agrega olarak pomza kullanılan numuneyi, alkali aktivasyon oranının 2 olduğunu ve %2 oranında bazalt lif kullanıldığını temsil etmektedir.

Tablo 12. Genleştirilmiş Perlit İçeren Bazalt Lifli Hafif Geopolimer Betonun Malzeme Miktarları (kg/m³)

Karışım	ÖYFC	G.Perlit	Metakaolin	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Bazalt lif	Oran
K1	700	63	100	420	210	0	2
K2	700	63	100	420	210	8	2
K3	700	63	100	420	210	16	2
K4	700	63	100	450	180	0	2,5
K5	700	63	100	450	180	8	2,5
K6	700	63	100	450	180	16	2,5
K7	700	63	100	472,5	157,5	0	3
K8	700	63	100	472,5	157,5	8	3
K9	700	63	100	472,5	157,5	16	3

Tablo 13. Pomza İçeren Bazalt Lifli Hafif Geopolimer Betonun Malzeme Miktarları (kg/m³)

Karışım	ÖYFC	Pomza	Metakaolin	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Bazalt lif	Oran
K1	700	550	100	350	175	0	2
K2	700	550	100	350	175	8	2
K3	700	550	100	350	175	16	2
K4	700	550	100	375	150	0	2,5
K5	700	550	100	375	150	8	2,5
K6	700	550	100	375	150	16	2,5
K7	700	550	100	393,75	131,25	0	3
K8	700	550	100	393,75	131,25	8	3
K9	700	550	100	393,75	131,25	16	3

Geopolimer kompozitlerin hazırlanmasında, ÖYFC ve MK ilk olarak mekanik bir karıştırıcı kullanılarak iki dakika karıştırılmıştır. Bağlayıcılara alkali çözeltiler eklenmiş ve üç dakika daha karıştırılarak macun hazırlanmıştır. Pomza veya genleştirilmiş perlit agregaları macuna eklenmiş ve üç dakika boyunca karıştırılmıştır. Son adımda, bazalt lif geopolimeri karışıma eklenmiş ve iki dakika daha karıştırılmıştır. 10 dakika sonra elde edilen ıslak karışım kalıplara dökülmüştür. Döküm işleminden hemen sonra kalıplar bir fırına yerleştirildi. Geopolimer karışımları 75 °C'de 8 saat boyunca termal olarak kürlendi. Kullanılan fırının ısıtma hızı dakikada 5 °C'ye ayarlanmıştır. 8 saat sonra, termal şoktan kaçınmak için numuneler fırında yavaşça soğutulmuştur. Bu nedenle, numuneler dökümden sonra 12-15 saat içinde test edilmiştir. Geopolimer karışımlarının üretim aşamaları Şekil 29'da verilmiştir.





Şekil 29. Numunelerin üretimi

Test Süreci

3 Noktalı eğilme dayanımı

Eğilme dayanımının tayini için 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmıştır. Bu eğilme dayanımı için ASTM C348 standartlarına uygun test cihazı kullanılmış olup Şekil 30'da gösterilmiştir (ASTM C348, 2019).



Şekil 30. 3 noktalı eğilme dayanımı

Yüksek sıcaklık deneyi

Ayrıca, geopolimer kompozit örnekleri 150, 300 ve 600 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri test etmek için bir laboratuvar mufla fırını kullanılmıştır. Mufla fırınındaki ısı hızı dakikada 10 °C'ye ayarlanmıştır. Numuneler istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra iki saat boyunca depoda tutuldu. Numunelerin mekanik özellikleri ve ağırlık kayıpları soğuduktan sonra ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıklara karşı direnci test etmek için 50 x 50 mm küp numuneler oluşturuldu.



a

b

Şekil 31. Yüksek sıcaklık deneyi

Kılcal su emme deneyi

Taşıma özelliklerini elde etmek için geopolimer kompozit numunelerin kapiler su emme deneyleri TS EN 1015-18 uyarınca ölçülmüştür. (EN 1015-18, 2002). Bu test için 50 x 50 x 50 mm boyutlarında küp şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 24 saat boyunca kapiler etkiye maruz bırakıldıktan sonra birim alan başına emilen su miktarı ölçülmüştür. Şekil 32’de görüldüğü gibi su geçirmez izolasyon bandıyla bantlanan numuneler tabanını 2 mm geçecek şekilde suyla dolu tepsi içerisindeki ızgaraya yerleştirilmiştir. Numuneler tepsi içerisindeki suyla temas ederetmez kronometre çalıştırılmış ve kılcal su emme oranının tayini için 12 dk - 30 dk - 60 dk - 2 saat - 4 saat ile 24 saat aralıklarla olmak üzere 6 okuma yapılmıştır.

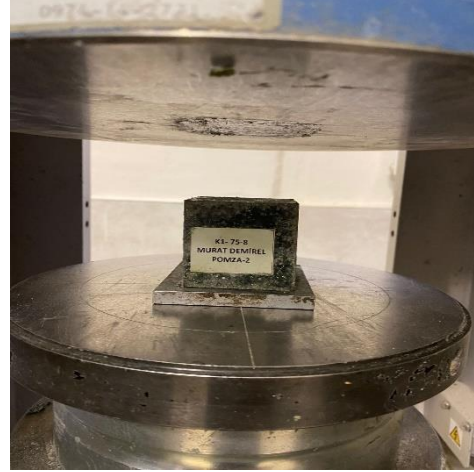


Şekil 32. Kılcal su emme deneyi

Basınç dayanımı tayini

Numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında ASTM C109 standardındaki Autotest 3000-Pres cihazı kullanılarak diğer yöntemler göz önüne alınmıştır.

Basınç dayanımı tayini için 50x50x50 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Şekil 33'te basınç tayininde kullanılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 33. Autotest 3000-Pres

ARAŞTIRMA BULGULARI

Test süreci

Bu çalışma için yapılan deneylerin standart ve açıklama detayları Tablo 7'de verilmiştir. Su emme, sertleşmiş etüv kurusu ağırlık ve görünür porozite testlerinin sonuçları, numuneler fırında soğutulduktan sonra elde edilmiştir. ASTM C642 standardına göre, fiziksel özellikleri analiz etmek için 50 x 50 x 50 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır (ASTM C642 2013). Taşıma özelliklerini elde etmek için geopolimer kompozit numunelerin kapiler su emme deneyi EN 1015-18 standartları uyarınca ölçülmüştür (EN 1015-18 2002). Bu test için 50 x 50 x 50 mm boyutlarında küp şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 24 saat boyunca kapiler etkiye maruz bırakıldıktan sonra birim alan başına emilen su miktarı ölçülmüştür.

Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için eğilme dayanımı ve basınç dayanımı için ASTM C348 ve ASTM C109 kullanılmıştır (ASTM C348 2019; ASTM C109 2020). Eğilme dayanımı için 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde prizmatik numuneler ve basınç dayanımı için 50 x 50 x 50 mm ölçülerinde kübik numuneler yapılmıştır.

Ayrıca, geopolimer kompozit numuneler 150°C, 300°C ve 600°C'ye kadar ısıtılmıştır. Yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri test etmek için bir laboratuvar muflası kullanılmıştır. Mufla fırınındaki ısı hızı dakikada 10 °C'ye ayarlanmıştır. Numuneler istenen sıcaklığa ulaştıktan sonra iki saat boyunca depoda tutuldu. Numunelerin mekanik özellikleri ve ağırlık kayıpları soğuduktan sonra ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıklara karşı direnci test etmek için 50 x 50 x 50 mm küp numuneler oluşturuldu.

Yüksek sıcaklık uygulaması yapılmış ve yapılmamış geopolimer kompozit numunelerin mekanik özellikleri belirlendikten sonra numuneler alınmıştır. Bu numuneler üzerinde farklı büyütme yapılarak mikroyapısal değişimler belirlenmiştir.

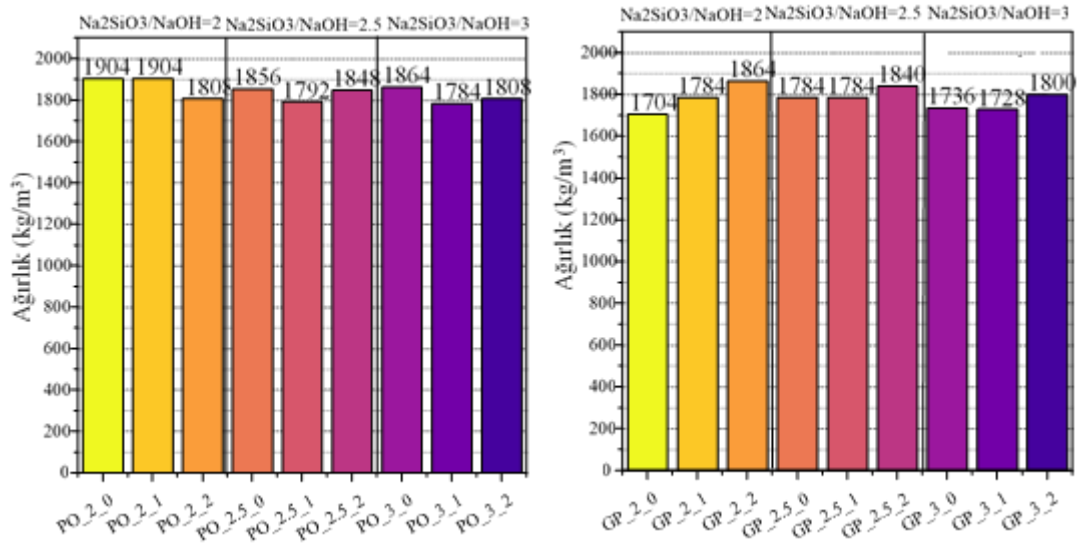
Tablo 14. Deneylerin Standart ve Açıklama Detayları

Deney	Standart	Açıklamalar
Su emme testi	ASTM C642	50x50x50 mm küp numune
Sertleştirilmiş ağırlık	ASTM C642	50x50x50 mm küp numune
Görünür porozitelilik	ASTM C642	50x50x50 mm küp numune
Kılcal su emme	EN 1015-18	50x50x50 mm küp numune
Eğilme dayanımı	ASTM C348	40x40x160mm prizma numunesi

Fiziksel Özellikler

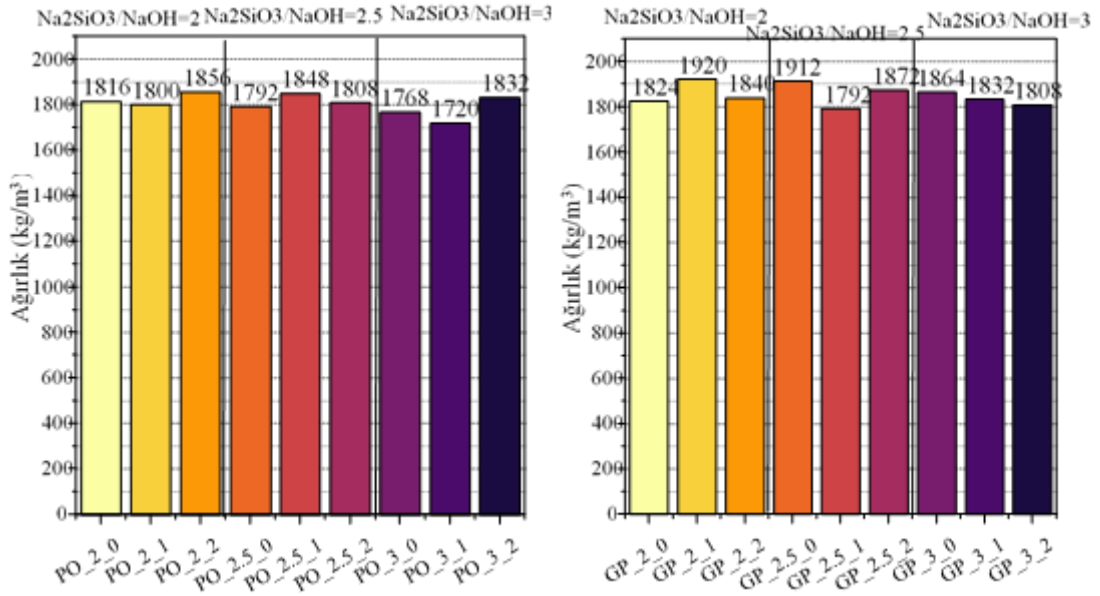
Etüv kurusu ağırlık

12 saatlik etüv kurusu ağırlık sonuçları Şekil 34'de sunulmuştur. Şekil 34'de görüldüğü üzere, pomza içeren numunelerin etüv kurusu yoğunluğu 1784 kg/m^3 ile 1904 kg/m^3 arasında, genleştirilmiş perlit içeren numunelerin etüv kurusu yoğunluğu ise 1704 kg/m^3 ile 1864 kg/m^3 arasında değişmektedir. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerin etüv kurusu yoğunluğu pomza içeren numunelerin fırın yoğunluğundan daha azdır. Pomza genellikle genleştirilmiş perlitten daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Her ikisi de hafif agregalar olmasına rağmen, pomza volkanik kökeninden dolayı daha yoğundur ve hapsolmuş hava kalıntıları içerirken, genleştirilmiş perlit daha kapsamlı camsı yapılara sahiptir. Bu nedenle, bu agregalar betonda kullanıldığında, pomzalı beton karışımı genleştirilmiş perlitli karışımdan daha yüksek bir toplam yoğunluğa sahip olabilir. Pomza, genleştirilmiş perlite göre daha fazla poroziteliliğe ve emme kapasitesine sahiptir. Bu, geopolimer betonun karıştırma işlemi sırasında daha az su veya geopolimer çözeltisi emebilen genleştirilmiş perlitin aksine, pomzanın karıştırma işlemi sırasında daha fazla emebileceği ve beton karışımının ağırlığını artırabileceği anlamına gelir. Ağırlık değişiklikleri ayrıca tane boyutu ve formundaki farklılıklardan da kaynaklanabilir. Pomza taneleri genleştirilmiş perlitten daha büyük veya daha yoğunsa, daha ağır bir beton karışımı ortaya çıkabilir. Pomza gibi geopolimer numunelerinde, alkali aktivatör oranının artırılması genellikle fırın yoğunluğunda bir azalmaya yol açar. Buna karşılık, alkali aktivatör oranı arttığında, genleştirilmiş perlit içeren numunelerde etüv kurusu yoğunluğu artmıştır. Pomza, poroziteliliği nedeniyle geopolimer aktivatör solüsyonunu büyük miktarda emebilir. Genleştirilmiş perlit, pomza gibi hafiftir, ancak farklı porozite ve su emme özelliklerine sahip olabilir. Pomzaya göre daha geniş ve camsı olduğu için aktivatör çözeltisini emmesi daha uzun sürebilir. Aktivatör çözeltisi ve genleştirilmiş perlit partikülü arasındaki bağlanma ve reaksiyon, daha yüksek alkali aktivatör oranları ile geliştirilebilir. Daha fazla geopolimer bağlayıcı genleştirilmiş perlit partikülleri etrafındaki yoğunluğu artırdığından bu daha yoğun ve kompakt bir yapıya yol açabilir. Ayrıca, genleştirilmiş perlit bazlı havalandırılmış geopolimerde şişirme maddesi olarak hidrojen peroksit kullanılması, daha düşük ağırlıklara ve termal iletkenliklere sahip hafif macunların ve harçların üretilmesini sağlar. Optimum sonuçlar için daha yüksek hidrojen peroksit oranlarından kaçınılması gerektiğini akılda tutmak önemlidir. Bu çalışma, genleştirilmiş perlit veya pomza içeren geopolimer numunelerinin yoğunluğunun önemli ölçüde olduğunu göstermektedir.



