

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAZALT LİFİNİN TAŞIYICI GEOPOLİMER HAFİF BETONUN BAZI
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE YÜKSEK SICAKLIK DAVRANIŞINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Sümeyye KARAHÜSEYİN

ARALIK 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAZALT LİFİNİN TAŞIYICI GEOPOLİMER HAFİF BETONUN BAZI
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE YÜKSEK SICAKLIK DAVRANIŞINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 / 11 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 18 / 12 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Bazalt Lifinin Taşıyıcı Geopolimer Hafif Betonun Bazı Mekanik Özelliklerine ve Yüksek Sıcaklık Davranışına Etkisinin Araştırılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır. Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2023-10721

Tez konusunun belirlenmesinden son aşamasına gelinceye kadar bana yol gösteren, yoğun iş temposu arasında değerli vakitlerini ayırarak destek ve yardımlarını esirgemeyen, akademik kariyerime başladığım günden beri tecrübeleriyle bana ışık tutan, danışmanım saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve değerli önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Doç. Dr. Şirin KURBETCİ, Sayın Prof. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU, Sayın Prof. Dr. İlker USTABAŞ ve Sayın Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL’e, tez çalışmamda ilgi ve yardımlarından dolayı değerli hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve Yapı ve Malzeme Laboratuvarı teknisyenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın başından sonuna kadar desteklerini esirgemeyen, akademik kariyerime devam etmemde ve bugünlere gelmemde sağladığı desteklerle en zor anlarımda hep yanımda olan, haklarını asla ödeyemeyeceğim saygıdeğer ebeveynim, Çiğdem-Fethi KARAHÜSEYİN’e, abim Dr. Öğr. Üyesi Samet KARAHÜSEYİN ve eşi Merve Nur KARAHÜSEYİN’e ve kardeşim Tahacan KARAHÜSEYİN’e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bazalt Lifinin Taşıyıcı Geopolimer Hafif Betonun Bazı Mekanik Özelliklerine ve Yüksek Sıcaklık Davranışına Etkisinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/12/2024

Sümeyye KARAHÜSEYİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	4
1.2. Geopolimer Bağlayıcı Sistemlerin Tarihçesi	6
1.3. Geopolimerizasyon Mekanizması	7
1.4. Geopolimerin Avantaj ve Dezavantajları	10
1.5. Uygulama Alanları	12
1.6. Geopolimer Çimento ve Beton.....	12
1.7. Geopolimer Hafif Beton.....	13
1.8. Bağlayıcı Malzemeler.....	15
1.8.1. Metakaolin	15
1.8.2. Yüksek Fırın Cürufu	16
1.9. Takviye Malzeme	18
1.10. Hafif Geopolimer Beton Üretiminde Kullanılan Hafif Agregalar	19
1.11. Alkali Aktivatörler	21
1.11.1. Sodyum Hidroksit (NaOH)	21
1.11.2. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3).....	21
1.12. Geopolimer Betonun Taze Hal Özellikleri.....	22
1.13. Geopolimer Betonun Mekanik Özellikleri	23
1.14. Geopolimer Betonun Durabilite Özellikleri	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	30
2.1. Deney Programı.....	30
2.2. Kullanılan Malzemeler	32
2.2.1. Bağlayıcı Malzemeler	32

2.2.2.	Takviye Malzeme.....	35
2.2.3.	Alkali Aktivatörler	35
2.2.4.	Agregalar.....	36
2.3.	Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar	38
2.3.1.	Taşıyıcı Portland Çimentolu Hafif Beton Tasarımı	38
2.3.2.	Taşıyıcı Geopolimer Hafif Beton Tasarımı	38
2.3.3.	Basınç Dayanımı Açısından Farklı Kür Uygulamanın Etkisi	41
2.3.4.	Ön Çalışmalar Esnasında Karşılaşılan Sorunlar	43
2.4.	Metodoloji	45
2.4.1.	Taşıyıcı Geopolimer Hafif Beton Tasarımı, Hazırlanması, Üretimi ve Kür Koşulları	45
2.4.2.	Çökme (Slump) Deneyi	49
2.4.3.	Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	49
2.4.4.	Basınç Dayanımı Deneyi	50
2.4.5.	Eğilme Dayanımı Deneyi.....	50
2.4.6.	Elastisite Modülü Deneyi.....	51
2.4.7.	Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	52
2.4.8.	Termal (Isıl) İletkenlik Deneyi	53
2.4.9.	Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyi.....	54
2.4.10.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	55
2.4.11.	X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi.....	56
2.4.12.	Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi	57
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	59
3.1.	Taze Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	59
3.1.1.	Çökme Deneyi Sonuçları	59
3.1.2.	Birim Hacim Ağırlık Deneyi.....	59
3.2.	Sertleşmiş Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	60
3.2.1.	Basınç Dayanımı Ölçümleri.....	60
3.2.2.	Eğilme Dayanımı Ölçümleri	62
3.2.3.	Elastisite Modülü Ölçümleri	64
3.2.4.	Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri	67
3.2.5.	Termal (Isıl) İletkenlik Katsayısı Ölçümleri	69
3.2.6.	Yüksek Sıcaklık Direnci Ölçümleri	70

3.3. Karakterizasyon Deneylerinin Değerlendirilmesi	75
3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İçyapı Analizi	75
3.3.2. X-Işıını Kırınımı (XRD) Analizi.....	80
3.3.3. Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi	81
4. SONUÇLAR.....	88
5. ÖNERİLER.....	92
6. KAYNAKLAR	93
7. EKLER.....	113
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

BAZALT LİFİNİN TAŞIYICI GEOPOLİMER HAFİF BETONUN BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİNE VE YÜKSEK SICAKLIK DAVRANIŞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2024, 112 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Çalışmada bazalt lifinin taşıyıcı geopolimer hafif betonun mekanik, ısı özellikleri ve yüksek sıcaklık davranışının yanı sıra mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, metakaolin ve çimento, agrega olarak pomza ve kalker, lif olarak bazalt lifi kullanılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı kullanılmıştır. Betonların mekanik, ısı ve yüksek sıcaklık özellikleri ile mikroyapı ve tepkime sonucu oluşan ürünler ve elde edilen veri istatistiksel olarak irdelenmiş ve yorumlanmıştır. Üretilen tüm betonlar taşıyıcı hafif beton için belirtilen kriterleri sağlamaktadır. Mekanik özellikler itibarıyla %0.2 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif beton diğer tüm geopolimer betonlara kıyasla daha üstün sonuçlar vermiştir. Geopolimer hafif betonların termal iletkenlik katsayıları 0.37 W/mK ila 0.53 W/mK arasında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda lifli geopolimer hafif betonlar referans geopolimer hafif beton ile benzer davranış göstermekte olup tüm geopolimer betonların basınç dayanımları 600°C'ye kadar belirgin bir azalış gösterirken bu sıcaklıktan itibaren artış eğilimindedir. Karakterizasyon analizleri %0.3 ve daha yüksek lif oranlarında hamur fazı-lif kenetlenmesinin iyileşmiş olduğu ve buna bağlı olarak betonların şekil değiştirmesinin artmış olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen termal analiz vasıtasıyla betonların ağırlığında gözlemlenen kayıp 700°C civarında oldukça belirginleşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer hafif beton, YFC, Metakaolin, Bazalt lifi, Mikroyapı

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BASALT FIBER ON SOME MECHANICAL PROPERTIES AND HIGH TEMPERATURE BEHAVIOR OF STRUCTURAL GEOPOLYMER LIGHTWEIGHT CONCRETE

Sümeyye KARAHÜSEYİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
2024, 112 Pages, 3 Pages Appendix

In this study, the effect of basalt fiber on the mechanical, thermal properties and high temperature behavior as well as the microstructure of structural geopolymer lightweight concrete was investigated. Blast furnace slag, metakaolin and cement were used as binders, pumice and limestone as aggregates, and basalt fiber was used as fiber. A mixture of sodium hydroxide and sodium silicate was used as the alkali activator solution. The mechanical, thermal and high temperature properties of the concretes, the microstructure and the products formed as a result of the reaction and the obtained data were statistically evaluated and interpreted. All concretes produced meet the criteria specified for structural lightweight concrete. In terms of mechanical properties, 0.2% basalt fiber structural geopolymer lightweight concrete gave superior results compared to all other geopolymer concretes. The thermal conductivity coefficients of geopolymer lightweight concretes ranged from 0.37 W/mK to 0.53 W/mK. At high temperatures, geopolymer lightweight concretes containing fibers show similar behavior to the reference geopolymer lightweight concrete, and the compressive strengths of all geopolymer concretes show a significant decrease up to 600°C, while they tend to increase after this temperature. Characterization analyses show that at 0.3% and higher fiber content, the paste phase-fiber interlocking is improved and, accordingly, the deformation of the concretes is increased. The loss in weight of the concretes observed through the thermal analysis becomes quite evident around 700°C.