Şekil 34. Etüv kurusu ağırlığı sonuçları 15 saat için

Şekil 35'de 28 gün bekletilen numunelerin ağırlık sonuçları gösterilmektedir. Genleştirilmiş perlit içeren geopolimer beton numunelerinin 28 gün boyunca kür edilmesi, 12 saatlik sonuçlara kıyasla yoğunluğun azalmasına neden olmuştur. Pomza içeren numunelerde 12 saatlik ağırlık sonuçları genellikle 28 günlük sonuçlardan daha yüksektir. Geopolimer beton, priz ve kimyasal reaksiyonun ilk aşamaları nedeniyle ilk kür aşamasında (12 saat) hala aşırı nem içerebilir. Bununla birlikte, 28 günlük kürleme süresi boyunca, özellikle kürleme koşulları açık havada veya optimum kürleme ortamlarından daha azsa, bu fazla nemin önemli bir miktarı buharlaşmış olabilir. Bu nem buharlaşması numunelerin genel yoğunluğunda bir azalmaya yol açabilir. Geopolimerizasyon devam eden bir süreçtir ve alkali aktivatör, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve agregalar arasındaki reaksiyon ilk priz aşamasının ötesinde de devam eder. Bazı durumlarda, özellikle genleştirilmiş perlit içeren numunelerde, geopolimer matris içindeki kimyasal reaksiyonlar ve yapısal değişiklikler zaman içinde devam ederek moleküler yapıda yeniden düzenlemelere veya değişikliklere yol açabilir. Bu durum, malzemelerin bileşimi ve düzenindeki değişiklikler nedeniyle ağırlıkta bir azalmaya yol açabilir. Genleştirilmiş perlit daha poroziteli olduğu için başlangıçta daha fazla nem tutabilir ve bu da 12 saatlik bulgulara yoğunluğu artırabilir. Ancak, ısıtma işlemi sırasında buharlaşma veya çevreye emilim sonucu nem açığa çıkabilir ve bu da ağırlıkta düşüşe neden olur. Pomza çok poroziteli olduğundan, ilk on iki saat içinde önemli miktarda su veya aktivatör solüsyonu emebilir. Başlangıçta, bu emilim daha büyük bir ağırlıkla sonuçlanabilir. Ancak 28 günlük kürleme süresi boyunca, fazladan suyun buharlaşması ve pomzanın daha kararlı bir hidratasyon durumuna ulaşması mümkündür, bu da önceki aşamaya kıyasla ağırlık kaybına neden olur.

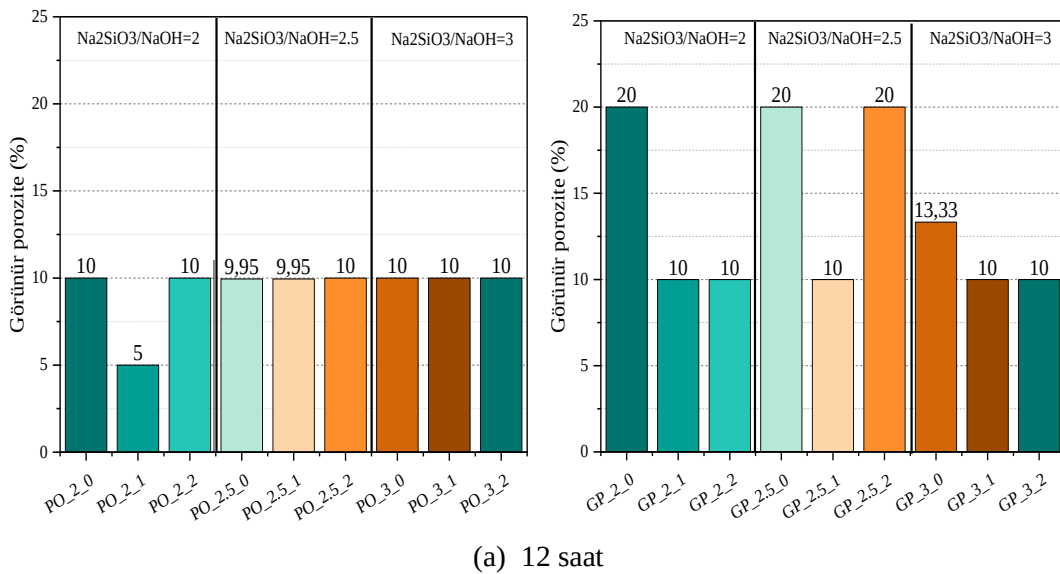


Şekil 35. 28-gün için etüv kurusu ağırlığı sonuçları

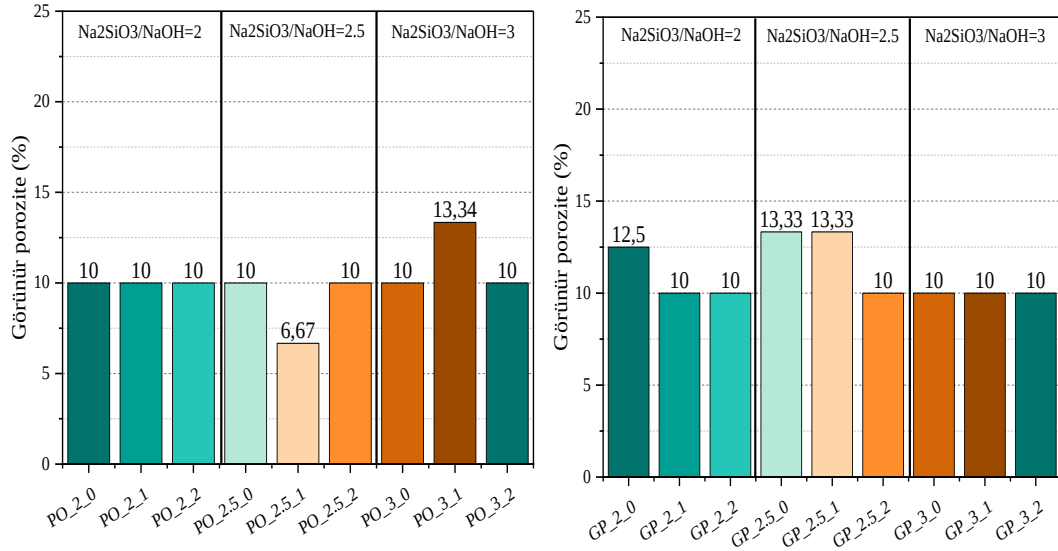
Porozite ve su emme

Şekil 36'da 12 saatlik ve 28 günlük porozitelilik sonuçları gösterilmektedir. Şekil 36. a'da 12 saatte kürlenmiş numunelerin ağırlık sonuçları, Şekil 36. b'de ise 28 günde kürlenmiş numunelerin ağırlık sonuçları gösterilmektedir. Pomza içeren ve 12 saat kürlenmiş numunelerin porozite değerleri birbirine çok yakındır. Aslında, pomza içeren ve 28 gün kürlenmiş numuneler ile 12 saat kürlenmiş numunelerin sonuçları birbirine çok yakındır. Pomzanın agrega olarak kullanıldığı numunelerde bazalt lif oranı ve alkali aktivatör oranı porozite üzerinde önemli bir etkiye neden olmamıştır. Yüksek poroziteliliği göz önüne alındığında, pomza numunelerin toplam geopolimer poroziteliliği üzerinde baskın bir etkiye sahip olabilir. Alkali aktivatör oranı veya bazalt lif oranındaki ayarlamaların getirdiği küçük değişiklikler, yüksek poroziteliliğinin gölgesinde kalabilir. Pomzanın kendisi geopolimer betonun poroziteliliğine önemli bir katkıda bulunduğundan, bu bileşenlerdeki ayarlamaların genel porozitelilik üzerinde büyük bir etkisi olmayabilir. Pomza agregası ve geopolimer matris ile ne kadar iyi etkileşime girdiklerine dair olası kısıtlamalar nedeniyle, geopolimer karışımına eklendiklerinde porozitelilik bazalt liflerden önemli ölçüde etkilenmeyebilir. Bazalt lifleri pomza veya geopolimer bağlayıcı ile iyi bir şekilde bütünleşmez veya bağlanmazsa, bunların eklenmesinin porozitelilik üzerinde önemli bir etkisi olmayabilir. Pomzanın ana etkisi, alkalik aktivatör oranının porozitelilik üzerindeki etkisini gizleyebilir veya azaltabilir. Pomzanın doğal poroziteliliği, aktivatör oranının porozitelilik üzerindeki etkilerini ortadan kaldırarak önemli bir katkıda bulunmaya devam edebileceğinden, alkali aktivatör oranındaki değişiklikler geopolimer numunelerinin poroziteliliğinde önemli değişiklikler yaratmayabilir. Agrega olarak geliştirilmiş perlit kullanılan ve 12 saat boyunca

kürlenmiş numunelerde bazalt lif ilavesi porozitelilik oranını düşürmüştür. Alkali aktivatör oranının değiştirilmesi de genişletilmiş perlitin agrega olarak kullanıldığı numunelerde porozitelilik üzerinde etkili olmuştur. Benzer şekilde, genişletilmiş perlitin agrega olarak kullanıldığı ve 28 gün kürlenmiş numunelerde bazalt lif oranı ve alkali aktivatör oranının değişimi porozite oranını etkilemiştir. Ancak, bazalt lif ve alkali aktivatör oranındaki değişim 28 gün kürlenmiş numunelerde 12 saat kürlenmiş numunelere kıyasla daha az etkili olmuştur. Çünkü Geopolimerizasyon reaksiyonu ve bağlayıcı üretiminin ilk aşamaları, ilk 12 saatlik kürlenme süresi boyunca daha aktif ve önemli olabilir. Bu erken aşamada, alkali aktivatör bazalt lif oranındaki değişiklikler, gerçekleşen reaksiyonlar üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olabilir, geopolimer matrisinin oluşumunu etkileyebilir ve belki de poroziteliliği değiştirebilir. Geopolimerizasyon süreci zamana bağlıdır. Geopolimer matris, 12 saatlik kürlenme süresine kıyasla 28 günlük kürlenmeden sonra daha olgun bir duruma ulaşmış olabilir. Geopolimerizasyon olaylarının çoğu zaten gerçekleşmiş ve matris bu noktada stabilize olmuş olabileceğinden, alkali aktivatör oranı ve bazalt lif oranındaki değişikliklerin etkileri bundan sonraki aşamada daha az fark edilebilir olabilir. Sürekli sertleşme ve Geopolimerizasyonun erken aşamaları nedeniyle, daha kısa kürlenme süreleri (örneğin, 12 saat) bazalt lif ve alkali aktivatör oranlarındaki değişikliklere yanıt olarak daha belirgin değişiklikler gösterebilir. Ancak bu değişikliklerin etkisi, kürlenme süresi 28 güne uzatıldığında azalabilir çünkü geopolimer matrisi daha katı ve daha az değiştirilebilir hale gelecektir.



Şekil 36. (a) 12 saat (b) 28 gün için görünür porozite sonuçları (devamı)

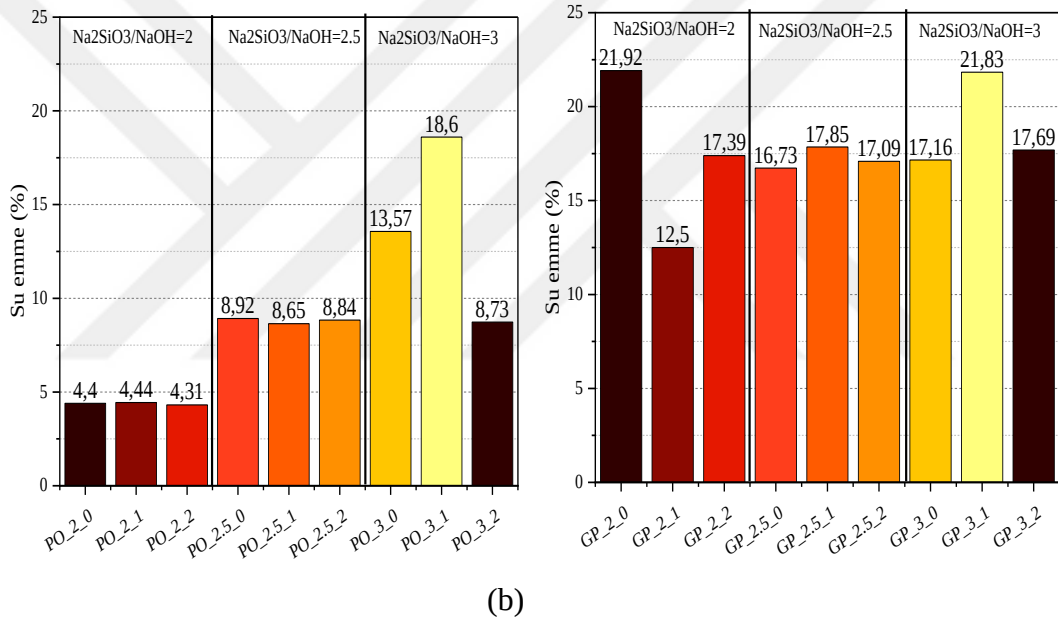
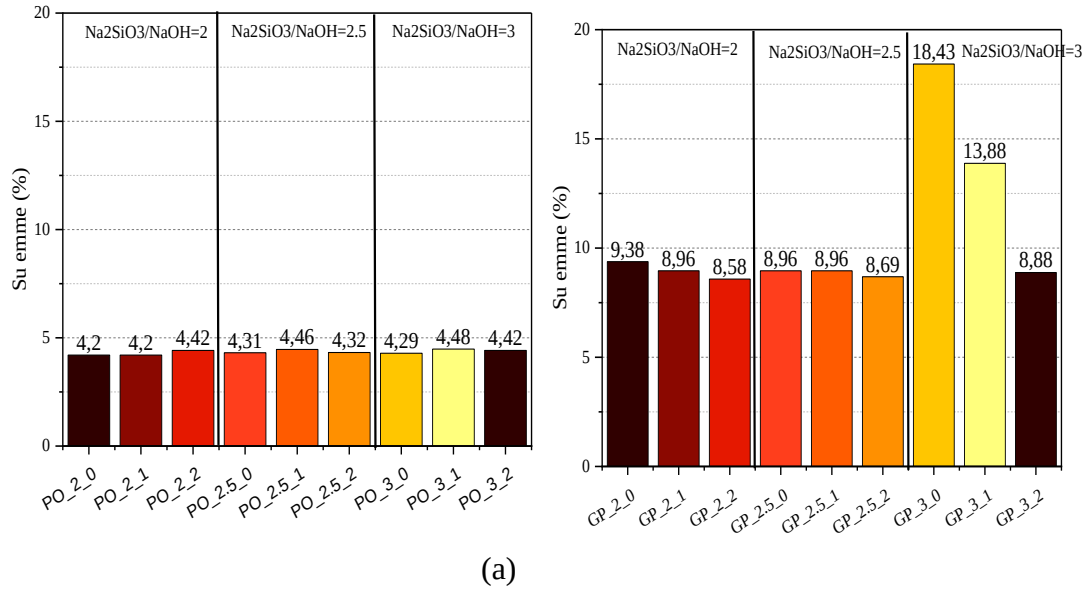


(b) 28 gün

Şekil 36. (a) 12 saat (b) 28 gün için görünür porozite sonuçları

Şekil 37 12 saatlik ve 28 günlük kılcal su emme sonuçlarını göstermektedir. Şekil 37 a'da 12 saatte kürlenmiş numunelerin su emme sonuçları, Şekil 37 b'de ise 28 günde kürlenmiş numunelerin su emme sonuçları gösterilmektedir. Agregada olarak pomzanın kullanıldığı 12 saatlik kürlenmiş numunelerde bazalt lif oranı ve alkali aktivatör oranının su emme üzerinde önemli bir etkisi olmazken, agregada olarak genişletilmiş perlitin kullanıldığı numunelerde etkili olmuştur. Ayrıca 12 saat kürlenmiş numunelerde agregada olarak genişletilmiş perlit kullanılması, pomzanın agregada olarak kullanıldığı sonuçlara kıyasla su emme oranında artışa neden olmuştur. Agregada olarak genişletilmiş perlit kullanılan numunelerin su emme oranı pomzaya kıyasla yaklaşık 2 ila 3 kat artmıştır. Çünkü, pomza ve genişletilmiş perlitin porozitellikleri ve porozite mimarileri farklıdır. Çünkü genişletilmiş perlit genişleme süreci boyunca büyüdükçe volkanik camdan oluşur ve genellikle çok sayıda küçük, sızdırmaz hava boşlukları veya kabarcıkları olan daha kapalı hücreli bir yapıya sahiptir. Buna karşılık, pomza volkanik patlama sonucu oluşmuştur ve daha fazla delik ve boşluk içeren bir yapıya ve açık hücre yapısına sahiptir. Genleştirilmiş perlit partikülleri, daha kapalı, sızdırmaz hücrelere sahip olan pomza partiküllerine göre bağlantılı porozitelere sahip daha pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Ayrıca, pomzanın açık hücreli yapısındaki daha büyük, bağlantılı poroziteler doğrudan su girişini engelleyebilir. Bu yapı, genişletilmiş perlit ile karşılaştırılabilir bir hızda su emme engelleyebilir. Alkali aktivatör oranı 2 olduğunda bazalt lif oranının artması nedeniyle agregada olarak genişletilmiş perlit kullanılan 12 saatlik numunelerde su emme oranı biraz azalmıştır. Alkali aktivatör oranının 2 olduğu numunelerde bazalt lif oranının %1'den %2'ye çıkarılması su emme oranını sırasıyla %4 ve %8 azaltmıştır. Alkali aktivatör oranının 2,5 olduğu durumda, bazalt lif oranının artırılmasının su emme oranı üzerinde önemli bir

etkisi olmamıştır. Buna ek olarak, alkali aktivatör oranının 3 olduğu numunelerde bazalt lif oranının %1'den %2'ye çıkarılması su emme oranının sırasıyla %24 ve %51 azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, agrega olarak geliştirilmiş geliştirilmiş perlit kullanılan numunelerde, kür süresinin artırılması durumunda, yani 28 günlük kürde, su emme oranı 12 saatlik numunelere kıyasla önemli ölçüde artmıştır. %57 ile %137 arasında bir artış kaydedilmiştir. Agrega olarak pomzanın kullanıldığı numunelerde 28 günlük kür süresi, özellikle alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerde su emmede önemli bir artışa neden olmazken, alkali aktivatör oranı 2,5 ve 3 olan numunelerde %93 ile %314 arasında bir artışa neden olmuştur. Çünkü geopolimerizasyon süreci kullanılan alkali aktivatör oranından etkilenmektedir. Daha yüksek aktivatör oranları kullanıldığında, geopolimer matrisinde daha kapsamlı reaksiyonlara ve yapısal değişikliklere yol açabilir. 28 gün sonra, daha yüksek aktivatör oranlarına (2,5 ve 3) sahip pomza içeren numuneler su emmesinde önemli bir artış sergilemiştir. Bu, muhtemelen daha yüksek aktivatör konsantrasyonu nedeniyle geopolimer yapısındaki reaksiyonların veya modifikasyonların artmasından kaynaklanan porozitelilikte bir artışa işaret edebilir. Pomza ve geliştirilmiş perlitin içsel özellikleri, emme kapasitesi, porozite yapısı ve porozitelilik dahil olmak üzere farklılık göstermektedir. Kapalı hücre yapısına sahip olan geliştirilmiş perlit, daha açık hücre yapısına sahip olan pomzaya kıyasla daha uzun bir kürleme süresi boyunca su emme daha duyarlı olabilir. Kür süresi ilerledikçe suyun geliştirilmiş perlit içeren numunelerin kapalı hücre yapısına erişebilirliğinin artması, su emmesindeki artışın nedeni olabilir. Daha uzun kürleme aralıkları, örneğin 28 günlük zaman ölçeği, geopolimer matrisinde devam eden reaksiyonlara ve yapısal değişikliklere izin verir. Geliştirilmiş perlit söz konusu olduğunda, bu değişiklikler porozitenin artmasına veya mikroyapı değişikliklerine yol açarak daha hızlı bir su emme oranına neden olabilir. Öte yandan, pomza daha kararlı bir yapıya sahip olabilir veya özellikle daha düşük alkali aktivatör oranına sahip numunelerde, uzun süreli kürleme nedeniyle ilave porozitelilik değişikliklerinin sınırlı olduğu bir eşige ulaşabilir.

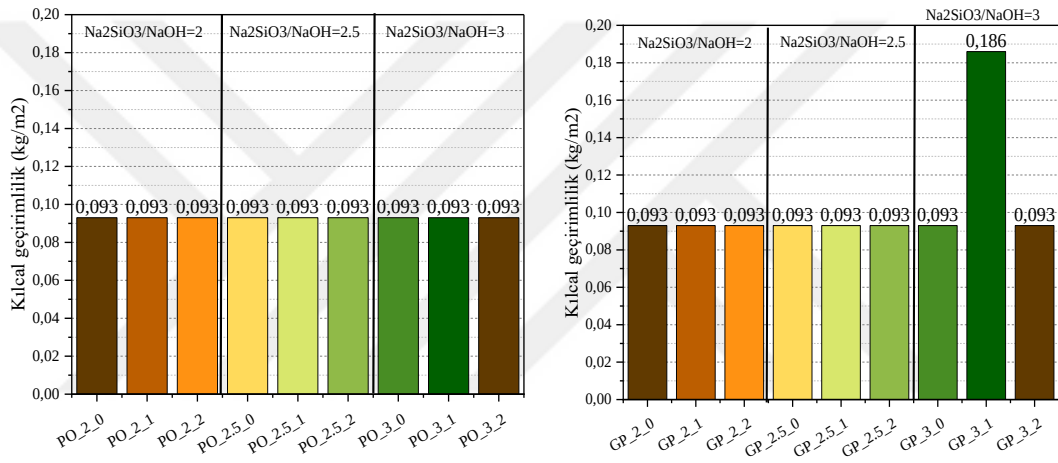


Şekil 37. Su emme sonuçları (a) 12 saat (b) 28 gün için su emme sonuçları

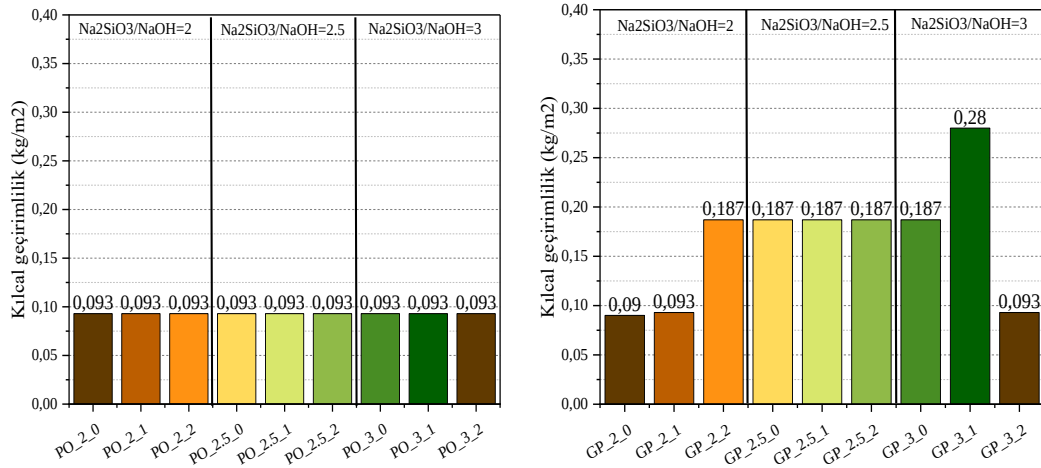
Kılcal geçirimlilik

Şekil 38'de 12 saat ve 28 gün kürlenmiş numunelerin kılcal geçirimlilik sonuçları gösterilmektedir. Şekil 38 a 12 saatte kürlenmiş numunelerin kılcal geçirimlilik sonuçlarını, Şekil 38 b ise 28 günde kürlenmiş numunelerin kılcal geçirimlilik sonuçlarını göstermektedir. Şekil 38'den görüldüğü üzere, agrega olarak hem genişletilmiş perlit hem de pomzanın kullanıldığı numunelerde, bazalt lif oranı ve alkali aktivatör oranının kılcal geçirimlilik oranı üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Kür süresinin de kılcal geçirimlilik oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı değerlendirilmiştir. Çünkü geopolimer betondaki kılcal geçirimlilik davranışı, bazalt lif oranı, alkali aktivatör oranı veya kür süresindeki değişikliklerden ziyade genişletilmiş perlit ve pomza gibi agregaların özelliklerinden daha

fazla etkilenebilir. Bu agregalar, diğer faktörlerin kılcal geçirimsizlik üzerindeki etkilerini gölgede bırakabilecek özgül özelliklere ve poroziteliliklere sahiptir. Suyun betona nüfuz etme oranını ölçen kılcal geçirimsizlik testi, bazalt lif oranı, alkali aktivatör oranı veya kür süresindeki değişikliklerden kaynaklanan porozitelilik veya yapıdaki ince değişiklikleri her zaman yakalayamayabilir. Bunun nedeni, özellikle agregaların etkisi önemli olduğunda, test yönteminin bu faktörlerin neden olduğu küçük farklılıkları tespit edecek kadar hassas olmaması olabilir. Birincil agregalar olan genişletilmiş perlit ve pomza, diğer faktörlerdeki değişimler karşısında su emiciliği açısından tutarlı davranışlar sergileyebilir. porozitelilik, emme kapasitesi ve yapıyla ilgili doğal özelliklerinin nispeten sabit kalması muhtemeldir, bu da diğer parametrelerdeki değişikliklerden bağımsız olarak tutarlı kılcal geçirimsizlik ile sonuçlanır.



(a)



(b)

Şekil 38. (a) 12 saat (b) 28 gün için kılcal geçirimsizlik sonuçları

Mekanik Özellikler

Basınç dayanımı

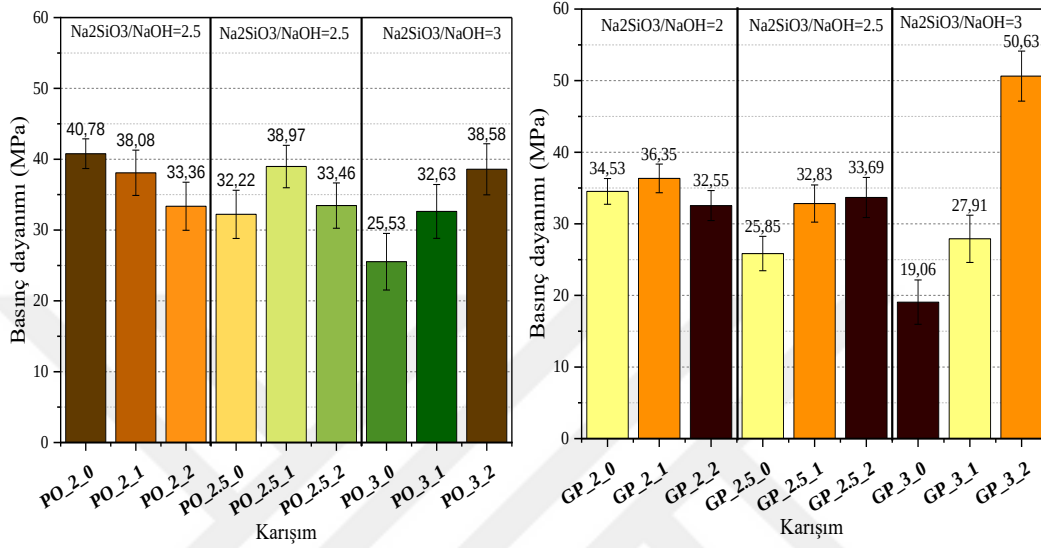
Şekil 39'da 12 saat kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir. Agregada olarak pomza ve genişletilmiş perlit kullanılan numunelerin basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 25,53 MPa ile 40,78 MPa ve 19,06 MPa ile 50,63 MPa arasında değişmektedir. On iki saat kürlenen numuneler arasında en yüksek ve en düşük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla GP_3_2 ve GP_3_0 numunelerinde elde edilmiştir. Agregada olarak pomzanın kullanıldığı numunelerin basınç dayanımı, agregada olarak genişletilmiş perlitin kullanıldığı numunelerden genellikle daha yüksek olmuştur. PO_2.5_2 ve PO_3_2 numuneleri hariç, pomza numunelerinin basınç dayanımı genişletilmiş perlit numunelerinden %2,49 ila %33,95 daha yüksektir. Bunun nedeni, iki hafif agregada türü olan pomza ve genişletilmiş perlitin, betonun dayanımını ve performansını etkileyebilecek farklı özelliklere sahip olmasıdır. Pomza, beton karışımı içinde paketleme yoğunluğu ve tane kenetlenmesi söz konusu olduğunda genişletilmiş perlite göre daha tutarlı tane boyutu ve şekline sahiptir. Şekilleri ve boyut dağılımları nedeniyle, pomza taneleri beton matrisine daha iyi oturabilir ve böylece dayanımı artırabilir. Ayrıca, Pomza genişletilmiş perlite göre daha pürüzlü bir yüzey dokusuna ve daha yüksek poroziteliliğe sahiptir. Pürüzlülükleri ve porozitelilikleri nedeniyle, pomza taneleri geopolimer matrise daha kolay tutunarak betonun bağlantısını ve genel dayanımını artırabilir. Ayrıca, pomza ve genişletilmiş perlit farklı kimyasal bileşimlere sahiptir; pomza genellikle daha fazla silika ve alümina içerir. Bu bileşimsel değişiklikler, geopolimer matris içinde meydana gelen bağlanma ve kimyasal süreçler üzerinde bir etkiye sahip olabilir ve bu da betonun dayanımı üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Pomza ve genişletilmiş perlit, içsel özellikleri nedeniyle beton dayanımının oluşturulması için gerekli olan pozolanik reaksiyon sırasında farklı tepki verebilir. Pomza, benzersiz özellikleri nedeniyle genişletilmiş perlitten daha etkili bir reaksiyona neden olabilir ve bu da daha yüksek bir basınç dayanımı ile sonuçlanabilir. Ameri ve diğerleri (Ameri et al. 2020) ile (Mir et al. 2017) de bu sonuçlara paralel sonuçlara ulaşmıştır. Pomzanın kullanıldığı numunelerde bazalt lif oranındaki artış, alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerin dayanımında düşüşe, alkali aktivatör oranı 3 olan numunelerin basınç dayanımında ise artışa neden olmuştur. Alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerde (agregada olarak pomzanın kullanıldığı grupta) bazalt lif oranının %0'dan %1 ve %2'ye çıkarılması basınç dayanımını sırasıyla %6,62 ve %18,20 oranında azaltmıştır. Buna karşılık alkali aktivatör oranının 3 olduğu numunelerde bazalt lif oranının artırılması basınç dayanımını %27,81 ve %51,12 oranında artırmıştır. Bu durumun nedeni, bazalt liflerinin betona dahil edilmesinin güçlendirme yoluyla mekanik özelliklerini artırabilmesidir. Ancak, bazalt liflerin beton matrisi içindeki dağılımı ve etkileşimi bu

donatının verimliliğini belirlemektedir. Azaltılmış aktivatör oranı (2) lif etkileşimini veya dağılımını engelleyerek kümelenmeye veya etkisiz bağlanmaya ve dayanımda düşüşe neden olabilir. Öte yandan, daha fazla aktivatör oranı daha fazla dağılma ve etkileşimle sonuçlanabilir (3). Alkali aktivatör oranı, reaksiyonun kinetiğini ve kapsamını etkileyerek geopolimerizasyon süreci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha düşük bir aktivatör oranı (2) matrisi daha az reaktif ve akışkan hale getirerek bazalt lif entegrasyonunu önleyebilir ve betonu zayıflatır. Öte yandan, daha yüksek bir aktivatör oranı (3), liflerin takviye edici niteliklerini en üst düzeye çıkarmak için daha uygun bir ortam yaratabilir. Geopolimer matrisin kimyasal bileşimi, özellikle alkali aktivatörlerin türü ve miktarı da reaksiyon kinetiğini ve dayanım gelişimini etkiler. Ayrıca, sıcaklık ve uzunluk gibi kürlenme koşulları bazalt liflerin matrisle nasıl etkileşime girdiğini etkileyebilir. Bu özellikler üzerinde etkisi olabilecek çeşitli aktivatör oranları, dayanımı çeşitli şekillerde etkileyebilir. Son olarak, liflerin oryantasyonu ve hizalanması beton dayanımı için kritik öneme sahiptir. Aktivatör oranındaki değişiklikler, matris içindeki lif yöneliminde değişikliklere neden olarak yük aktarım mekanizmalarını ve genel dayanımı etkileyebilir. Ayrıca, yüklerin aktarılabilmesi için bazalt lifleri ile geopolimer matrisin birbirine bağlanması gerekir. Bu bağın bileşimi ve dayanımı, aktivatör oranındaki değişikliklere yanıt olarak değişebilir ve bu da genel basınç dayanımını değiştirebilir.