Key Words: Geopolymer lightweight concrete, GGBS, Metakaolin, Basalt fiber, Microstructure

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Metakaolinin geopolimerizasyon süreci (Yao vd., 2009)	8
Şekil 2. Geopolimer oluşum denklemleri (Davidovits, 1991).....	9
Şekil 3. Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü binası ve bina inşasında kullanılan prekast döşeme paneli (Martin, 2024).....	13
Şekil 4. Pantheon Tapınağı ve Kolezyum	15
Şekil 5. Gerçekleştirilen çalışmaya ilişkin programı ve karışımların kodları	31
Şekil 6. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemeler	32
Şekil 7. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ait XRD analizi	34
Şekil 8. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ait 5000 kat büyütme SEM görüntüsü.....	34
Şekil 9. Bazalt lifi	35
Şekil 10. Kullanılan alkali aktivatörler.....	36
Şekil 11. Kullanılan agregalara ilişkin granülometri eğrileri ve ilgili sınır eğrileri	37
Şekil 12. Standart kür ve etüv kürü uygulanan numunelerin kırılma yüzeyi görseli	40
Şekil 13. Kür etkisini belirlemeye ilişkin şematik gösterim.....	42
Şekil 14. a) Numune yüzeyinde çatlaklar, b) Su kürü ve ortam kürüne tabi tutulan numune yüzeyleri ve c) Numune yüzeylerinde çiçeklenme	43
Şekil 15. Mikserde aniden katılıp sertleşen geopolimer karışımı	44
Şekil 16. 2 modül ve 3 modül sodyum silikat çözeltisi ile lif ilavesi sonrası görünüm	45
Şekil 17. Tek üretimde üretilen Portland çimentolu ve geopolimer hafif betonlar	46
Şekil 18. Taşıyıcı geopolimer hafif betonların hazırlık süreci	48
Şekil 19. Su havuzunda ve kür odasında tutulan taşıyıcı hafif beton numuneler.....	48
Şekil 20. Çökme deneyinin gerçekleştirilmesi	49
Şekil 21. Basınç dayanımı deneyi presisi.....	50
Şekil 22. Eğilme dayanımı deneyi aparatı	51
Şekil 23. Elastisite modülünün belirlenmesi	52
Şekil 24. Ultrases geçiş hızı deneyi düzeneği	53
Şekil 25. Termal iletkenlik deneyi düzeneği	54
Şekil 26. Yüksek sıcaklık fırını	55
Şekil 27. Taramalı elektron mikroskobu deney düzeneği	56
Şekil 28. X-ışını kırınımı analiz cihazı	57

Şekil 29. Termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analiz cihazı	58
Şekil 30. Lif oranı ile taze halde birim hacim ağırlık arasındaki ilişki	60
Şekil 31. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 günlük basınç dayanımları	61
Şekil 32. Lif oranına bağlı olarak betonların basınç dayanımının değişimi	62
Şekil 33. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 günlük bağıl eğilme dayanımları	63
Şekil 34. Taşıyıcı hafif betonların eğilme/basınç dayanımı oranları	64
Şekil 35. Betonlara ait elastisite modülü ve tokluğun lif oranına bağlı olarak değişimi	65
Şekil 36. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	66
Şekil 37. Betonlarda lif oranına göre a) elastisite modülü ve b) tokluk değerleri	67
Şekil 38. Betonlara ilişkin basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi	68
Şekil 39. Geopolimer hafif betonlarda lif oranı-ultrases geçiş hızı ilişkisi	69
Şekil 40. Birim hacim ağırlık ile termal iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki	70
Şekil 41. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi	71
Şekil 42. Sıcaklık artışına bağlı olarak betonlarda meydana gelen ağırlık kaybı	73
Şekil 43. Sıcaklığa bağlı olarak betonlara ilişkin ölçülen ultrases geçiş hızı değişimi	74
Şekil 44. Fırın kurusu betonların yoğunluğu ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki	75
Şekil 45. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonun içyapısından bir görüntü	76
Şekil 46. Referans taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısından bir görüntü	76
Şekil 47. %0.1 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısından bir görüntü	77
Şekil 48. %0.2 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü	77
Şekil 49. %0.3 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısından bir görüntü	78
Şekil 50. %0.4 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü	78
Şekil 51. %0.5 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü	79
Şekil 52. %0.6 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü	79
Şekil 53. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin birleştirilmiş XRD analizleri	81
Şekil 54. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	82
Şekil 55. Referans taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	83
Şekil 56. %0.1 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	83

Şekil 57. %0.2 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	84
Şekil 58. %0.3 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	85
Şekil 59. %0.4 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	85
Şekil 60. %0.5 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	86
Şekil 61. %0.6 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi	87
Ek Şekil 1. PÇHB'ye ait elastisite modülü ve tokluk hesabı.....	113



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Çimentoların alkali ile aktifleştirilmesine ilişkin tarihi gelişim (Shi vd., 2003)	7
Tablo 2. Geopolimer bağlayıcıların kullanım alanları (Davidovits, 1994a).....	12
Tablo 3. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler	33
Tablo 4. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	33
Tablo 5. Bazalt lifine ait teknik özellikler	35
Tablo 6. Sodyum hidroksitin özellikleri	36
Tablo 7. Sodyum silikatın özellikleri	36
Tablo 8. Agregalara ilişkin elek analizleri ve fiziksel özellikler	37
Tablo 9. Taşıyıcı hafif beton karışım miktarları (kg/m ³).....	46
Tablo 10. Üretilen hafif beton numunelerin boyutu ve sayısına ilişkin bilgiler.....	47
Tablo 11. Taşıyıcı hafif betonlara ait birim hacim ağırlıklar	60
Tablo 12. Taşıyıcı hafif betonlara ait 28 günlük basınç dayanımları	61
Tablo 13. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 günlük eğilme dayanımları	63
Tablo 14. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin elastite modülü ve tokluk değerleri	65
Tablo 15. Taşıyıcı hafif betonlar için ölçülen ultrases geçiş hızları	67
Tablo 16. Beton kalitesinin ultrases geçiş hızına göre değerlendirmesi (BS, 1986).....	68
Tablo 17. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin termal iletkenlik katsayıları.....	70
Ek Tablo 1. GHB'ye ait su/geopolimer katı oranı hesabı.....	113
Ek Tablo 2. GHB'ye ait molar oran hesabı	114

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BSE	: Geri saçılan elektron
C-A-S-H	: Kalsiyum alüminosilikat hidrat
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
N-A-S-H	: Sodyum alüminosilikat hidrat
SE	: İkincil elektron
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TG	: Termogravimetrik
YFC	: Yüksek fırın cürufu
XRD	: X-ışını kırınımı
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi

1. GENEL BİLGİLER

Geopolimer olarak adlandırılan alüminosilikat inorganik polimerler ilk olarak Davidovits tarafından çalışılmıştır. Geopolimerler, alüminosilikatların alkalilerle aktive edilmesi sonucu bağlayıcılık kazanan ve yapı malzemesi üretiminde çimento yerine kullanılabilen bağlayıcılardır. Alüminosilikatlar, ana oksitleri alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum dioksit (SiO_2) olan doğal ya da sonradan ısıtılma sonucu amorf yapıda elde edilen malzemelerdir. Bu tip malzemeler ortam sıcaklığında hızlı bir şekilde sertleşerek mekanik dayanım ve ısıya karşı direnç kazanırlar. Alkali aktivatörler vasıtasıyla uçucu kül, kömür cürufu, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atık, volkanik tüf, ufalanmış doğal başkalaşım kayalar ya da $750^{\circ}C$ 'de fırınlanmış kaolin kilinin Al ve Si bileşenlerinin çözünmesi sonucu geopolimerlerin sertleşmesi geopolimerizasyon olarak tanımlanmaktadır (Andini vd., 2008; Ryu vd., 2013). Geopolimer teknolojisi, çevre üzerinde çok az olumsuz etkisi olan alüminosilikat fazları içeren endüstriyel yan ürünlerin (atık) kullanımına da çözüm sunmaktadır. Geopolimerler esas olarak uçucu kül, metakaolin, kalsine killer, zeolit ve benzeri ikincil hammaddeler kullanılarak alkali/alkali silikat çözeltilerinin aktivasyonu ile üretilmektedir. Yaygın olarak kullanılan aktivatörler alkali hidroksit, silikat veya bunların karışımlarıdır. Bazı durumlarda alkali karbonat veya sülfat da kullanılmaktadır (Provis & Bernal, 2014). Geopolimerde çimentoda meydana gelen hidratasyon işleminin aksine geopolimer matrisindeki polimerizasyon (polimerleşme) işlemi gerçekleşmektedir (Siddique vd., 2020). Geopolimerler yapısal olarak düzensiz ve yüksek oranda çapraz bağlı yapıda bir alkali alüminosilikat (N-A-S-(H)) jeli özelliğindedir (García-Lodeiro vd., 2008; Sun vd., 2018). Bu N-A-S-(H) jeli temelde zeolit yapıdadır ancak uzun menzilli kristal düzen göstermemektedir. Kullanılan aktivatöre bağlı olarak sodyum kısmen veya tamamen potasyum ile yer değiştirerek K-A-S-(H) jeli de elde edilebilmektedir (Provis vd., 2005).

Oda sıcaklığında başlayan geopolimer reaksiyonu istenen karışım sağlandıktan sonra $40-100^{\circ}C$ sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısıtılma tabi tutularak polimerizasyon süreci uzatılmaktadır. Böylece üretilmek istenen geopolimer malzeme özellikleri de iyileştirilebilmektedir (Komnitsas & Zaharaki, 2007). Bu tip malzemelerin alkalilerle aktive edilip bağlayıcılık özelliği kazandırılması, çimentoya alternatif çevreye duyarlı bağlayıcıların yaygınlaştırılması ve ilgili standartların oluşturulması açısından oldukça

önem arz etmektedir. Bu bakımdan son yıllarda özellikle uluslararası literatürde geopolimer bağlayıcı ile ilgili pek çok çalışmaya rastlamak mümkündür.

Günümüzde sudan sonra en çok kullanılan malzeme olan beton, dünyada kişi başına yılda yaklaşık üç ton üretilmektedir (Gagg, 2014). Beton, dünya çapında ortaya çıkan karbondioksit salınımının yaklaşık %5-8'inden sorumlu tutulmaktadır (Scrivener & Kirkpatrick, 2008). Betonun yüksek karbondioksit salınımının temel nedeni, ana bağlayıcı olan Portland çimentosunun üretimi esnasında üretilen her Portland çimentosu miktarı için yaklaşık olarak eşdeğer miktarda karbondioksit salınımı ile sonuçlanmasıdır (Andrew, 2018).

Geopolimerler, Portland çimentosunun yerini alabilecek yeni nesil yeşil çimentolu bir malzeme türü olarak kabul edilmektedir (Guo vd., 2010). Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, geopolimerler benzer olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir ve üretimi esnasında %80 daha az karbondioksit (CO₂) salınımına neden olmaktadır. Bu da üretim esnasında sıradan polimerlere kıyasla çok daha az enerji tüketimi anlamına gelmektedir. Bu nedenle geopolimerler, yeni ve yeşil beton olarak ticarileşme potansiyeline sahiptir. Çevresel avantajlarının yanı sıra geopolimerler hem daha ekonomik hem de kimyasal olarak kararlı bir yapıya ve korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. Hızlı mukavemet kazanacak şekilde tasarlanabilmesi, düşük oranda büzülme yapması ve donma ve çözölmeye karşı dirençli olması ve her şeyden önce olağanüstü ısı özellikler göstermesi önemli avantajlar olarak sıralanabilir (Davidovits, 1991, 2002).

Kür sıcaklığı, alkali konsantrasyonu, katkı maddeleri, Na₂O/SiO₂ oranı ve benzeri faktörlerin optimizasyonu ile alüminosilikat ve alkali çözeltileri içeren farklı kaynak malzemelerin kombinasyonu sayesinde başarılı mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip geopolimerlerin elde edilebilmesine olanak sağlanabilmektedir. Üstün mekanik özellikleri ve çevresel yararı sayesinde geopolimer çimento ve beton geleceğin inşaat malzemesi olarak karşımıza çıkmakta ve farklı alanlarda uygulamaları bulunmaktadır (Diaz vd., 2010; Jafari Nadoushan & Ramezaniapour, 2016; Krishna vd., 2021; Mishra vd., 2020; Okoye vd., 2016; Singh & Middendorf, 2020; M. R. Wang vd., 2010). Geopolimerlerin bol ham madde kaynağı, düşük CO₂ emisyonu, düşük enerji tüketimi, düşük üretim maliyeti, erken ve yüksek dayanım kazanma özelliklerine sahip olması onların inşaat mühendisliğinde, otomotiv endüstrisinde, havacılık sektöründe, metalürjide, plastik endüstrisinde, atık yönetimi, sanat ve dekorasyon ve benzeri birçok alanda sıklıkla kullanılmasına imkân

sunmaktadır. Bunun yanı sıra toksik atıkların değerlendirilmesi de geopolimerlerin yaygın kullanıldığı alanlardan biridir.

Metakaolin, geopolimer hazırlamak için sık kullanılan yaygın bir malzemedir. Kimyasal aktivatör ile aktive edildikten sonra hızla sertleşebilir ve oda sıcaklığında mükemmel mekanik özelliklere sahip olabilir (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020; Provis vd., 2015; Sun vd., 2013). Ancak bazı çalışmalar alkali ile aktive edilen metakaolin tabanlı geopolimerlerin yüksek sıcaklıkta düşük performans sergilediğini rapor etmektedir (Celik vd., 2018). Metakaolin tabanlı geopolimerlerin yüksek sıcaklıkta ısı kararlılığının uygun modifikasyon kullanılarak büyük ölçüde geliştirilebileceği ifade edilmektedir (M. Li vd., 2022).

Geopolimerler, yüksek potansiyele sahip bir yeşil bağlayıcı sistem olmasına karşın kırılğan olması, geçirimsizliğinin düşük olması, düşük eğilme ve çekme mukavemeti gibi olumsuzlukları söz konusudur (C. Liu vd., 2020; Ranjbar vd., 2015). Saf geopolimerlerdeki kusurlar geopolimer matrisi içindeki çatlaklar ve geopolimerizasyon sırasında inorganik bağ oluşumundan kaynaklanan doğal gözeneklilik nedeniyle meydana gelen olumsuzluklardır (C. Liu vd., 2020; Steinerova vd., 2017). Bu zafiyetler geopolimerlerin yapısal uygulamalar için yaygın kullanım alanı bulmalarını kısıtlamakta olup bu zafiyetleri gidermek amacıyla geopolimer matrisine bir takviye malzeme ekleme gereksinimine ihtiyaç duyulmaktadır (P. He vd., 2010).

Takviye olarak kullanılan lifler betonun özellikle çekme zorlaması altında kırılğan yapısını iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Geopolimer matrisine dâhil edilen lifler matris içinde rastgele dağılarak çatlaklarda köprü vazifesi görmekte ve çatlağın genişlemesini engelleyerek geopolimerin mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmektedir (Branston vd., 2016; Celik vd., 2018). Pek çok araştırmacı geopolimer üretiminde bazalt lifi, polipropilen lif, polivinil alkol lifi, cam, ahşap, karbon, pamuk veya dokuma kumaş lifleri gibi çeşitli lifler kullanarak geniş çapta araştırmalar gerçekleştirmiştir (Assaedi vd., 2015; Celik vd., 2018; Fiore vd., 2015; Menna vd., 2013; Shaikh & Haque, 2018). Özellikle takviye olarak kullanılabilecek lifler arasında özellikleri bakımından en ilgi çekici olanları bazalt lifidir. Bazalt lifleri diğer lif türlerine kıyasla daha iyi özellikler sunmaktadır (Fiore vd., 2015). Bazalt lifleri çevre dostu ve zararsız malzemeler olarak kabul edilir. Yeni bir malzeme değildir ancak iyi mekanik, kimyasal ve ısıl performansı sayesinde yapım ve otomotiv sektöründen havacılığa kadar pek çok endüstriyel ve ekonomik alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bazalt lifinin

özellikle geleneksel cam liflerine kıyasla bir takviye malzemesi olarak kullanımı artarak devam etmektedir (Fiore vd., 2015).

Literatürde geopolimerlerde takviye malzeme olarak bazalt lifinin bağlayıcı malzemenin düşük oranında (<%2) ikame edilmesi ile lif ve geopolimer matris arasında oluşan güçlü bağ ve mekanik etkileşim sayesinde geopolimerlerin mikroyapısında ve basınç dayanımı, eğilme dayanımı, süneklik, tokluk, yük taşıma kapasitesi ve benzeri mekanik özelliklerinde önemli iyileşme meydana geldiği, yüksek sıcaklık direnci kazandığı rapor edilmektedir (Amran vd., 2022; Arunagiri vd., 2017; Celik vd., 2018; W. Li & Xu, 2009; Shaikh & Haque, 2018; Şahin vd., 2021; Y. Wang vd., 2021).

Yüksek katlı ve büyük açıklıklı yapıların inşasının dünya genelinde hızla artmakta olması hafif betona olan talebi de arttırmaktadır. Hafif betonun normal ağırlıklı betona kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Hafif beton, iyi yangın direnci, daha düşük ağırlık, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve daha küçük hacimli temel boyutları sağlamaktadır. Depreme dayanıklılık aranan yapılarda bu betonun kullanılması ağırlıktaki azalma sayesinde yarar sağlamaktadır. Ayrıca hafif agregada mevcut boşluklar nedeniyle düşük ısı iletkenliğe sahiptir. Bu beton, sektöre çimento kullanmadan yapının kendi ağırlığını azaltmak ve geopolimer betonların kapsamını artırmak için alternatif bir çözüm sunmaktadır (Rossignolo vd., 2003; Tayeh vd., 2021; Wongsu vd., 2018).

Endüstriyel yan ürünler de dâhil olmak üzere çeşitli bağlayıcılar kullanılarak geopolimer betona ilişkin çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen geopolimer beton Portland çimentolu betona alternatif bir malzeme olarak inşaat sektöründe henüz geniş çapta kabul görmemiştir (Youssif vd., 2022).

1.1. Amaç ve Kapsam

Çalışma kapsamında bazalt lif takviyesinin taşıyıcı geopolimer hafif betonun mekanik, ısı özellikleri ve yüksek sıcaklık davranışının yanı sıra mikroyapısı üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı bir değerlendirme amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton üzerinde bazı mekanik ve yüksek sıcaklık direnci deneyleri ile mikroyapısına ilişkin bazı karakterizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yeni nesil sürdürülebilir yeşil beton olarak değerlendirilen geopolimer betonun ülkelerin mevcut hammaddelerinin veya atık maddelerinin değerlendirilmesi, çevresel açıdan daha az karbon salınımı yapması ve Portland çimentosu betonuna kıyasla daha

düşük maliyetli olması açısından üretimine ve kullanımına ilişkin gerekli standartların da oluşturulmasıyla yakın gelecekte inşaat sektöründe yaygınlaşması düşünülmektedir. TÜBİTAK Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2003-2023 Strateji Belgesinde (Vizyon 2023) belirtildiği üzere çevre, inşaat ve altyapı alanında doğal kaynakların ve atık maddelerin değerlendirilmesi ve daha az enerji tüketimi sürdürülebilirlik açısından ülkemizin öncelik verdiği araştırma alanlarından biridir. Ayrıca On İkinci Kalkınma Planında (2024-2028) net sıfır karbon hedefi doğrultusunda yenilenebilir kaynaklar kullanılarak sürdürülebilir ve güvenli yapılı çevre oluşturmak, düşük karbonlu yapı malzemeleri ile teknolojik kabiliyeti yüksek bir inşaat sektörü oluşturmak amaçlanmaktadır. Bu hususta karbon ayak izi azaltılmış, sürdürülebilir inşaat malzemesi üretiminin ve kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla tedbirler alınmaktadır.

Geopolimer betonun elbette ki geleneksel betonun yerini tamamen alması mümkün değildir ancak çimento ihtiyacının karşılanamadığı ve özellikle stratejik öneme sahip uygulamalarda, deprem ve yangına dayanıklılığın önem arz ettiği alanlarda kullanımına yer verilmesi teşvik edilebilir. Geopolimer hafif betonun inşaat sektöründe yaygın bir şekilde kullanımı için daha kapsamlı araştırmaların yapılması önem arz etmektedir.

Geopolimerler için takviye malzemesi olarak kullanılan ve üstün özelliklere sahip olan bazalt lifinin geopolimer beton üretiminde kullanılması ve elde edilen çıktıların literatürle uyumlu olması, bazalt lifi kullanımının yaygınlaşması ve beton teknolojisi alanında önemli bir katkı yapılması hedeflenmiştir.

Ulusal literatürde “Bazalt Lif Takviyeli Yüksek Fırın Cürufu ve Metakaolin Tabanlı Taşıyıcı Geopolimer Hafif Beton” başlıklı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Uluslararası literatürde ise farklı malzemelerin, tasarım reçetelerinin ve deney yöntemlerinin olduğu sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Gerçekleştirilen bu çalışma ile literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır:

- i) Belirlenen oranlarda bazalt lif takviye edilmiş taşıyıcı geopolimer hafif beton ile kıyaslama amacıyla bazalt lif takviye edilmemiş referans taşıyıcı geopolimer hafif beton ve Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton üretilmiştir.
- ii) Üretilen betonlara ilişkin mekanik, ısı özellikler ve yüksek sıcaklık davranışı ile mikroyapı ve oluşan ürünler bazı mekanik deneyler, yüksek sıcaklık direnci deneyi ve karakterizasyon analizleri vasıtasıyla incelenmiştir.
- iii) Deneysel çalışmada elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilerek çalışmanın çıktıları belirlenmiştir.

1.2. Geopolimer Bağlayıcı Sistemlerin Tarihçesi

Geopolimerler inorganik bağlayıcı bir malzemedir. Geopolimerler ilk kez 1978 yılında Davidovits tarafından çimentosuz bir malzeme olarak sunulmuştur. Geopolimer bağlayıcı sistemi, amorf yapıdaki alüminosilikat malzemelerin sodyum hidroksit ve sodyum silikat veya potasyum hidroksit ve potasyum silikat gibi alkali kimyasal çözeltilerle aktive edilmesi prensibine dayanır (Davidovits, 2020). Geopolimerlerin genel kimyasal bileşimi doğal zeolite yakın olup temel farkı amorf olan ve zeolitte olduğu gibi kristalli olmayan bir mikroyapı biçiminde olmasıdır (A. Palomo vd., 1999).

Alkalilerin bağlayıcı malzemenin bir bileşeni olarak ilk kullanımı, öğütülmüş cüruf tozu ve potasyum hidroksit çözeltisi karışımlarının priz alma davranışının araştırıldığı 1930 yılına kadar uzanmaktadır. 1937 yılında sodyum ve potasyum hidroksit çözeltisi kullanılarak cürufun reaktivitesi araştırılmıştır. 1940 yılında ise cüruf ve sodyum hidroksit, cüruf ve alkali tuzdan üretilen klinkersiz çimentolar üzerinde ilk kapsamlı laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir (Purdon, 1940; Shi vd., 2003).