Agrega olarak geliştirilmiş perlit kullanılan numunelerde bazalt lif oranının %0'dan %1'e ve alkali aktivatör oranının 2,5 ve 3 olduğu numunelerde %2'ye çıkarılması basınç dayanımını sırasıyla %27 ve %30 ile %46,43 ve %165,63 oranında artırmıştır. Alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerde bazalt lif oranının %1'e çıkarılması basınç dayanımını %5,27 artırırken, lif oranının %2'ye çıkarılması basınç dayanımını %5,73 azaltmıştır. Alkali aktivatör oranındaki artış, agrega olarak pomza ve geliştirilmiş perlit kullanılan numunelerin basınç dayanımında genel bir düşüşe neden olmuştur. Bu durumun nedeni, geopolimerde alkali aktivatör oranının artırılmasının matris poroziteliliğini artırarak genel yapıyı zayıflatması ve basınç dayanımını düşürmesidir. Öte yandan, daha yüksek bir alkali aktivatör oranı, aşırı kuruma büzülmesine neden olabilir, bu da çatlakların gelişmesine ve malzemenin dayanımının bozulmasına neden olabilir. Ayrıca, alkali aktivatör, agregaların geopolimer matris ile bağlanma kapasitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilir ve numunelerin basınç dayanımını düşürebilir.

Öte yandan, pomza yerine agrega olarak geliştirilmiş perlit kullanıldığında basınç dayanımı genellikle %2 ila %25 oranında azalmıştır. Cüruf ve metakaolin bazlı geopolimer betonda, pomza numunelerinin basınç dayanımı genellikle geliştirilmiş perlit

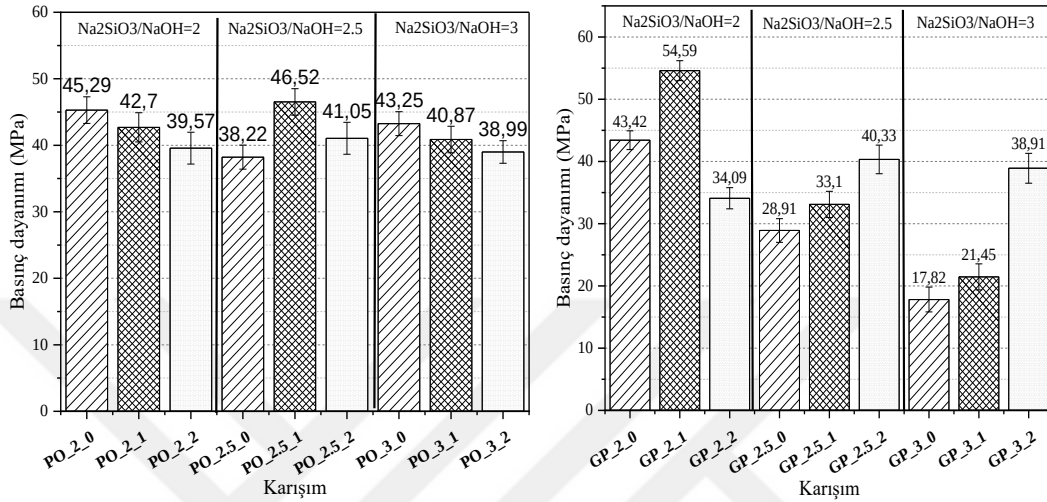
numunelerinden daha yüksektir. Dayanımdaki bu farklılığın birkaç nedeni vardır. Öncelikle, pomza genişleştirilmiş perlitten daha yoğundur, bu da daha yüksek basınç dayanımının bir kısmını açıklayabilir. Ayrıca, pomza daha iyi bağlanma özelliklerine sahip olabilir, bu da beton karışımındaki taneler arası etkileşimleri güçlendirecektir. Pomzanın genişleştirilmiş perlite göre daha yüksek basınç dayanımı muhtemelen tanelerinin boyutuna ve şekline bağlanabilir.



Şekil 39. Dökümden 12 saat sonra basınç dayanımı sonuçları

Şekil 40'da 28 gün kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir. Ayrıca, 12 saatlik basınç dayanımı sonuçları ile 28 gün kürlenen numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması Tablo 15'de sunulmuştur. Agrega olarak pomzanın kullanıldığı numunelerde kür süresinin 28 güne çıkarılması 15 saatlik sonuçlara kıyasla basınç dayanımını artırmıştır. Alkali aktivatör oranı 2 ve 2,5 olan numunelerde kür süresinin 28 güne çıkarılmasıyla basınç dayanımı %11,06, %12,13 ve %18,62 oranında artmıştır. Alkali aktivatör oranı 2,5 olan numunelerde basınç dayanımı 15 saatlik numunelerin sonuçlarına kıyasla %18,62, %19,37 ve %22,68 oranında artmıştır. Benzer şekilde, alkali aktivatör oranı 3 olan numunelerde basınç dayanımı %69,41, %25,25 ve %1,06 oranında artmıştır. Alkali aktivatör oranı arttıkça basınç dayanımındaki artış azalmıştır. Geopolimer bağlayıcının oluşumundan sorumlu süreç olan geopolimerizasyon zaman içinde sürekli olarak ilerlemektedir. Kürleme süresinin uzatılmasıyla, alkali aktivatörler ve öncül malzemeler (yüksek fırın cürufu ve metakaolin) arasındaki kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için daha fazla zaman sağlanır. Bu uzun reaksiyon süresi geopolimer matrisin gelişimini artırarak dayanımının artmasını sağlar. Daha uzun kürlenme süreleri, geopolimer matris içinde daha güçlü bağların oluşmasını kolaylaştırarak pomza agregası ile geopolimer bağlayıcı arasındaki ara yüzey kohezyonunun iyileşmesini sağlar ve sonuçta daha yüksek basınç dayanımı elde

edilir. Kürlenme süresinin uzamasıyla, geopolimer yapı daha fazla kristalleşme ve yapısal gelişime uğrayabilir. Bu, malzemelerin mikroskobik düzeyde daha iyi organize olmasını ve paketlenmesini sağlar, böylece dayanım gibi gelişmiş mekanik özelliklere katkıda bulunur. Zaman ilerledikçe, geopolimer beton, iç yapının daha organize ve iyi tanımlanmış hale geldiği bir olgunlaşma sürecinden geçer. Bu olgunlaşma süreci, betonun dayanımının genel olarak artmasına önemli ölçüde katkıda bulunur.



Şekil 40. Dökümden 28 gün sonra basınç dayanımı sonuçları

Tablo 15. 12 Saatlik ve 28 Günlük Basınç Dayanımı Sonuçlarının Karşılaştırılması

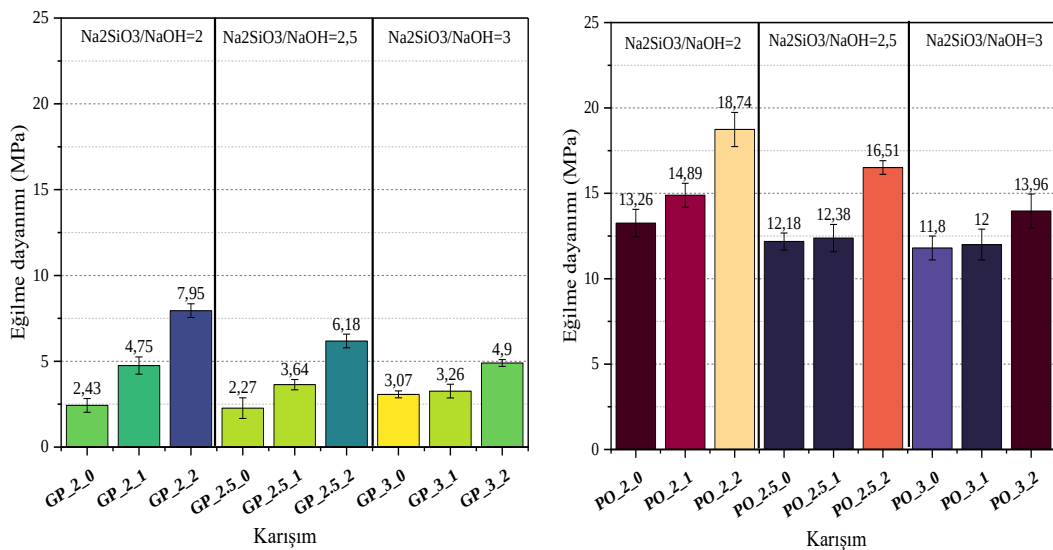
Karışım	P _{12 saat}	P _{28-g�n}	P _{12saat/} P _{28-g�n}	Karışım	P _{12 saat}	P _{28-g�n}	P _{12saat/} P _{28-g�n}
PO_2_0	40,78	45,29	0,90	GP_2_0	34,53	43,42	1,26
PO_2_1	38,08	42,70	0,89	GP_2_1	36,35	54,59	1,50
PO_2_2	33,36	39,57	0,84	GP_2_2	32,55	34,09	1,05
PO_2.5_0	32,22	38,22	0,84	GP_2.5_0	25,85	28,91	1,12
PO_2.5_1	38,97	46,52	0,84	GP_2.5_1	32,83	33,10	1,01
PO_2.5_2	33,46	41,05	0,82	GP_2.5_2	33,69	40,33	1,20
PO_3_0	25,53	43,25	0,59	GP_3_0	19,06	17,82	0,93
PO_3_1	32,63	40,87	0,80	GP_3_1	27,91	21,45	0,77
PO_3_2	38,58	38,99	0,99	GP_3_2	50,63	38,91	0,77

Eğilme dayanımı

Şekil 41'de 12 saatte kürlenen numunelerin eğilme dayanımı sonuçları gösterilmektedir. Şekil 41'den görüldüğü gibi, pomza içeren numunelerin eğilme dayanımı sonuçları, pomza içermeyen numunelerden daha yüksektir. Pomzanın agrega olarak kullanıldığı numunelerde bazalt lif oranının %0'dan %1 ve %2'ye çıkarılması eğilme dayanımını alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerde %12,33 ve %41,35; alkali aktivatör oranı 2. 5 olan numunelerde %1,66 ve %35,59; ve alkali aktivatör oranı 3 olan numunelerde

%1,65 ve %18,30. Benzer şekilde, bazalt lif oranının %0'dan %1'e ve %2'ye çıkarılması eğilme dayanımını %95,68 ve %227,31 artırmıştır. ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$), genişletilmiş perlitin agrega olarak kullanıldığı numunelerde %60,13 ve %171,66 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2,5$) ve %6,30 ve %5,58 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=3$). Agrega olarak pomzanın kullanıldığı numunelerde alkali aktivatör oranındaki artış eğilme dayanımını azaltmıştır. Alkali aktivatör oranının 2'den 2,5 ve 3'e çıkarılması eğilme dayanımını %8,14 ve %25,49 oranında azaltmıştır.

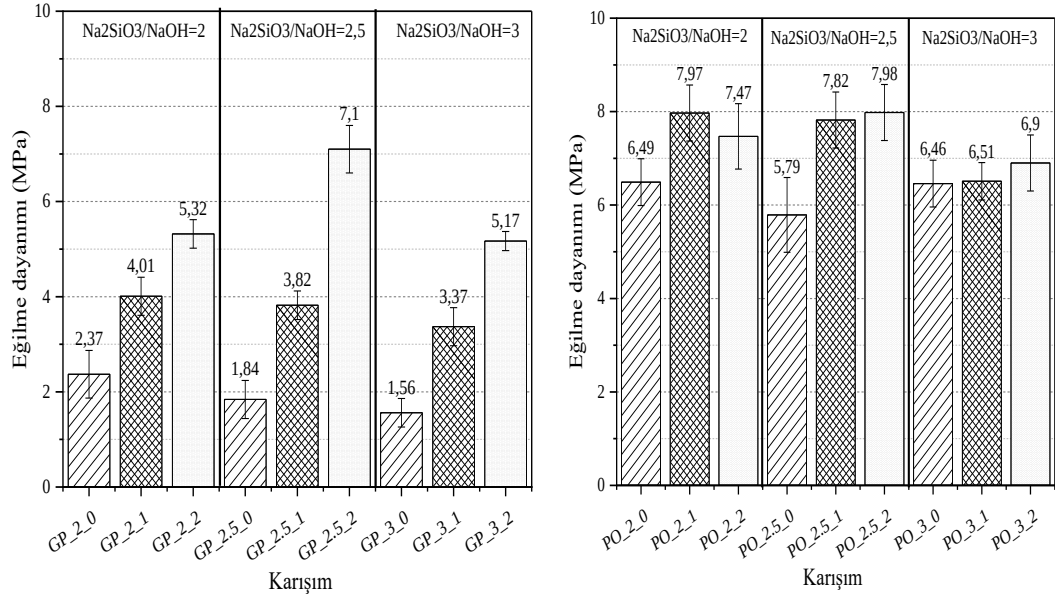
Geopolimer beton karışımlarında artan alkali aktivatör oranları daha yüksek alkalinite seviyeleri ile sonuçlanabilir. Bununla birlikte, aşırı alkalinite geopolimer bağlayıcının oluşumu üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir. Bu da matrisin kohezyonunun azalmasına veya poroziteliliğinin artmasına neden olarak taneler arasındaki arayüzey bağını zayıflatır ve böylece betonun eğilme dayanımını azaltır. Aktivatör oranının değiştirilmesi geopolimer betonun mikro yapısını da etkiler. Daha büyük aktivatör oranları, yetersiz hücre çözünmesi veya geopolimerizasyon nedeniyle matriste daha büyük poroziteler, boşluklar veya süreksizliklerle sonuçlanabilir. Bu yapısal kusurlar, taneler arasındaki bağlanmayı azaltarak betonun eğilme dayanımını düşürür. Alkali aktivatör oranındaki değişiklikler cüruf ve metakaolin öncüllerinin reaktivitesini de etkiler. Reaktivite eksikliği temel geopolimer jel yapısının gelişimini engeller ve betonun genel dayanımını, özellikle de eğilme dayanımını bozar. Aktivatör çözeltisindeki alkali/silikat oranının geopolimerizasyon üzerinde önemli bir etkisi vardır. Aktivatör içeriği çok yüksekse, jel düzgün bir şekilde oluşmayabilir veya daha zayıf bir jel üretilebilir. Bu dengesizlik betonun eğilme dayanımını etkiler. Agrega olarak pomza yerine genişletilmiş perlit kullanılması eğilme dayanımını %57,56 ile %81,67 arasında azaltmıştır. Ayrıca, agrega olarak pomza yerine genişletilmiş perlit kullanıldığında alkali aktivatör oranındaki değişiklik eğilme dayanımını ortalama %70 azaltmıştır.



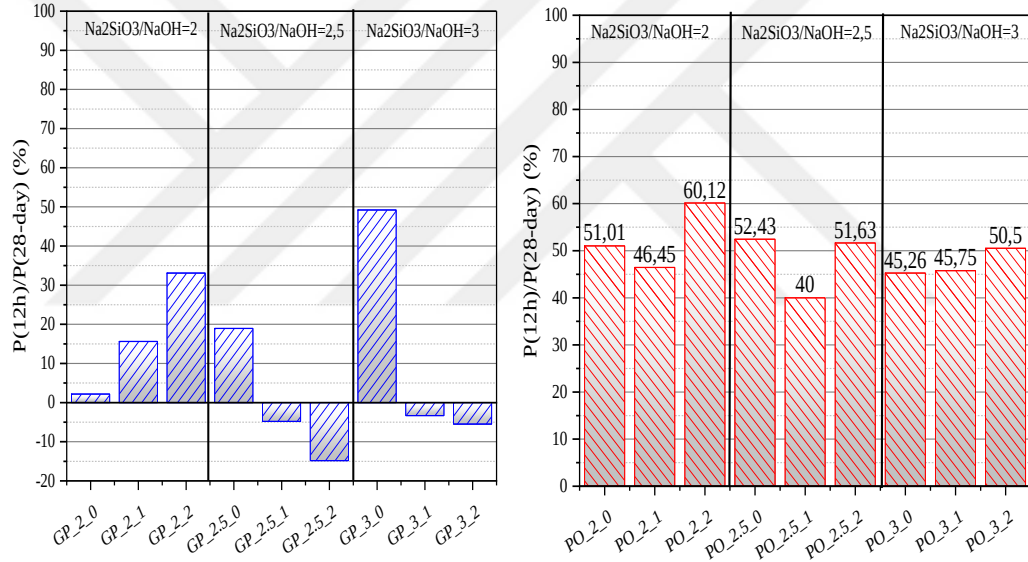
Şekil 41. Dökümden 12 saat sonra eğilme dayanımı sonuçları

Şekil 42'de 28 günde kürlenene numunelerin eğilme dayanımı sonuçları gösterilmektedir. Şekil 43'te 12 saat ve 28 günde kürlenene eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Hem pomza hem de genişletilmiş perlit içeren numunelerin eğilme dayanımı bazalt lif oranının artmasıyla artmaktadır. Pomza içeren numunelerin eğilme dayanımı, bazalt lif oranı %0'dan %1 ve %2'ye çıktığında $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2 olan numuneler için %22,81 ve %15,07; $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olan numuneler için %28,82 ve %37,86; $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 3 olan numuneler için %0,75 ve %6,79 artmıştır. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerin eğilme dayanımı, lif oranındaki artışla birlikte pomza içeren numunelere göre daha fazla artmıştır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2 olan numuneler için %68,77 ve %123,82; $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2,5 olan numuneler için %107,11 ve %284,96; $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 3 olan numuneler için %116,11 ve %231,49 oranında artmıştır.

28 gün kürlenene numunelerin eğilme dayanımı, 12 saat kürlenene numunelere kıyasla genel olarak azalmıştır. Pomza içeren ve 28 gün kürlenene numunelerin eğilme dayanımı, 12 saat kürlenene numunelere kıyasla %40,01 ile %60,02 arasında azalmıştır. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerin eğilme dayanımı %2,16 ile %49,21 arasında azalmıştır. Daha uzun kür süreleri, örneğin 28 gün, betonun kurumması ve büzölmeye maruz kalması için ek süre sağlar. Kürleme süreci ilerledikçe betondan nem kaybedilir, bu da kuruma büzölmesine ve potansiyel mikro çatlamalara neden olabilir. Büzölmeye bağlı bu stres, daha kısa kür sürelerine kıyasla betonun eğilme dayanımında azalmaya yol açabilir. Uzun kür süreleri genellikle geopolimer matrisin hidratasyonunun ve olgunlaşmasının devam etmesine izin vererek dayanımın artmasına katkıda bulunsa da, geopolimer beton için daha fazla hidratasyonun dayanımı önemli ölçüde artırmadığı optimum bir kür süresi olabilir. Aşırı kürleme, aşırı doygunluğa veya mikro yapıda değişikliklere neden olabilir ve bu da eğilme dayanımını olumsuz etkileyebilir. Uzun süreli kürleme, nem kaybı ve devam eden kimyasal reaksiyonlar nedeniyle beton içinde iç gerilmelere yol açabilir. Bu iç gerilmeler, artan porozitelilik, çatlak oluşumu veya agrega ile geopolimer matris arasındaki arayüzey bağında değişiklikler gibi mikroyapısal değişikliklere neden olma potansiyeline sahiptir. Nihayetinde, bu değişiklikler eğilme dayanımında azalmaya yol açabilir. Literatürdeki birçok çalışmada, geopolimer karışımına bazalt lif ilavesinin eğilme dayanımını artırdığı bildirilmiştir (Soloni et al. 2020; Ziada et al. 2021; Kabay vd. 2014; Liu et al. 2019; Abbass 2021).



Şekil 42. Dökümden 28 gün sonra eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 43. 12 saatlik ve 28 günlük eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Yüksek sıcaklık etkisi

Ağırlık kaybı

Tablo 16 ve Tablo 17, 15 saat ve 28 gün yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak kürlenmiş numunelerin ağırlık kaybını göstermektedir. Tablo 16 ve Tablo 17'den de görülebileceği gibi, hem pomza hem de genişletilmiş perlit içeren numunelerin ağırlık kaybı sıcaklık değeri arttıkça artmıştır. Özellikle 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin ağırlığı önemli ölçüde azalmıştır. Çünkü geopolimer malzemeler yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında termal ayrışma yaşarlar. Bu süreç, geopolimer bağlayıcının parçalanmasını, kimyasal olarak bağlı suyun serbest kalmasını ve diğer kimyasal dönüşümlerle birlikte dehidroksilasyona uğramasını içerir. Sıcaklık arttıkça, bu ayrışma betonda gözlenen ağırlık kaybına katkıda

bulunur. Yüksek sıcaklıklar ayrıca geopolimer matrisi içinde yapısal değişikliklere ve faz geçişlerine neden olur. Bu değişiklikler, amorf geopolimer yapısının kristal fazlara dönüşmesini veya kimyasal bağlarda değişiklikleri içerebilir, bu da gazların salınmasına neden olur ve ağırlık kaybına daha fazla katkıda bulunur. Geopolimer malzemeler genellikle yapılarında hidroksil grupları (OH) ve su molekülleri içerir. Yüksek sıcaklıklarda hidroksilasyon ve dehidratasyon işlemleri gerçekleşerek hidroksil gruplarının ve bağlı su moleküllerinin buhar veya diğer gaz yan ürünler olarak salınmasına neden olur. Gazların ve su moleküllerinin bu şekilde salınması malzemede ağırlık kaybına yol açar. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar termal stres nedeniyle beton matris içindeki porozitelerin genişlemesine veya daralmasına neden olabilir. Bu genişleme, sıkışan gazların salınmasına veya kalan nemin dışarı çıkmasına neden olarak gözlemlenen ağırlık kaybına daha fazla katkıda bulunabilir. Pomza içeren numunelerde 150 °C'ye maruz kaldıktan sonra ortalama %3 ağırlık kaybı olmasına rağmen, maruz kalınan sıcaklığın 300 °C ve 600 °C'ye çıkarılması durumunda ağırlık kaybı sırasıyla %18 ve %21'dir. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerde ise 150 °C'den sonra ağırlık kaybı yaklaşık %4 olmasına rağmen, 300 °C ve 600 °C'den sonra ağırlık kaybı oranı %21 ve %25'e çıkmaktadır. Genleştirilmiş perlit ve pomza içeren numunelerin kürlenme süresinin kısa olması durumunda, yüksek sıcaklık sonrasında birbirine yakın ağırlık kaybı kaydedilmiştir.

Tablo 18'te 15 saat ve 28 gün kürlenmiş numunelerin ağırlık kaybı oranlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Pomza ve genleştirilmiş perlit içeren 28 günlük kürlenmiş numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı 15 saatlik numunelerin ağırlık kaybına yakındır. 150 °C'de yaklaşık %4, 300 °C'de yaklaşık %20 ve 600 °C'de yaklaşık %25 ağırlık kaybı kaydedilmiştir.

Tablo 16. Dökümden 15 Saat Sonra Ağırlık Kaybı Sonuçları (%)

Numune ismi	150 °C	300 °C	600 °C	Numune ismi	150 °C	300 °C	600 °C
PO_2_0	3,36	19,09	22,55	GP_2_0	4,09	22,07	26,38
PO_2_1	2,94	18,80	22,46	GP_2_1	3,58	20,88	26,2
PO_2_2	3,51	18,80	22,27	GP_2_2	3,53	21,05	26,54
PO_2.5_0	3,90	18,26	22,55	GP_2.5_0	4,09	20,62	26,1
PO_2.5_1	3,96	19,30	21,93	GP_2.5_1	4,5	21,73	26,87
PO_2.5_2	3,91	18,64	21,55	GP_2.5_2	4,36	21,23	25,66
PO_3_0	3,91	18,42	22,51	GP_3_0	4,86	20,98	25,79
PO_3_1	4,31	17,17	21,88	GP_3_1	4,6	21,49	25,71
PO_3_2	4,05	18,42	21,93	GP_3_2	4,5	21,88	26,22

Tablo 17. Dökümden 28 Saat Sonra Ağırlık Kaybı Sonuçları (%)

Numune ismi	150 °C	300 °C	600 °C	Numune ismi	150 °C	300 °C	600 °C
PO_2_0	4,20	20,60	24,24	GP_2_0	4,48	23,45	27,52
PO_2_1	4,27	20,50	24,57	GP_2_1	4,82	21,21	28,00
PO_2_2	4,62	20,43	24,68	GP_2_2	4,68	21,49	28,07
PO_2.5_0	4,98	20,09	24,03	GP_2.5_0	4,98	22,17	36,29
PO_2.5_1	5,17	20,08	24,24	GP_2.5_1	4,26	23,42	27,93
PO_2.5_2	4,72	20,34	23,93	GP_2.5_2	4,89	21,83	27,51
PO_3_0	4,18	20,43	23,73	GP_3_0	5,48	21,10	27,93
PO_3_1	4,66	20,87	23,50	GP_3_1	5,58	21,30	26,70
PO_3_2	3,98	19,65	22,17	GP_3_2	5,56	20,61	27,11

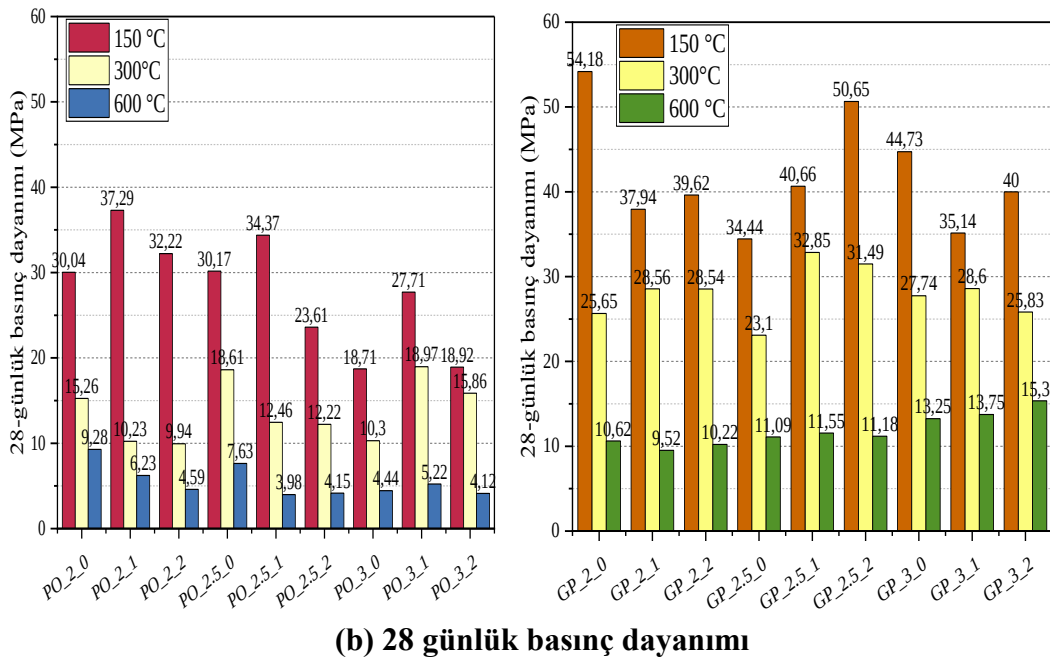
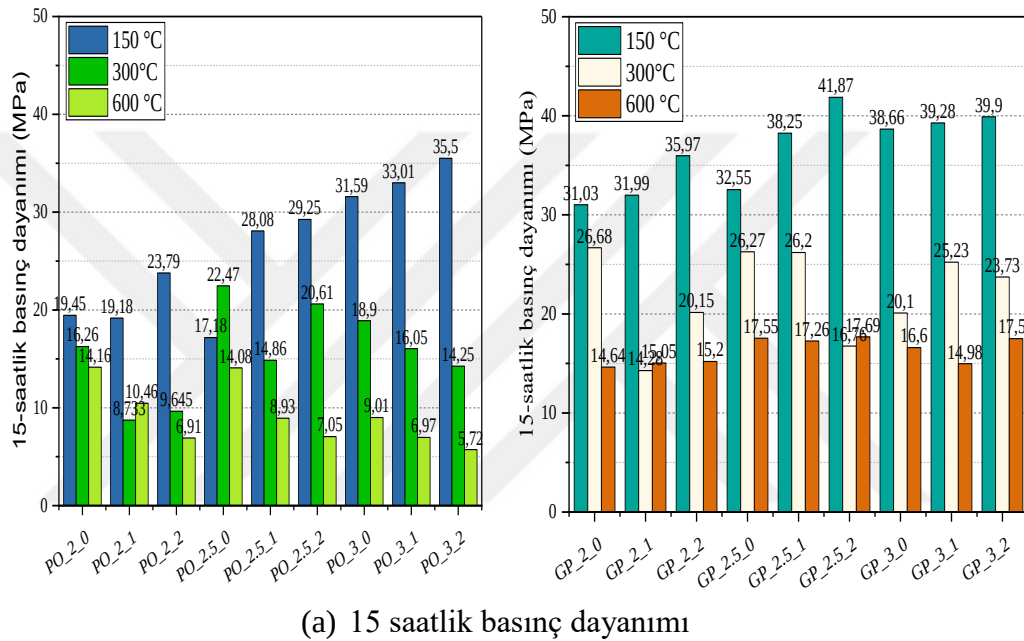
Tablo 18. Yüksek Sıcaklık Sonrası Ağırlık Kaybının Karşılaştırılması

Numune ismi	150 °C	300 °C	600 °C	Numune ismi	150 °C	300 °C	600 °C
	28-gün/15-saat	28-gün/15-saat	28-gün/15-saat		28-gün/15-saat	28-gün/15-saat	28-gün/15-saat
PO_2_0	1,25	1,08	1,07	GP_2_0	1,10	1,06	1,04
PO_2_1	1,45	1,09	1,09	GP_2_1	1,34	1,02	1,07
PO_2_2	1,32	1,09	1,11	GP_2_2	1,32	1,02	1,06
PO_2.5_0	1,28	1,10	1,07	GP_2.5_0	1,22	1,07	1,39
PO_2.5_1	1,30	1,04	1,11	GP_2.5_1	0,94	1,08	1,04
PO_2.5_2	1,21	1,09	1,11	GP_2.5_2	1,12	1,03	1,07
PO_3_0	1,07	1,11	1,05	GP_3_0	1,13	1,01	1,08
PO_3_1	1,08	1,22	1,07	GP_3_1	1,21	0,99	1,04
PO_3_2	0,98	1,07	1,01	GP_3_2	1,23	0,94	1,03

Basınç dayanımı ve basınç dayanımı kaybı

Şekil 44 a ve Şekil 44 b'de 15 saat ve 28 gün kürlenmiş numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçları gösterilmektedir. Hem 15 saat hem de 28 gün boyunca kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı, artan sıcaklığa maruz kalma ile azalmıştır. Özellikle 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımı önemli ölçüde azalmıştır. Çünkü yüksek sıcaklıklarda beton karışımındaki su buharlaşabilir veya kimyasal olarak değişerek beton matrisinin kurumasına neden olabilir. Bu süreç bağlayıcıların bozulmasına ve geopolimerin yapısının değişmesine yol açarak genel dayanımını zayıflatabilir. Betonun agregalar, bağlayıcılar ve porozite yapıları gibi farklı bileşenlerinin diferansiyel termal genleşmesi ve büzülmesi, gerilme konsantrasyonlarına ve mikro çatlaklara yol açabilir. Bu

mikro çatlaklar yayılabilir ve malzemenin dayanımını önemli ölçüde azaltabilir. Yüksek sıcaklıklar beton bileşenleri içinde faz dönüşümlerine yol açabilir. Örneğin, amorf bir malzeme olan metakaolin yüksek sıcaklıklarda kristalleşebilir veya faz geçişlerine uğrayarak geopolimer matrisin bütünlüğünü bozabilir ve dayanımını azaltabilir. Geopolimer karışımındaki organik malzemeler veya diğer katkı maddeleri yüksek sıcaklıklarda ayrışabilir veya yanabilir, bu da malzemenin yapısal bütünlüğünü kaybetmesine ve ardından dayanımının azalmasına neden olabilir. Yüksek sıcaklıklar geopolimer betonun poroziteliliğini ve yoğunluğunu etkileyebilir. Gaz genleşmesi veya organik malzemelerin ayrışması nedeniyle artan porozitelilik, malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatabilir.