1957 yılında ilk olarak düşük kalsiyumlu veya kalsiyum içermeyen alüminosilikat ve alkali metal çözeltileri kullanılarak bağlayıcı üretmenin mümkün olduğu keşfedilmiştir (Glukhovsky, 1959). Bu tür bağlayıcılar için “toprak çimentosu”, bu tür bağlayıcılarla elde edilen beton için ise “toprak silikatları” ifadeleri kullanılmıştır. Bileşimlerine bağlı olarak bu bağlayıcılar alkali bağlayıcı sistemler ($\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) ve toprak alkali bağlayıcı sistemler ($\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$) (Me: Na, K gibi alkali metaller) olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcı sistemler üzerine yapılan çalışmalar o tarihten itibaren hız kazanmıştır.

İskandinav ülkelerinde geliştirilen ve “Trief çimentosu” ile “F-çimentosu” olarak adlandırılan bağlayıcılar ve alkalilerle aktive edilmiş katkılı çimentolu bağlayıcılar üzerine 1980’li yıllarda çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Davidovits, 1987; Forss, 1983).

1981 yılında, alkaliler yanmış kaolin, kireçtaşı ve dolomit karışımıyla karıştırılarak bağlayıcılar üretilmiştir (Davidovits, 1984). Bu bağlayıcılara polimerik yapıya sahip oldukları için “geopolimer” adı verilmiştir. Ayrıca bağlayıcı olarak Pyrament, Geopolycem ve Geopolymite gibi çeşitli ticari markalar da kullanılmıştır (Davidovits, 1994b). Bu tip malzemeler aslında Glukhovsky tarafından keşfedilen $\text{Me}_2\text{O}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ alkali bağlayıcı sistemine aittir.

Literatürde, alkaliyle aktifleşen çimento türü malzemeler belirli radyoaktif atıkların katılaşmasıyla oluşan matris olarak da tanımlanmış ve bazı araştırmacılar bu tür malzemelerin eski betonlarla olan bazı benzerliklerini göstermiştir (Malek vd., 1986; Roy & Langton, 1989). Alkali ile aktifleştirilen çimentolarla ilgili önemli tarihsel gelişim Tablo 1’de özetlenmiştir.

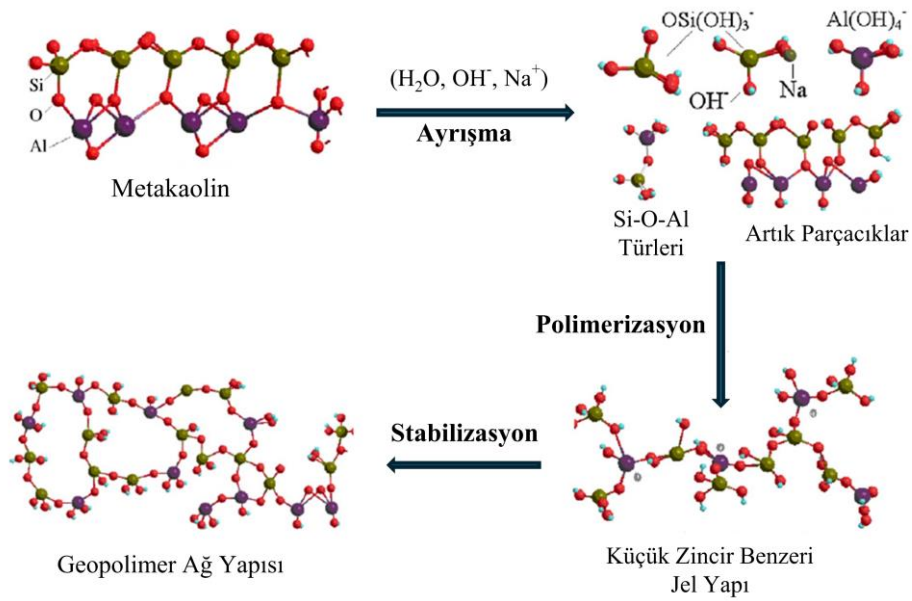
Tablo 1. Çimentoların alkali ile aktifleştirilmesine ilişkin tarihi gelişim (Shi vd., 2003)

Yıl	İsim	Çalışma
1930	Kuhl	Potasyum hidroksit varlığında cürufların priz alma davranışını araştırmıştır.
1937	Chassevent	Potasyum hidroksit ve sodyum hidroksit çözeltisi kullanarak cürufların reaktivitesini ölçmüştür.
1940	Purdon	Cüruf ve sodyum hidroksit, cüruf ve alkali tuzdan üretilen klinker içermeyen çimentoları araştırmıştır.
1957	Glukhovsky	Düşük kalsiyumlu veya kalsiyum içermeyen alüminosilikat (kil) ve alkali metal çözeltileri kullanarak bağlayıcı üretiminin mümkün olduğunu keşfetmiştir.
1981	Davidovits	Alkalileri yanmış kaolin, kireç taşı ve dolomit karışımıyla karıştırarak bağlayıcılar üretmiştir ve Geopolymer, Pyrament, Geopolycem, Geopolymite gibi çeşitli ticari markaları kullanmıştır.

1.3. Geopolimerizasyon Mekanizması

Polimerler çok sayıda monomerin bir araya gelmesi sonucu oluşan büyük moleküller halinde zincir yapı özelliğindeki malzemelerdir. Monomerlerin moleküler yapısı büyük moleküllerin özelliklerini belirler. Amorf yapılı veya kristal yapıya sahip olmayan malzemelerin atomsal dizilişleri düzenli değildir. Örneğin, cam en çok bilinen amorf yapılı malzemeye tipik bir örnektir (Young vd., 1998). Geopolimerler, genellikle 100°C’nin altında düşük sıcaklıkta üretilen inorganik polimerlerdir. Kovalent bağlarla birbirine bağlanmış mineral moleküllerinin bir zincir veya ağ yapısı oluşturmaya dayanır (Davidovits, 2020). Üretimi esnasında kullanılan hammaddeler çoğunlukla jeolojik kökenli olduğu için “geopolimer” olarak adlandırılmıştır (Davidovits, 2017).

Geopolimerizasyon mekanizması için literatürde birkaç öneri bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi metakaolinin geopolimerizasyonudur. Metakaolin iyi bir Al_2O_3 ve SiO_2 kaynağıdır ve alkali aktivatörlerle oldukça reaktif olarak tepkimeye girer. Bu nedenle mekanizmanın temellerini anlamakta kullanılabilir (Silva vd., 2007). Şekil 1’de gösterildiği üzere metakaolinin geopolimerizasyon süreci i) ayrışma, ii) polimerizasyon ve iii) stabilizasyon olarak üç aşamada gerçekleşir (Yao vd., 2009). Ancak bu aşamalar eş zamanlı olarak meydana geldikleri için net bir şekilde ayrılamazlar (Duxson, Fernández-Jiménez, vd., 2007). İlk aşamada alkali aktivatör çözeltisi metakaolin parçacıklarının yüzeyine absorbe edilir. OH^- anyonları Si-O ve Al-O bağlarına saldırmaya başlar. Ekzotermik olan bu süreçte metakaolin parçacıklarının yüzeylerindeki Si-O ve Al-O bağları parçalanır. Ardından $\text{OSi}(\text{OH})_3^-$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ gibi birkaç alümina/silika hidroksi türü ve $(\text{OH})_3\text{-Si-O-Al}(\text{OH})_3$ ve benzeri oligomerler oluşur (Rahier vd., 2007; Silva vd., 2007). Oluşan bu ürünlerin konsantrasyonları arttıkça polimerize olarak jel yapıyı oluşturur. Küçük zincir benzeri jel yapının yeniden düzenlenmesi ile geopolimer ağ yapısı meydana gelir ve bu ağ yapısı termal olarak kararlıdır (Yao vd., 2009).