Şekil 44. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı

15 saat kürlenmiş numunelerde agrega olarak pomza kullanılması durumunda yüksek sıcaklık sonrası dayanım kaybı geliştirilmiş perlitli numunelere göre daha az olmuştur. Hem geliştirilmiş perlit hem de pomzanın agrega olarak kullanıldığı ve 15 saat kürlenmiş numunelerde, alkali aktivatör oranındaki artışla birlikte yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı daha yüksektir. Başka bir deyişle, alkali aktivatör oranındaki artış, yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımını iyileştirmiştir. Öte yandan, 15 saat kürlenmiş numunelerde agrega olarak pomza, geliştirilmiş perlitin daha fazla dayanıma sahip olmuştur. Bunun nedeni, pomza ve geliştirilmiş perlitin tane şekillerinin ve boyutlarının önemli ölçüde farklılık göstermesidir. Geliştirilmiş perlitin tipik olarak küresel olmasına ve tek tip bir boyuta sahip olmasına rağmen, pomza düzensiz bir şekle ve boyuta sahiptir. Boyut ve şekildeki bu değişim, geopolimer bazlı malzemelerdeki performansları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, pomza partiküllerinin düzensiz şekli, geliştirilmiş perlitin aksine, geopolimer matrisin mekanik dayanımını arttırmada ve partiküller ile matris arasındaki kenetlenmeyi iyileştirmede önemli bir role sahiptir. Pomza tanelerinin daha pürüzlü yüzeyi ve artan poroziteliği de agrega ile geopolimer bağlayıcı arasında daha güçlü bir ilişkiye katkıda bulunarak daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olan geliştirilmiş perlite kıyasla daha fazla ağırlık aktarımı ve daha yüksek dayanım sağlar. Dikkate alınması gereken bir diğer kritik unsur da pomzanın geopolimer yapıştırıcı ile potansiyel kimyasal uyumluluğudur. Pomzadaki bazı mineraller bağlayıcı ile pozitif etkileşime girme kapasitesine sahiptir, bu daha güçlü bağlar oluşturur ve sonuçta basınç dayanımını artırır. Buna karşılık, geliştirilmiş perlit aynı derecede kimyasal uyumluluktan yoksundur. Termal özelliklerle ilgili olarak, pomza yalıtımda geliştirilmiş perlitin daha üstündür. Yalıtım özellikleri daha üstündür, bu da sıcaklığı daha fazla destekleyen bir ortamın korunmasına yardımcı olur, bu özellikle kürleme işlemi sırasında faydalıdır. Sonuç olarak, pomza geliştirilmiş perlite kıyasla betonun dayanımını artırmaya katkıda bulunur. Son olarak, pomza perlite kıyasla daha düşük su emmesi gösterir. Geliştirilmiş perlitin artan su emmesi, geopolimer bağlayıcının hidrasyon sürecini etkileyerek dayanım gelişiminde farklılıklara yol açabilir. Bu nedenle, pomzanın daha az nem emmesi bu bağlamda avantajlı olarak değerlendirilebilir.

Tablo 19 a ve Tablo 19 b'de 15 saat ve 28 gün kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı kaybı sonuçları gösterilmektedir. Numunelerin basınç dayanımı kaybı, 75 °C'de 8 saat kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. Pomzanın agrega olarak kullanıldığı ve hem 15 saat hem de 28 gün boyunca kürlenmiş numunelerde, 150 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra dayanımda bir artış gözlenmiştir. Özellikle 15 saat kürlenmiş pomza ve geliştirilmiş perlitli numuneler 150 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra dayanım artışı göstermiştir. 150 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra pomza numunelerinde ortalama %15,

genleştirilmiş perlit numunelerinde ise %30 dayanım artışı gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık, geopolimer matris içinde ilave kürlenme ve puzolanik reaksiyonları teşvik etmiş olabilir. 150 °C'de alkali aktivatörler, cüruf, metakaolin ve geopolimerin diğer bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonlar hızlanarak dayanım gelişiminin artmasına yol açmış olabilir. Isı, geopolimer betonun yapısında değişikliklere yol açmış olabilir. Bu, partiküllerin yeniden düzenlenmesini, matrisin daha fazla sıkışmasını veya dayanım artışına katkıda bulunan diğer yapısal değişiklikleri içerebilir. Geopolimer matris, daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kristal bileşiklerin büyümesini veya gelişmesini deneyimleyebilir. Bu kristaller bağlanma ve mekanik özellikleri geliştirme potansiyeline sahiptir ve sonuçta dayanım artışı sağlar. Betonun kontrollü sıcaklıklara maruz bırakılmasıyla, termal genişleme ve büzülmeden kaynaklanan iç gerilimler hafifletilebilir. Bu gerilimin azaltılması, malzemenin genel dayanımının iyileştirilmesine daha fazla katkıda bulunabilir. Bununla birlikte, hem genleştirilmiş perlit hem de pomza numunelerinin basınç dayanımları, maruz kalınan sıcaklık 300 °C ve 600 °C'ye çıkarıldığında azalmıştır. Tablo 4.6 a'dan görülebileceği gibi, 15 saat kürlenmiş ve agrega olarak pomza kullanılan numunelerin basınç dayanımı 300 °C ve 600 °C'ye maruz kaldıktan sonra sırasıyla ortalama %35 ve %52 oranında azalmıştır. Agrega olarak genleştirilmiş genleştirilmiş perlit kullanılan numunelerde ise 300 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı ortalama %46 ve %69 oranında azalmıştır. Öte yandan, tablo 4.6 b'de görüldüğü gibi, agrega olarak pomzanın kullanıldığı ve 28 gün boyunca kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı 300 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ortalama %21 ve %65 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, agrega olarak genleştirilmiş perlit kullanılan ve 28 gün boyunca kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı 300 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ortalama %55 ve %81 oranında azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinin artmasıyla basınç dayanımının azaldığı birçok çalışmada belirtilmiştir (Hasnaoui vd. 2021; Karakoç 2013). Öte yandan, yüksek sıcaklığın etkisinin geopolimer betonun basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu da bildirilmiştir (Demirboğa vd. 2001; Ameri et al. 2019).

Tablo 19. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Kaybı

Numune ismi	150 °C Dayanım Kaybı %	300 °C Dayanım Kaybı %	600 °C Dayanım Kaybı %	Numune ismi	150 °C Dayanım Kaybı %	300 °C Dayanım Kaybı %	600 °C Dayanım Kaybı %
GP_2_0	43,67	52,91	58,99	PO_2_0	23,9	34,57	64,1
GP_2_1	47,23	75,97	71,22	PO_2_1	15,99	62,5	60,47
GP_2_2	26,91	70,36	78,77	PO_2_2	-7,83	39,59	54,53
GP_2.5_0	33,53	13,07	45,53	PO_2.5_0	-1,24	18,46	45,53
GP_2.5_1	14,46	54,73	72,79	PO_2.5_1	1,84	32,76	55,7
GP_2.5_2	13,17	38,82	79,06	PO_2.5_2	-25,13	49,91	47,13
GP_3_0	-65,73	0,83	52,73	PO_3_0	-51,42	21,26	34,97
GP_3_1	-18,27	42,49	75,01	PO_3_1	-20,38	22,67	54,09
GP_3_2	29,88	71,85	88,7	PO_3_2	-3,42	38,49	54,61

(a) 15 saatlik basınç dayanımı kaybı

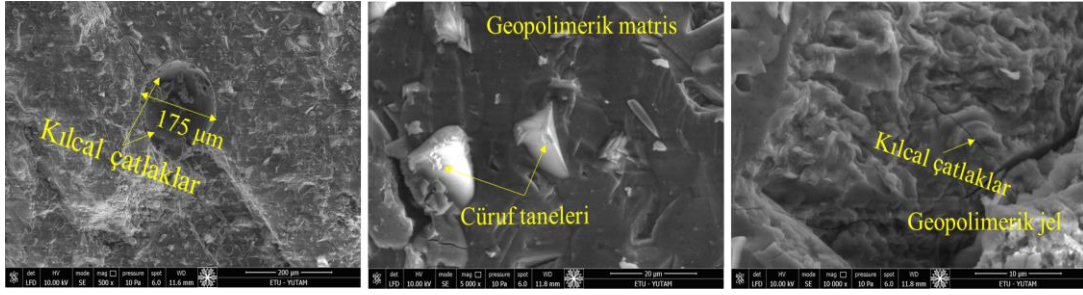
Numune ismi	150 °C Dayanım Kaybı %	300 °C Dayanım Kaybı %	600 °C Dayanım Kaybı %	Numune ismi	150 °C Dayanım Kaybı %	300 °C Dayanım Kaybı %	600 °C Dayanım Kaybı %
GP_2_0	13	55,8	73,1	PO_2_0	-32,85	37,1	73,95
GP_2_1	-2,58	71,85	82,84	PO_2_1	0,36	25	74,97
GP_2_2	1,01	69,46	85,8	PO_2_2	-18,76	14,44	69,36
GP_2.5_0	-16,71	28	70,47	PO_2.5_0	-6,89	28,3	65,68
GP_2.5_1	-4,69	62,04	87,85	PO_2.5_1	-4,33	15,7	70,36
GP_2.5_2	29,91	63,72	87,66	PO_2.5_2	-51,37	5,88	66,58
GP_3_0	1,83	45,96	76,67	PO_3_0	-75,2	-8,65	48,1
GP_3_1	0,71	32,03	81,27	PO_3_1	-7,69	12,35	57,86
GP_3_2	62,63	68,67	91,85	PO_3_2	-3,68	33,04	60,18

(b) 28 günlük basınç dayanımı kaybı

Mikroyapı Analizi

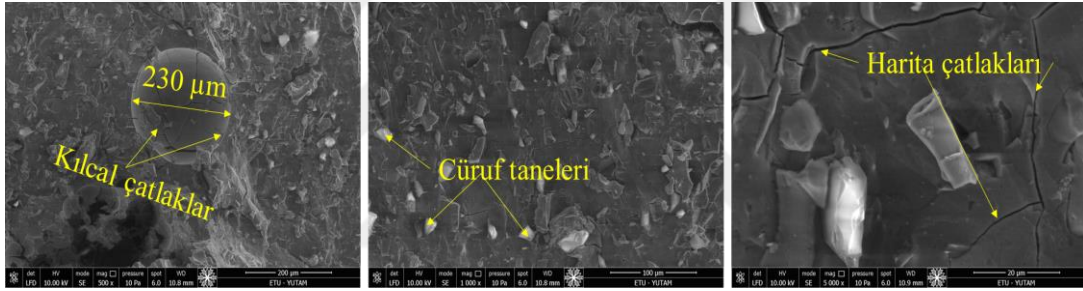
Isı ve su ile kürlenmiş numuneler

PO_2_0 numunesinin 75 °C'de ısıtılmış kürlenmiş mikroyapısı Şekil 45'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, geopolimerik matriste kuruma büzülmesine bağlı olarak kılcal çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca matris içerisinde 175 µm çapında hava boşlukları gözlenmiştir. Bu boşluklar genellikle küreseldir. SEM görüntülerinde geopolimerik matris içine gömülü 10 µm'den küçük ÖYFC (cüruf) partiküllerinin varlığı görülmektedir. SEM görüntülerinde matrisin oldukça yoğun olduğu da tespit edilmiştir.



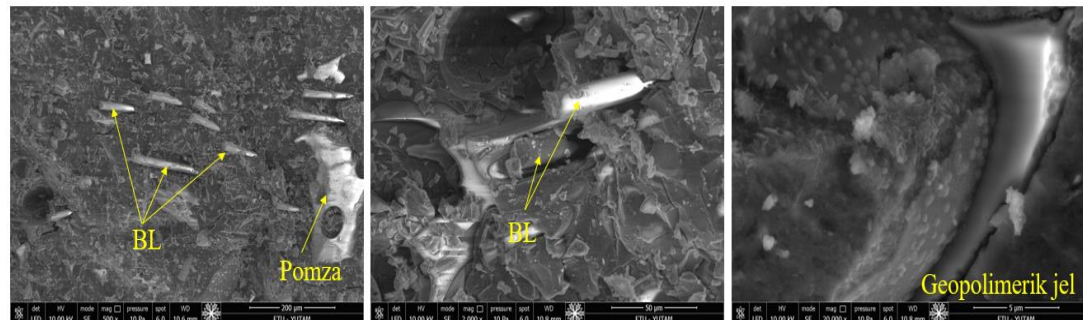
Şekil 45. Isıyla sertleşen PO_2_0'ın mikroyapısı

Şekil 46'da su ile kürlenmiş GP_2_0 numunesinin mikroyapısı gösterilmektedir. GP_2_0'a su kürü uygulanmasına rağmen, PO_2_0'a benzer mikroyapısal özellikler gözlenmiştir. Esas olarak, kuruma büzülmesine bağlı kılcal çatlaklar bu karışımda da gözlenmiştir. Ayrıca 200 µm'den daha büyük küresel hava boşlukları tespit edilmiştir. Ayrıca, geopolimerik matris içine gömülü çok sayıda cüruf taneciği gözlenmiştir. Kuruma büzülmesi çatlaklarının genellikle harita çatlakları şeklinde ve bir saç çizgisi kalınlığında olduğu gözlemlenmiştir.



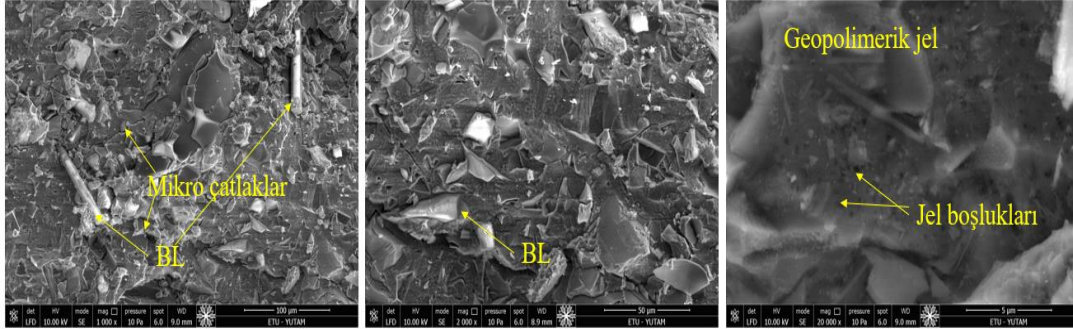
Şekil 46. Su ile kürlenmiş GP_2_0'ın mikroyapısı

Isıyla kürlenmiş PO_2.5_2 numunesinin mikroyapısı Şekil 47'de sunulmuştur. BL'nin kullanıldığı bu karışımda matris içerisine gömülü mikro BL'ler sıklıkla gözlenmektedir. Ayrıca matrise iyi bir aderansa sahip olduğu görülmektedir. 200-300 µm aralığındaki pomza tanelerinin matris içerisine gömülü olduğu ve matris ile iyi bir şekilde yapıştığı gözlemlenmiştir. Basınç ve eğilme etkilerinden dolayı bazı BL'lerin matristen sıyrıldığı tespit edilmiştir. Karışımlara uygulanan termal kür sayesinde geopolimerik jellerin oluştuğu tespit edilmiştir. Esas olarak ÖYFC sayesinde CSH jellerinin varlığına karar verilmiştir.



Şekil 47. Isıyla sertleşen PO_2.5_2'nin mikroyapısı

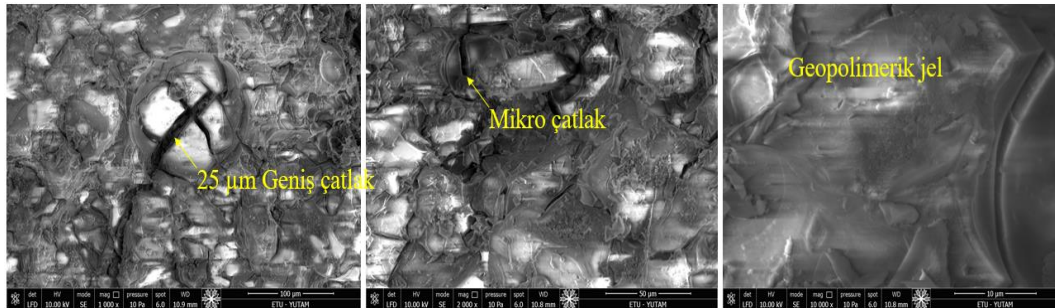
Su ile kürlenene ve genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak üretilen GP_2.5_2 numunesinin SEM görüntüleri Şekil 48'de verilmiştir. Matris içerisinde BL'lerin varlığı görülebilmektedir. Ayrıca, bazı liflerin dış yükler nedeniyle matrsten sıyrıldığı tespit edilmiştir. Genel olarak, BL'nin matrise aderansı iyidir. Bu karışımda SS/SH oranı 3 olduğu için geopolimerik matrisin daha yoğun olduğu ancak jel yüzeyinde nano boşluklar oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 48. Su ile kürlenene GP_2.5_2'nin mikroyapısı

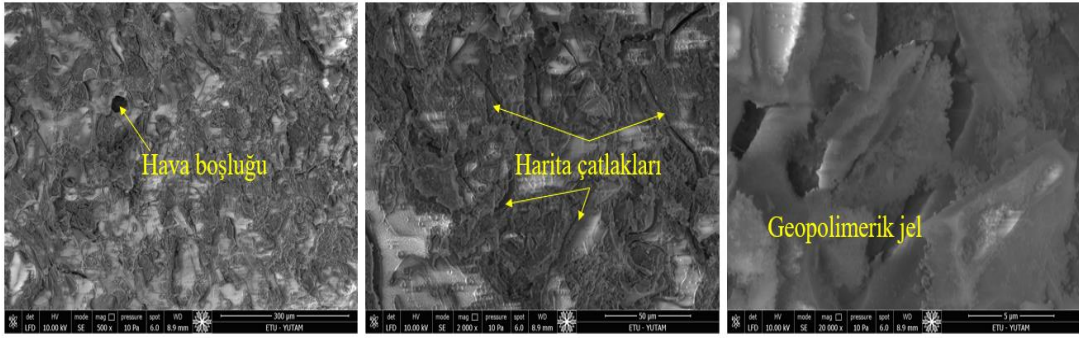
Yüksek sıcaklık etkisi

600 °C'ye maruz bırakılan PO_2_0 numunesinin mikroyapısı Şekil 49'da verilmiştir. Yüksek sıcaklık nedeniyle matris içerisinde çatlakların arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle 25 µm genişliğinde çatlaklar tespit edilmiştir. Bazı bölgelerde 600 °C sıcaklığa rağmen geopolimerik jeller gözlenmiştir. Ancak bu jellerdeki iğne benzeri yapıların genellikle kaybolduğu da tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklığın harita çatlakları ve kuruma büzülmesi oluşturduğu tespit edilmiştir.



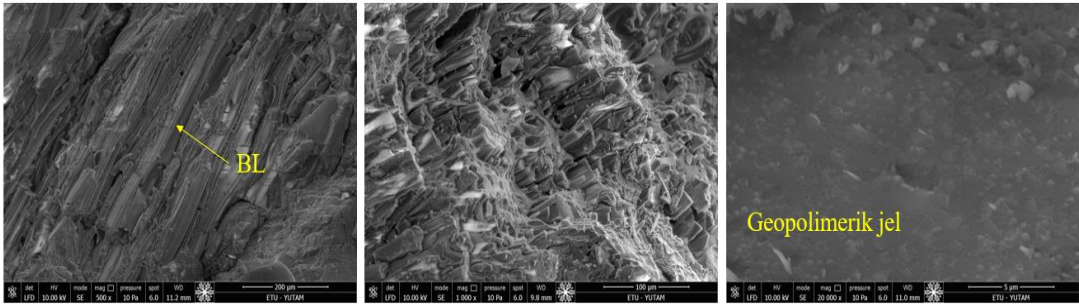
Şekil 49. 600 °C'ye maruz bırakılmış PO_2_0 (Isıl kürlenmiş) numunenin mikroyapısı

600 °C'den sonra suda kürlenene GP_2_0 karışımının mikroyapısı Şekil 50'de verilmiştir. Matris içinde yoğun harita çatlakları tespit edilmiş ve 5 µm'den daha küçük hava boşlukları gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi, kuruma büzülmesi sırasında oluşan harita çatlaklarının genişliğini ve çatlak sayısını artırmıştır. Su ile kürlenene geopolimer karışımlarında, geopolimerizasyon termal kürlenmeye göre daha düşük bir derecededir. Bu karışımlarda yüksek sıcaklığın etkisiyle geopolimerizasyon artmıştır. Bu nedenle geopolimerik jel yapısında iğne benzeri yapılar gözlenmiştir.



Şekil 50. 600 °C'ye maruz bırakılmış GP_2_0 (su ile kürlenmiş) numunesinin mikroyapısı

Benzer görüntüler 600 °C'ye maruz bırakılan PO_2,5_2 numunesinde de gözlemlenmiştir. PO_2,5_2 numunesi ısı kütleme ile elde edildiği için Şekil 51'de geopolimerik jelin daha fazla zarar gördüğü tespit edilmiştir. İğne benzeri yapılar 600 °C'de hasar nedeniyle çok fazla gözlemlenememiştir. Ancak matrisin yoğun olduğu gözlenmiştir. Ayrıca 600 °C sonrasında matris içerisine gömülmüş BL'ler tespit edilmiştir. BL'lerin yüksek erime sıcaklığı, geopolimer matris içindeki varlıklarını korumuştur.



Şekil 51. 600 °C'ye maruz bırakılmış PO_2,5_2 (ısıyla sertleştirilmiş) numunesinin mikroyapısı

Su ile kürlenlen GP_2.5_2 numunesinin 600 °C'ye maruz kalması nedeniyle matriste mikro çatlakların varlığı gözlenmiştir (Şekil 52). Matris içine gömülü BL'ler belirlenmiştir. BL'ler 600 °C'den sonra erimemiş ancak şekil değişikliğine uğramıştır. Bazı liflerin dairesel formlarının bozulduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca geopolimerik jel yüzeyinde çok sayıda jel boşluğu olduğu gözlenmiştir. Bu boşluklar genellikle SS/SH oranı 3 olan karışımlarda daha belirgin olarak gözlenmiştir.



Şekil 52. 600 °C'ye maruz bırakılmış GP_2.5_2 (su ile kürlenmiş) numunesinin mikroyapısı

SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı, agrega olarak genişletilmiş perlit ve pomza kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve metakaolin esaslı geopolimer betonun mekanik, fiziksel, yüksek sıcaklık ve mikroyapısı üzerinde bazalt lif ve alkali aktivatör oranlarının etkisini deneysel olarak araştırmaktır. Üç farklı alkali aktivatör oranının (2, 2.5 ve 3) ve üç farklı bazalt lif oranının (%0, %1 ve %2) genişletilmiş perlit ve pomza içeren geopolimer betonun mekanik ve fiziksel özellikleri ile mikroyapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek için basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için ağırlık, su emme, görünür porozite ve kılcal geçirimsizlik sonuçları hesaplanmıştır. Ayrıca, pomza ve genişletilmiş perlit içeren geopolimer betonun 150 °C, 300 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı ve ağırlık kaybı değerlendirilmiştir. Ayrıca, numuneler 12 saat ve 28 gün kür edilmiş ve iki farklı kür süresinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- I. Pomzanın agrega olarak kullanıldığı numunelerin ağırlık sonuçlarının 12 saat kürlenen numunelerde genişletilmiş perlitin agrega olarak kullanıldığı numunelere göre yaklaşık %11 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak kürleme süresinin artması yani 28 gün kürleme yapılması durumunda agrega olarak genişletilmiş perlit kullanılan numunelerin ağırlık sonuçlarının agrega olarak pomza kullanılan numunelerin ağırlık sonuçlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle, kısa kür süresinde pomza ağırlık üzerinde etkili olsa da, kür süresi arttıkça agrega olarak genişletilmiş perlit kullanımı ağırlık üzerinde daha etkili hale gelmiştir.
- II. Alkali aktivatör oranı ve bazalt lif oranının kılcal geçirimsizlik üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Agrega olarak pomza ve genişletilmiş perlit kullanımının kılcal geçirimsizlik değeri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir. Agrega olarak genişletilmiş perlit kullanılan numunelerin su emme oranı, agrega olarak pomza kullanılan numunelere göre %93 ila %329 daha yüksektir. Kür süresinin artırılması aradaki farkın değişmesine neden olmamıştır. Genleştirilmiş perlit kullanılan numunelerin su emme oranı, 28 gün kürlenen numunelerde pomzaya göre %17 ile %397 arasında daha yüksektir.

- III. Agregada olarak pomza yerine genleştirilmiş perlit kullanılması basınç dayanımını genel olarak %2 ila %25 oranında azaltmıştır. Pomzanın agregada olarak kullanıldığı numunelerde aktivatör oranının artırılması basınç dayanımını %20 artırmıştır. Bazalt lif oranının artırılması, alkali aktivatör oranı 2 olan numunelerde basınç dayanımını %6,62 ile %18,20 arasında azaltırken, alkali aktivatör oranı 2,5 ve 3 olan numunelerde basınç dayanımını %20 ile %51 arasında artırmıştır. Agregada olarak genleştirilmiş perlit kullanılan numunelerde alkali aktivatör oranının artırılması basınç dayanımını %9,68 ile %26,27 arasında artırmıştır. Alkali aktivatör oranının 2,5 ve 3 olduğu numunelerde bazalt lif oranının %0'dan %1 ve %2'ye çıkarılması basınç dayanımını sırasıyla %27 ila %30,33 ve %46,43 ila %165,63 oranında artırmıştır.
- IV. Alkali aktivatör oranının 2'den 2,5 ve 3'e çıkarılması eğilme dayanımını %8,14 ve %25,49 oranında azaltmıştır. Ayrıca, cüruf ve metakaolin esaslı geopolimer betonda agregada olarak genleştirilmiş perlit yerine pomza kullanılması eğilme dayanımını %57,56 ile %81,67 arasında azaltmıştır. Genel olarak 28 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanımı 12 saat kür edilen numunelere kıyasla azalmıştır. Pomza içeren numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı, 12 saatlik kür görmüş numunelere kıyasla %40,01 ile %60,02 arasında azalmıştır. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerin eğilme dayanımı %2,16 ile %49,21 arasında azalmıştır.
- V. Genleştirilmiş Perlit ve pomza içeren numunelerin kür süresinin kısa olması durumunda, yüksek sıcaklık sonrasında birbirine yakın ağırlık kaybı kaydedilmiştir. Pomza içeren numunelerde 150 °C'ye maruz kaldıktan sonra ortalama %3 ağırlık kaybı olmasına rağmen, maruz kalınan sıcaklığın 300 °C ve 600 °C'ye çıkarılması durumunda ağırlık kaybı sırasıyla %18 ve %21'dir. Genleştirilmiş perlit içeren numunelerde ise 150 °C'den sonra ağırlık kaybı yaklaşık %4 olmasına rağmen, 300 °C ve 600 °C'den sonra ağırlık kaybı oranı %21 ve %25'e çıkmaktadır.
- VI. Pomza ve genleştirilmiş perlit ile 15 saat kürlen numuneler 150 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra dayanım artışı göstermiştir. 150 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra pomzalı numunelerde ortalama %15, genleştirilmiş perlitli numunelerde ise %30 dayanım artışı gözlenmiştir. Ancak pomza ve genleştirilmiş perlitin agregada olarak kullanıldığı numunelerin basınç dayanımı 300 °C ve 600 °C gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle 28 gün kürlen numuneler 300 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakıldığında

pomza numunelerinde ortalama %81, genleştirilmiş perlit numunelerinde ise %65 oranında dayanım kaybı kaydedilmiştir.



KAYNAKÇA

- Abbass, M., & Singh, G. (2021). Fatigue analysis of rice husk ash and basalt fibre-based sustainable geopolymer concrete in rigid pavements. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5014-5022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.450>.
- Additive - Current Situation and Scenarios for its Use in Germany”, The Federal Association of the German Ready Mixed Concrete Industry, Germany, 2007. Applications, 558-568.
- Al Bakri Abdullah, M. M., Zarina, Y., Mohd Tahir, M. F., Hussin, K., Binhussain, M., & Sandhu, A. V. (2014). Fly ash based lightweight geopolymer concrete using foaming agent technology. *Applied Mechanics and Materials*, 679, 20-24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.679.20>
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., & Cundy, A. B. (2017). Tensile properties of a novel fibre reinforced geopolymer composite with enhanced strain hardening characteristics. *Composite Structures*, 168, 402-427. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.085>.
- Ameri, F., Shoaie, P., Zareei, S. A., & Behforouz, B. (2019). Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. *Construction and Building Materials*, 222, 49-63. <https://doi.org/10.1016/J.conbuildmat.2019.06.079>.
- Ameri, F., Zareei, S. A., & Behforouz, B. (2020). Zero-cement vs. cementitious mortars: An experimental comparative study on engineering and environmental properties. *Journal of Building Engineering*, 32, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101620>.
- Anonim a, 2024 URL:<https://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/yuksekk-firin-curufu>
- Anonim b, 2024 URL: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza>
- Anonim c, 2024 URL:<http://www.gardenpomza.com/pomza-bims-kullanım-alanlari-7.html>
- Anonim d, 2024 URL <https://www.mta.gov.tr/v3.0/hizmetler/maden-yataklari>
- Anonim e, 2024 Beş Yıllık Kalkınma Planı Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu
- Anonim f, 2024 D.P.T 2001 Planlama Teşkilatı. 8. Kalkınma Planı (2001-2005) Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara, 2001.
- Anonim g, 2024 Perlit Kaynakları. 2019 Perlit URL <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgimerkezi/perlit>. (Erişim tarihi:11. 03. 2022), 2019.
- Anonim h, 2024 URL:<https://www.milliyet.com.tr/egitim/haritalar/turkiye-perlit-madeni-haritasi-perlit-nedir-perlit-nerede-bulunur-ve-kullanım-alanlari-nelerdir-6311048>), Woodhead Publishing,.
- Anonim ı, 2024 DPT, 2001 “Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza, Perlit, Vermikülit, Flogopit, Genleşen Killer)”, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık (2001-2005) Kalkınma Planı, DPT:2617 - ÖİK: 628, Ankara, (2001).
- Anonim i, 2024 URL: <http://www.basaltex.com/en/applications.aspx>, 31 Mayıs 2016.