Şekil 1. Metakaolinin geopolimerizasyon süreci (Yao vd., 2009)

Şekil 2’de geopolimer oluşum denklemleri verilmektedir. Denklemlerden görüldüğü üzere geopolimerizasyon reaksiyonu için alkali ortam gereklidir. Geopolimer oluşumu esnasında kimyasal reaksiyon sonucu su açığa çıkar. Serbest kalan su uygulanan sıcaklık ve kurutma gibi kür işlemleri neticesinde geopolimerin içyapısından buharlaşarak

- i) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

- ii) $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$
- iii) $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$

Her bir oranın metakaolin tabanlı geopolimerlerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkileri literatürde bildirilmiştir. Araştırmalar sonucunda metakaolin tabanlı geopolimerlerin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranlarının sırasıyla 3.0-3.8, 1.0-1.2 ve 10-11 aralığında olmasının daha yüksek mukavemet verdiği rapor edilmiştir (Duxson vd., 2005; Kamalloo vd., 2010; Steveson & Sagoe-Crentsil, 2005). Metakaolin dışındaki malzemelerin Al_2O_3 ve SiO_2 kaynağı olarak kullanılması durumunda bu oranların değişmesi beklenebilir (Silva vd., 2007).

1.4. Geopolimerin Avantaj ve Dezavantajları

Geopolimer bağlayıcı sistemlerin ekonomik, çevresel ve teknik açıdan pek çok avantajı bulunmaktadır. Genellikle endüstri yan ürünü olarak ortaya çıkan atık toz malzemelerin geopolimer bağlayıcıların üretiminde kullanılması bu tür bağlayıcı sistemlerin çimentolu sistemlere göre daha ekonomik olmasını sağlamaktadır. Bununla beraber çimento üretimi esnasında sıcaklığın yaklaşık 1450°C 'ye kadar çıkmasıyla yüksek enerji tüketiminden kaynaklı maliyet yükselir. Bağlayıcı malzeme üretimi için gerekli toz malzemenin daha ekonomik bir şekilde elde edilebilmesi geopolimer bağlayıcıların çimentolu bağlayıcılara göre en önemli avantajlarından birisi olarak değerlendirilir (Juenger vd., 2011).

Geopolimer bağlayıcı sistemler çevre açısından önemli bir avantaja sahiptir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemeler alternatif bağlayıcı sistemler için yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu malzemelerin endüstri yan ürünü olması nedeniyle geopolimer bağlayıcı sistemlerde değerlendirilmesi çevre açısından önemlidir (Gartner, 2004).

Teknik açıdan birçok avantaja sahip olan geopolimer bağlayıcı sistemler kimyasal tepkimelere karşı oldukça dirençlidir. Özellikle sülfat etkisine karşı çimento esaslı bağlayıcı sistemlere göre üstün performans sergilemektedir. Geopolimer bağlayıcı üretimi için kullanılan toz malzemelerin kimyasal özelliklerinden dolayı oluşan bağlayıcı ürününde alçı ve etrenjit bulunmadığından sülfat direnci oldukça yüksektir (Chindaprasirt vd., 2014). Bir diğer avantajı ise geopolimer bağlayıcı sistemlerde alkali-silika reaksiyonunun meydana gelmemesidir. Çimentolu sistemlerde reaktif silis içeren agrega

kullanımı neticesinde alkali-silika reaksiyonu meydana gelmektedir. Geopolimer bağlayıcı sistemlerde kullanılan toz malzemelerin yapısından kaynaklı alkali-silika reaksiyonuna rastlanmadığı için reaktif silis içeren agregalarla kullanımına ilişkin bir olumsuzluğun meydana gelmediği belirtilmektedir (García-Lodeiro vd., 2007). Geopolimer bağlayıcıların bir başka avantajı ise yüksek sıcaklıklarda kararlı bir yapıya sahip olmalarıdır. Özellikle düşük CaO içeren alüminosilikat malzemelerin alkalilerle aktivasyonu neticesinde oluşan bağlayıcıların kararlı yapısından dolayı yüksek sıcaklıklara karşı dirençleri oldukça yüksektir (Lyon vd., 1997). Isıl iletkenlikleri diğer yapı malzemelerine kıyasla düşük olup 0.24-0.3 W/mK arasında değerler almaktadır (Görhan vd., 2016).

Hacimsel stabilitesi iyi olan geopolimer bağlayıcılar diğer bağlayıcılara kıyasla daha düşük rötre yaparlar. Erken yüksek dayanımları sayesinde priz sürecinin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının yaklaşık %70'ine ulaşabilmektedir. Geopolimer malzemelerin dayanımından çok fazla kaybetmeden binlerce yıl dış etkilere dayanabildiği belirtilmiştir.

Özetle, geopolimerler bol ham madde kaynağı, düşük CO₂ emisyonu, düşük enerji tüketimi, düşük üretim maliyeti, erken yüksek dayanım ve hızlı dayanım kazanma özelliklerine sahiptir. Geopolimer bağlayıcılar pek çok sahada test edilmiş olup yüksek mekanik performans, yüksek yüzey sertliği (4~7 Mohs Scale) ve aside karşı yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip oldukları belirlenmiştir.

Geopolimer bağlayıcı sistemlerin dezavantajlarından en önemlisi kullanılan toz alüminosilikat malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin her zaman sabit olmaması nedeniyle kalite kontrol açısından büyük sorunlara neden olmasıdır. Özellikle endüstri yan ürünü olarak elde edilen atık toz malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri ana ürünün üretimi sırasında yapılan küçük bir değişiklik nedeniyle ya da zamanla değişebilmektedir. Toz malzemelerin özelliklerinde meydana gelen bu değişim bağlayıcı sistemin özelliklerini de önemli ölçüde etkilemektedir (Pacheco-Torgal vd., 2015). Örneğin, geopolimer bağlayıcı üretilecek bir tesiste farklı zamanlarda ve farklı yerlerden gelen her atık toz malzeme için kimyasal ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi gerekir ve bu durum kalite kontrol ve araştırma/geliştirme maliyetlerinin artmasına sebep olur. Geopolimer bağlayıcı sistemlerin bir diğer dezavantajı taze halde karışımların işlenebilirlikleri çimentolu sistemlere kıyasla daha kötü olmaktadır. Alkali aktivasyon için kullanılan çözeltilerin yüksek viskoziteye sahip olması nedeniyle elde edilen karışımlar yüksek yapışkanlığa sahip olabilmektedir. Bu da karışımın işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Karışımın

işlenebilirliğini iyileştirmek amacıyla su ilave edilmesi durumunda ise karışımın sertleşmiş haldeki özellikleri olumsuz etkilenebilmektedir (Andiç-Çakır & Ramyar, 2014).

1.5. Uygulama Alanları

Geopolimerler yangına dayanıklı malzemeler olmaları nedeniyle seramikler ve betonlar gibi birçok alanda kullanılabilir (Tablo 2). Geopolimerlerin özelliklerinin ve uygulama alanlarının Si/Al oranına bağlı olduğu belirtilmektedir (Davidovits, 1994a). Geopolimerler prefabrik taşıyıcı/taşıyıcı olmayan eleman üretiminde, demiryolu traverslerinde, zararlı ortamlara karşı direnç ve yüksek dayanıklılık istenen kanalizasyon boruları üretiminde kullanılmaktadır (Almutairi vd., 2021).

Tablo 2. Geopolimer bağlayıcıların kullanım alanları (Davidovits, 1994a)

Si/Al Oranı	Kullanım Alanları
1	Tuğla, seramik, yangından korunma
2	Çevreye duyarlı çimento, beton, radyoaktif veya toksik atıkların muhafaza edilmesi
3	Isıya dayanıklı kompozitler, dökümhane ekipmanı, cam elyaf kompozitler
> 3	Endüstri için dolgu malzemesi
20 < Si/Al < 35	Yangına ve ısıya dayanıklı lifli kompozitler

1.6. Geopolimer Çimento ve Beton

Literatürde "geopolimer çimento" ve "geopolimer beton" terimleri arasında bir karışıklık vardır. Çimento bağlayıcıdır, beton ise bu bağlayıcı malzemeye agrega ve su eklenmesiyle elde edilen bir yapı malzemesidir (Davidovits, 2013). Terminolojik açıdan geopolimer çimento, normal Portland çimentosu gibi oda sıcaklığında sertleşen bir bağlayıcı sistemidir (Davidovits, 1991). Bir geopolimer bileşiği ısı ayarı gerektiriyorsa geopolimer çimentosu değil, geopolimer bağlayıcısı olarak adlandırılmaktadır. Geopolimer çimentolar kalsiyum karbonat içermemesi nedeniyle üretimi esnasında Portland çimentosuna kıyasla daha az CO₂ açığa çıkmaktadır. CO₂ emisyonundaki azalma %40-80 arasında olabilmektedir. Karbon ayak izini azaltmak amacıyla geopolimer çimento üretiminde minimum seviyede ısı işlem görmüş doğal malzemelere veya endüstriyel yan