- Anonim j, 2024 URL: <http://www.technobasalt.com/applications/>, 31 Mayıs 2016.
- Anonim k, 2024 URL: <http://www.spinteks.com/tr~urun~160~bazalt.html>, 31 Mayıs 2016.
- Ariyaratne, I. E., Ariyanayagam, A., & Mahendran, M. (2022). Bushfire-resistant lightweight masonry blocks with expanded perlite aggregate. *Fire*, 5(5), 132. <https://doi.org/10.3390/fire5050132>
- Artemenko, S.E. ve Y.A., Kadykova, Polymer Composite Materials Based on Carbon, Basalt, and Glass Fibres, *Fibre Chemistry*, 40, 1 (2008).
- Asayesh, S., Javid, A. A. S., Ziari, H., & Mehri, B. (2021). Evaluating fresh state, hardened State, thermal expansion and bond properties of geopolymers for the repairing of concrete pavements under restrained conditions. *Construction and Building Materials*, 292, 123398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123398>
- Asrani, N. P., Murali, G., Abdelgader, H. S., Parthiban, K., Haridharan, M. K., & Karthikeyan, K. (2019). Investigation on mode I fracture behavior of hybrid fiber-reinforced geopolymer composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 8545-8555. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04074-4>.
- Asrani, N. P., Murali, G., Parthiban, K., Surya, K., Prakash, A., Rathika, K., & Chandru, U. (2019). A feasibility of enhancing the impact resistance of hybrid fibrous geopolymer composites: Experiments and modelling. *Construction and Building Materials*, 203, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.072>.
- ASTM C109 (2020). Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using 50 mm cube specimen), of hydraulic-cement mortars.
- ASTM C348 (2019). Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, Annu book ASTM Stand 04.01.
- ASTM C618 (2010). Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use, Annu, B. ASTM Stand.
- ASTM C642 (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, Annu, B. ASTM Stand.
- Aydın, S., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Curufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Aygörmez, Y. 2018 “Kolemanit Atığı ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2018).
- Ayşe İlayda Uğurlu 2020. yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine geri dönüştürülmüş agreganın etkisi s. 7-8
- Aziz, A., Benzaouak, A., Bellil, A., Alomayrı, T., Ieae, H., Achab, M., & Fekhaoui, M. (2021). Experimental study on the synthesis and characterization of volcanic rocks (pozzolan and perlite)-based geopolymers. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-316741/V1>
- Aziz, A., Benzaouak, A., Bellil, A., Alomayrı, T., Ieae, H., Achab, M., & Fekhaoui, M. (2021). Experimental study on the synthesis and characterization of volcanic rocks (pozzolan and perlite)-based geopolymers. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-316741/V1>
- Aziz, A., Bellil, A., El Hassani, I. E. E. A., Fekhaoui, M., Achab, M., Dahrouch, A., & Benzaouak, A. (2021). Geopolymers based on natural perlite and kaolinic clay from

- Morocco: Synthesis, characterization, properties, and applications. *Ceramics International*, 47(17), 24683-24692. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.190>
- Azizi S. 2007 Perlit Katkılı Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2007.
- Baradan, S.A., Yazıcı, H., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları. İzmir Aydın, S., 2010.).
- Baran, P., Nazarko, M., Włosińska, E., Kanciruk, A., & Zarębska, K. (2021). Synthesis of geopolymers derived from fly ash with an addition of perlite. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126112>
- Boyacı, Ö., 2018 "Farklı Kaolenlerin Metakaolen ve Spinel Yapılarda Geopolimer Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, (2018).
- Cao, Y. F., Tao, Z., Pan, Z., & Wuhler, R. (2018). Effect of calcium aluminate cement on geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 191, 242-252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.204>
- Castel, A., & Foster, S. J. (2015). Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.016>.
- Davidovits, J. (1984). X-ray analysis and X-ray diffraction of casing stones from the pyramids of Egypt, and the limestone of the associated quarries. In *Science in Egyptology Symposia*, 1984 (pp. 511-520).
- Davidovits, J. (2008). "Scientific tools, X-rays, FTIR, NMR. In J. Davidovits(ed) *Geopolymer. Chemistry and applications*, " Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France., 61– 76.
- Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *J. Ceram. Sci. Technol*, 8(3), 335-350.
- Davidovits, J., 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J., 2015. Institut Geopolymere, Saint-Quentin. *Geopolymer Chemistry &*
- Davidovits, J., Huaman, L., & Davidovits, R. (2019). Ancient geopolymer in south-American monument. SEM and petrographic evidence. *Materials Letters*, 235, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.033>.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., & Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00615-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00615-9).
- Duxon, P., van Deventer J.S.J. ve Provis J.L. (2008). Commercialisation of geopolymer concrete in Australia: From market push to market pull, *Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings* (Ed:Bellosi A., Babini G.N.), Institute of Science and Technology for Ceramics, National Research Council, Verona, Italy, 713- 721

- 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 Materyal Science*, 42, 2917-2933.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M. ve Deventer, J. S. J.(2005). Understanding The Relationship Between Geopolymer 56 Composition, Microstructure And Mechanical Properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 269, 47-58)
- El Mir, A., & Nehme, S. G. (2017). Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 156, 507-517. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.103>.
- Emiroğlu M., Koçak Y., Subaşı S.,(2011) YFC nin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi, *International Advanced Technologies Symposium Elazığ, Türkiye*
- EN 1015-18. (2002). Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 18: Determination of Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar.
- Fu, Y., Cai, L., & Yonggen, W. (2011). Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3144-3148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006>.
- Ganesan, N., Babu, C. R., & Meyyappan, P. L. (2019). Influence of alkaline activator ratio on compressive strength of GGBS based geopolymer concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 561, No. 1, p. 012083). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012083>
- Ganesh, A. C., & Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124543>
- González, A. K., Montaña, A. M., González, C. P., & Santos, A. (2017). Structural and mechanical study of concrete made from cementitious materials of low environmental impact. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 935, No. 1, p. 012015). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012015>
- Gümülcine, T., İzofalik Polyester Reçine Matrisli Sürekli E-Camı ve Bazalt Fiber Destekli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- Hadi, M. N., Farhan, N. A., & Sheikh, M. N. (2017). Design of geopolymer concrete with GYFC at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140, 424-431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.131>
- Hadi, M. N., Zhang, H., & Parkinson, S. (2019). Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability. *Journal of Building engineering*, 23, 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.02.006>
- Hasnaoui, A., Ghorbel, E., & Wardeh, G. (2021). Performance of metakaolin/slag-based geopolymer concrete made with recycled fine and coarse aggregates. *Journal of Building Engineering*, 42, 102813. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102813>.
- Hristov, Y., Kostadinov, Y., Pashev, P., & Bogdanov, B. (2014). Obtaining of Lightweight Geopolymer Using Ash from Thermal Power Plants. *Advances in Science and Technology*, 92, 68-73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.92.68>

- Hu, S. G., Wu, J., Yang, W., He, Y. J., Wang, F. Z., & Ding, Q. J. (2009). Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete. *Journal of Central South University of Technology*, 16, 914-918. <https://doi.org/10.1007/S11771-009-0152-X>
- Jamal, A. S., Bzeni, D. K., & Shi, J. Thermal and mechanical performance of lightweight geopolymer concrete with pumice aggregate. *Structural Concrete*.
- Kabay, N. (2014). Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, 50, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.040>.
- Kabay, N., Mert, M., Miyan, N., & Omur, T. (2021). Pumice as precursor in geopolymer paste and mortar. *Journal of Civil Engineering and Construction*, 10(4), 225-236. <https://doi.org/10.32732/JCEC.2021.10.4.225>
- Kantarcı, F., Türkmen, I., & Ekinci, E. (2019). Optimization of production parameters of geopolymer mortar and concrete: A comprehensive experimental study. *Construction and Building Materials*, 228, 116770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116770>
- Karakoç, M. B. (2013). Effect of cooling regimes on compressive strength of concrete with lightweight aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 41, 21-25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.104>
- Kaya, E. S. (2019). Ham Perlit ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Kullanılabilirliği. Balıkesir: Ulusal Tez Merkezi. Şubat 23, 2022 tarihinde alındı
- Kayhan, A.H., Haldenbilen, S., Aydın, Y., Uslu, A., Shved, O., Bazalt Lifli Donatı Çubuklarının Mekanik Özelliklerinin Betonarme Elemanların Davranışına Etkisi, İMO Denizli Dergisi, Sayı 66, s. 44-48, 2011
- Kioupis, D., Skaropoulou, A., Tsivilis, S., & Kakali, G. (2022). Properties and durability performance of lightweight fly ash based geopolymer composites incorporating expanded polystyrene and expanded perlite. *Ceramics*, 5(4), 821-836. <https://doi.org/10.3390/ceramics5040060>
- Kürklü, G. (2016). The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar. *Composites part b: engineering*, 92, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.043>.
- Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2019). A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Construction and Building Materials*, 221, 514-526. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076>
- Liu, G., Bai, E., Xu, J., Wang, T., & Chang, S. (2019, July). Experimental study on early strength of polymer concrete reinforced by basalt fiber content and age. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 295, No. 4, p. 042033). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/4/042033>.
- Luga, E. 2015, "Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Özellikleri", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (2015).
- M. Tokyay ve K. Erdoğan, 2011 "Cüruflar ve cürufllu çimentolar, araştırmaların gözden geçirilmesi ve durum değerlendirmesi raporu", TÇMB/AR-GE/Y 97.2, ANKARA, 2011.
- Ma, C. K., Awang, A. Z., & Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>.

- Mahmood, A., Noman, M. T., Pechočiaková, M., Amor, N., Petrú, M., Abdelkader, M., ... & Hassan, S. Z. U. (2021). Geopolymers and fiber-reinforced concrete composites in civil engineering. *Polymers*, 13(13), 2099. <https://doi.org/10.3390/polym13132099>
- Mobasheri, F., Shirzadi Javid, A. A., Mirvalad, S., Azizi, S., & Mowlaei, R. (2022). Durability and mechanical properties of pumice-based geopolymers: a sustainable material for future. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(1), 223-235. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00651-6>
- Mohabbi, M. (2019). Investigation of sulfates effects in perlite-based geopolymer. *Structural Concrete*, 20(4), 1402-1410. <https://doi.org/10.1002/suco.201900039>
- Montaño, A. M., González, C. P., Castro, D., Baron, G., & Atencio, R. (2017). Inclusion of geopolymers derivate from fly ash and pumice in reinforced concrete. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 935, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012016>
- MTA 2020 Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. Dünyada ve Türkiye’de Pomza. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 2020; 32 s.
- NİSA YAZICI Davidovits, J., 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441. Davidovits, J., 1991. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- NİSA YAZICI Singh, N. B., Middendorf, B., 2020. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- Occhipinti, R., Strosio, A., Finocchiaro, C., Fugazzotto, M., Leonelli, C., Faro, M. J. L., ... & Mazzoleni, P. (2020). Alkali activated materials using pumice from the Aeolian Islands (Sicily, Italy) and their potentiality for cultural heritage applications: Preliminary study. *Construction and Building Materials*, 259, 120391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120391>
- Palomo, A.A, Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T. (1999) Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Pasupathy, K., Ramakrishnan, S., & Sanjayan, J. (2020). Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 264, 120713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120713>
- Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–YFC geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.001>
- Posi, P., Thongjapo, P., Thamultree, N., Boontee, P., Kasemsiri, P., & Chindaprasirt, P. (2016). Pressed lightweight fly ash-PÇ geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 127, 450-456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.105>
- Presley, G.C., 2006. Pumice, Pumicite And Volcanic Cinder, *Industrial Minerals And Rocks; Commodities, Markets And Uses* (7th edition), 743-754.
- Sachet, W. H., & Salman, W. D. (2020, November). Compressive Strength Development of Slag-Based Geopolymer Paste Reinforced with Fibers Cured at Ambient Condition. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 928, No. 2, p. 022117). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/2/022117>

- Sakulich, A. R. (2011). Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. *Sustainable Cities and Society*, 1(4), 195-210. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.07.009>.
- Sebnem Sevil ARPACI^{1*}, Ergün GÜNTEKİN¹ Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- Shaikh, F., & Haque, S. (2018). Behaviour of carbon and basalt fibres reinforced fly ash geopolymer at elevated temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0267-2>.
- Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D., 2006. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Taylor & Francis London, 6-22.
- 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.
- Singha, K., A Short Review on Basalt Fiber, *International Journal of Textile Science* 1,4 (2012) 19-28.
- Sivakumar, A., & Srinivasan, K. (2014). High performance fibre reinforced alkali activated slag concrete. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8(12), 1288-1291.
- Sokołowska, J. J., Woyciechowski, P. P., Łukowski, P., & Kida, K. (2015). Effect of perlite waste powder on chemical resistance of polymer concrete composites. *Advanced materials research*, 1129, 516-522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1129.516>
- Soloni., Parveen., & Pham, T. M. (2020). Enhanced properties of high-silica rice husk ash-based geopolymer paste by incorporating basalt fibers. *Construction and Building Materials*, 245, 118422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118422>.
- Swink M., Continuous Filament Basalt A Unique Fiber Capable of Leadership in High Temperature Applications, *Kuzey Amerika Tekstil Sempozyumu*, Atlanta, GA, USA, Nisan, 2002.
- Ş. Erdoğan, Ş. Kurbetci, 2003 “Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri”, *Türkiye Muhendislik Haberleri*, c. 426, sayı 4, ss. 115-120, 2003.
- Şahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). Effect of basalt fiber on metakaolin-based geopolymer mortars containing rilm, basalt and recycled waste concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 301, 124113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124113>
- Taxiarchou, M., Dedeloudis, C., Karalis, A., Panagiotopoulou, C., & Panias, D. (2013). Study on the suitability of volcanic amorphous aluminosilicate rocks (perlite) for the synthesis of Geopolymer-based concrete. <https://doi.org/10.1520/STP156620120077>
- Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., & Amin, M. (2021). Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00673. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00673>
- Tolğay, E. Yaşar, Y. Erdoğan 2004, Nevşehir Pomzasının Agregat Olarak Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 Mayıs 2004, İzmir, Türkiye
- Top, S., Vapur, H., Altiner, M., Kaya, D., & Ekicibil, A. (2020). Properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete prepared using pumice and expanded perlite as

- aggregates. *Journal of Molecular Structure*, 1202, 127236. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127236>
- V.K. Nagaraj & Babu, D. V. (2018). Assessing the performance of molarity and alkaline activator ratio on engineering properties of self-compacting alkaline activated concrete at ambient temperature. *Journal of Building Engineering*, 20, 137-155. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.005>
- Wongsa, A., Sata, V., Nuaklong, P., & Chindaprasirt, P. (2018). Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 1025-1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.176>
- Wu, C., Hwang, H. J., Shi, C., Li, N., & Du, Y. (2020). Shear tests on reinforced slag-based geopolymer concrete beams with transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 219, 110966. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110966>.
- Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R. (2015). Effects of elevated temperature on pumice based geopolymer composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 44(6), 226-237. <https://doi.org/10.1179/1743289815Y.0000000020>
- Yadollahi, M. M., Benli, A., & Demirboğa, R. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 94, 767-774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.052>
- Yonar, Y. 2014, "Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.(2014)
- Yonar, Y. 2014, "Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (2014).
- Yusuf İslam Şahin Germany, 2016 I. N. Grubesa, “Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction”,
- Yusuf İslam Şahin Ö. Okyay, Y. Akkaya, 2011 “Yüksek Dayanım ve Yüksek Performanslı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı”, Beton 2011 Kongresi Bildirileri, c. 1, ss. 388- 394, İstanbul, Türkiye, 2011.
- Ziada, M., Erdem, S., Tammam, Y., Kara, S., & Lezcano, R. A. G. (2021). The effect of basalt fiber on mechanical, microstructural, and high-temperature properties of fly ash-based and basalt powder waste-filled sustainable geopolymer mortar. *Sustainability*, 13(22), 12610. <https://doi.org/10.3390/su132212610>.
- Zichao, W., Tarun, R.N.(2002) Properties of concrete produced from multicomponent blended cements, *Cement and Concrete Research* 32 pp. 1937 – 1942

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	: Murat DEMİREL
Doğum tarihi	:
Doğum Yeri	:
Uyruğu	:
Adres	:
Tel	:
E-mail	:
Eğitim	
Lise	:
Lisans	:
Yüksek lisans	:
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	:
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	