ürünlere ihtiyaç duyulmaktadır. Geopolimer çimentolar geleneksel betonların dayanıklılığına da olumlu katkı sunmaktadır. Geopolimer çimentolar için standart bir tasarım mevcut değildir. Mevcut Portland çimentosu standartları geopolimer çimentolara henüz uyarlanmamıştır. Günümüzde her araştırmacı atıklar, yan ürünler ve benzeri yerel hammaddelere dayalı kendi reçetesini sunmaktadır. Bu noktada doğru geopolimer çimento seçimine ihtiyaç duyulmaktadır (Davidovits, 2013). Geopolimer beton bağlayıcı olarak alüminosilikat malzemeler, alkali aktivatör çözelti ve agregadan oluşan bir yapı malzemesidir. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler, alkali ortam varlığında geopolimerizasyon sonucu amorf veya yarı kristal bir yapı oluşturur ve geleneksel betona kıyasla daha yüksek mukavemet verir (F. Farooq vd., 2021). Avustralya'da bulunan Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü binası geopolimer beton kullanılarak inşa edilen ilk kamu binasıdır. Binada öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tabanlı geopolimer betondan üretilen toplam 33 adet prekast döşeme paneli kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Queensland Üniversitesi Küresel Değişim Enstitüsü binası ve bina inşasında kullanılan prekast döşeme paneli (Martin, 2024)

1.7. Geopolimer Hafif Beton

Geopolimer hafif beton hem hafif betonun hem de geopolimer betonunun avantajlarını barındıran yenilikçi bir malzemedir. Bu beton çimento kullanmaksızın daha hafif bir yapı oluşturan ve daha yaygın kullanım alanı bulan bir yapı malzemesidir (Priyanka vd., 2020).

Etüv kurusu yoğunluğu 800 kg/m^3 ila 2000 kg/m^3 arasında değişen ve bir kısmı veya tamamı hafif agregası ile üretilen betonlar hafif beton olarak tanımlanmaktadır (TSE, 2021). Hafif beton üretim tekniğine ve kullanılan malzemeye göre hafif agregalı beton, ince

agregasız beton ve köpük beton olmak üzere üç farklı biçimde üretilmektedir. Yapıda kullanım işlevine göre ise taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonlar ve yalıtım hafif betonlar olarak sınıflandırılmaktadır. Yoğunluğu 1120 kg/m^3 ile 1920 kg/m^3 arasında değişen ve 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa 'ın üzerinde olan, tamamen hafif agregadan veya hafif agrega ve normal ağırlıkta agregadan oluşan betonlar taşıyıcı hafif beton olarak tanımlanmaktadır (ACI, 2003). Bir diğer tanıma göre, birim hacim ağırlığı 1400 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan ve yapıların taşıyıcı kısımlarında kullanılmaya yeterli dayanıma sahip betonlar taşıyıcı hafif beton olarak tanımlanmaktadır (TSE, 2017). Taşıyıcı/yalıtım ve yalıtım hafif betonlar için yoğunluk ve basınç dayanımına ilaveten ısı iletim katsayısı da belirleyici bir faktör olarak belirtilmektedir (Bagheri & Samea, 2018; Clarke, 1993).

Taşıyıcı hafif betonlar, çok katlı bina çerçeveleri ve döşemeleri, perde duvarlar, köprü tabliyeleri ve kirişleri, kabuk çatılar, her türden öngerilmeli veya prekast elemanlar ve deniz yapıları gibi çeşitli uygulama alanlarına sahiptir (ACI, 2014). Hafif betonların bilinen ilk kullanımı 2000 yıl öncesine dayanmaktadır. Hafif beton kullanılan en önemli yapılar, Roma İmparatorluğu döneminde inşa edilmiş olan Pantheon Kubbesi ve Kolezyum'dur (Şekil 4). Milattan önce 27 yılında inşası tamamlanan Pantheon Tapınağı'nın kubbesinin alt kısmından üst kısmına doğru değişen yoğunlukta hafif beton kullanılmıştır. Günümüzde hâlâ kullanılmakta olan bu yapı inşası üzerinden yaklaşık 2000 yıl geçmesine rağmen mükemmel durumdadır. Milattan sonra 80 yılında inşası tamamlanan Kolezyum'un temel inşaatında öğütülmüş volkanik lav içeren hafif beton kullanılmıştır. Duvarlarda gözenekli yapıda ezilmiş tuğla agrega, tonozlar ve duvarlar arasındaki boşluklarda ise gözenekli yapıda tuf kesme taşlar kullanılmıştır (Bremner vd., 1994).



Pantheon Tapınağı

Kolezyum

Şekil 4. Pantheon Tapınağı ve Kolezyum

1.8. Bağlayıcı Malzemeler

Silis ve alüminyum içerikli amorf yapıdaki malzemeler geopolimer bağlayıcıların üretimi için toz malzeme olarak kullanılmaktadır (Andiç-Çakır & Ramyar, 2014). Geopolimer bağlayıcı olarak metakaolin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, zeolit ve benzeri hammaddeler kullanılmaktadır.

1.8.1. Metakaolin

Metakaolin geopolimer üretiminde sıkça kullanılan bir hammaddedir. Kimyasal aktivatör ile aktive edilmesi neticesinde hızla sertleşebilir ve oda sıcaklığında mükemmel mekanik özellikler gösterebilmektedir (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020; Provis vd., 2015; Sun vd., 2013). Ancak literatürde bazı çalışmalarda yüksek sıcaklıkta alkali ile aktive olan metakaolin tabanlı geopolimerlerin düşük performans gösterdiği rapor edilmektedir (Celik vd., 2018). Metakaolin tabanlı geopolimerlerin yüksek sıcaklıkta ısı kararlılıklarının uygun modifikasyon kullanılarak büyük ölçüde geliştirilebileceği ifade edilmektedir (M. Li vd., 2022).

Geopolimer üretiminde metakaolin kullanmanın avantajı Si/Al oranının kontrol altına alınabilmesi, beyaz rengi ve alkali çözeltide yüksek çözünürlüğe sahip olması olarak bilinir. Bununla beraber, geopolimerlerde metakaolin kullanımı metakaolinin 500°C-700°C civarında sıcaklıkta kalsine edilmesi gerektiğinden pahalı olabilmektedir (Çelik, 2019).

Metakaolinin normal beton veya harçlarda dayanım ve durabiliteye olumlu katkısında üç mekanizmanın etkili olduğu ifade edilir. Bunlar çimento hidratasyonunu

hızlandırması, puzolanik reaksiyon yapması ve filler etkisi ile boşlukları doldurmasıdır (Görhan vd., 2016).

Metakaolin tabanlı geopolimer beton üretiminde fırında kürlemenin ortam kürüne kıyasla herhangi bir avantaj sağlamadığı ifade edilir (Perera vd., 2007). Ancak yapılan bir araştırmada metakaolin tabanlı geopolimer beton ısı ve ortam kür koşullarında incelenmiş ve erken yaşta dayanımın düşük olması nedeniyle ortam kürü uygulamasının yeterli olmadığı belirtilmiştir (Heah vd., 2011). Kür sıcaklığından önemli ölçüde etkilenen metakaolin tabanlı geopolimer betonlar için optimum kür sıcaklığının 60°C'den düşük olması gerektiği belirtilmiştir (Jindal vd., 2023).

Metakaolin tabanlı geopolimerin dayanımı NaOH konsantrasyonundan büyük ölçüde etkilenmektedir ve optimum 9M molaritede kullanılması önerilmektedir. Artan alkalilik nedeniyle daha yüksek bir NaOH konsantrasyonunda polimerizasyon sürecinin baskılandığı ve mukavemet özelliklerinin olumsuz etkilendiği bildirilmiştir (Jindal vd., 2023).

Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı da metakaolin tabanlı geopolimerlerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranının 0.60 ila 0.80 arasında değişimi daha yüksek mukavemet ve düşük gözeneklilik sağlamaktadır. 0.60'tan daha düşük bir alkali aktivatör/bağlayıcı oranında metakaolin parçacıklarının daha yüksek su ihtiyacı nedeniyle işlenebilirlik azalır ve hava kabarcıkları oluşur bu nedenle gözeneklilik olumsuz etkilenir (Jindal vd., 2023).

Başka bir çalışmada, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.60'ın altında olan kaolin tabanlı geopolimer numunelerde kür esnasında oluşan aşırı çatlama nedeniyle başarısız olduğu rapor edilmiştir. Daha düşük alkali aktivatör/bağlayıcı oranının geopolimerizasyon reaksiyonunun yavaş ilerlemesinden ve işlenebilirliğin azalmasından sorumlu olduğu ifade edilmiştir (Ramasamy vd., 2016).

1.8.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu demir-çelik endüstrisinin bir yan ürünüdür. Yüksek fırın cürufunun betona eklenmesinin işlenebilirlik, basınç dayanımı ve dayanıklılık açısından birçok avantajı bulunmaktadır (Patil vd., 2018). Yüksek fırın cürufu, çoğunlukla Portland çimentosu endüstrisinde ve beton üretiminde kullanılmaktadır (Huang vd., 2015). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu çok miktarda silika ve alümina içermesi nedeniyle

son yıllarda geopolimer malzeme çalışmalarının odak noktası haline gelmiştir. Birçok araştırmacı uçucu kül ve yüksek fırın cürufunu birlikte kullanarak geopolimer beton geliştirmiştir. Deneysel bir araştırmada, bağlayıcı olarak %70 uçucu kül ve %30 yüksek fırın cürufu kullanılmış ve 14M alkali solüsyonla aktive edilerek 50 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer beton üretilmiştir (Deb vd., 2014). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimer betonun maksimum basınç dayanımına ulaşması için kullanılan alkali çözeltinin optimum konsantrasyonunun 14M olduğu rapor edilmiştir (Lee & Lee, 2015).

Yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerlerde geopolimerizasyon ürünün cürufun bileşimi, alkali aktivatör tipi ve pH'tan bağımsız olarak düşük Ca/Si oranına sahip C-S-H jeli olduğu kanıtlanmıştır (Pacheco-Torgal vd., 2008; S.-D. Wang & Scrivener, 1995). Yapılan bir deneysel çalışmada geopolimerlerde kullanılan farklı hammaddelerin farklı bağlayıcı faz oluşturdıkları belirtilmiştir. Yüksek fırın cürufunun Si-Ca sisteminde bulunmasından dolayı oluşan reaksiyon ürününün C-S-H esaslı olduğu, metakaolin ve uçucu kül gibi Si-Al sisteminde hazırlanan geopolimerlerin ise reaksiyon ürününün zeolit benzeri N-A-S-H jeli olduğu ifade edilmiştir (C. Li vd., 2010). Ayrıca yüksek fırın cürufu gibi kalsiyum açısından zengin malzeme kullanılması durumunda polimerizasyon sürecinin hızlandığı kanıtlanmıştır (Nath vd., 2015; Yip & van Deventer, 2003).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolinin birlikte bağlayıcı olarak kullanıldığı geopolimer betonda mükemmel dayanıklılık özelliği gösterdiği deneysel olarak kanıtlanmıştır (Shilar vd., 2023). Alkali aktivatör olarak potasyum ve kalsiyum hidroksit ile %30'a varan oranda öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılan bu çalışmanın gerçekleştirildiği ortam koşullarında üretilen geopolimer beton üstün mekanik performans göstermiştir (Shilar vd., 2023).

Yapılan başka bir çalışmada, bağlayıcı olarak %25 uçucu kül ve %75 yüksek fırın cürufu kullanılan harçlar alkali aktivatör çözeltiyle aktifleştirilmiştir. Harçların mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi sonucu üstün mekanik performans gösterdiği rapor edilmiştir (Marjanović vd., 2015).

Gerçekleştirilen bir diğer deneysel çalışmada, geopolimer betonda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanım yüzdesinin artmasıyla geopolimer betonun basınç dayanımında ve yarmada çekme dayanımında önemli bir iyileşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum kullanılan cüruf yüzdesinin artmasıyla yeterli miktarda reaksiyon ürünlerinin oluşmasına bağlanmıştır. Çalışmada ağırlıkça %80 yüksek fırın

cürufu ve %20 metakaolin kullanımıyla geopolimer betonun daha yüksek basınç dayanımı sergilendiği belirlenmiştir (Kumar vd., 2018).

Yapılan başka bir çalışmada, bağlayıcı olarak %50 cüruf ve %50 uçucu kül kullanılarak hazırlanan geopolimer harçlar çalışmanın gerçekleştirildiği ortam koşullarında kür edilmiş ve yüksek mukavemet vermiştir (Khan vd., 2016). Diğer bir çalışmada, ağırlıkça %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu içeren geopolimer hafif betonlara 48 saat 80°C etüv kürü uygulanmış ve yaklaşık 30 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir (Saridemir & Çelikten, 2020).

1.9. Takviye Malzeme

Geopolimer esaslı ürünler yüksek basınç dayanımı, asit direnci, yangına dayanıklılık ve termal stabilite gibi mükemmel özelliklere sahiptir (Korniejenko vd., 2021). Ancak bu malzemelerin kullanım alanı kısıtlıdır. Bunun nedenlerinden biri çatlamaya karşı dirençlerinin nispeten düşük olmasıdır. Bu nedenle geopolimerlerin lif kullanılarak güçlendirilmesi çalışmaları halen devam etmektedir (Farhan vd., 2021). Eğilme dayanımını arttırmak ve hasar öncesi malzeme tarafından soğurulan enerji miktarını arttırmak için geopolimerler çeşitli lif takviyesi ile güçlendirilmektedir. Lif ilavesi ile çatlakların sayısı ve boyutu azaltılarak malzemedeki çatlakların yol açtığı hasar en aza indirilmeye çalışılmaktadır (Adesina, 2020).

Tokluk, malzemenin enerji absorbe etme kapasitesini ifade eden bir büyüklük olup malzemeye ilişkin malzemenin kırılincaya kadar gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alana karşılık gelmektedir. Süneklik, malzemenin kırılincaya kadar yapmış olduğu toplam şekil değiştirmedir. Geopolimer esaslı malzemelerin sünekliğini arttırmak için pek çok deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir (M. Farooq vd., 2022; Q. Zhao vd., 2007). Önceki çalışmalar esas olarak kullanılan liflerin betonun tokluğu veya sünekliği üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Takviye olarak kullanılan çelik lif ve metalik olmayan liflerin hem tokluğu hem de sünekliği iyileştirmedeki etkisine ilişkin çok az sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir (H. Zhang vd., 2024).

Takviye olarak kullanılan lifler arasında özellikleri bakımından en ilgi çekici olanı bazalt lifidir. Bazalt lifleri diğer lif türlerine kıyasla başarılı mekanik, kimyasal ve ısı performans göstermektedir (Fiore vd., 2015). Bazaltlar, plajiyoklaz, piroksen, olivin, biyotit, hornblend ve %20'den az kuvarsın küçük tanelerinden oluşan yaygın afanitik

magmatik püskürük kayalardır (Haldar, 2017). Bazalt lifi ise bu kayacın eritilip işlenmesi ile elde edilen ve çapı 13-20 μm arasında değişen bir lif türüdür. Bazalt liflerin ısı ve ses yalıtımları oldukça yüksektir (Brigante, 2014). Ayrıca, bazaltın doğada yaygın bulunması sebebiyle diğer liflere kıyasla üretimi daha ucuzdur (Kabay, 2014). Genel olarak bu tür liflerin üretim süreci cam lifine benzer ancak üretimi esnasında daha az enerjiye gereksinim duyulması ve katkı maddesi içermemesi nedeniyle bazalt lifi, cam veya karbon liflere kıyasla daha ucuzdur (Fiore vd., 2015).

Literatür çalışmaları geopolimerler için bir takviye malzemesi olarak bazalt lifi kullanımının geopolimerlerin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını ve mikroyapısını iyileştirdiğini göstermektedir (Amran vd., 2022; Arunagiri vd., 2017; Celik vd., 2018; W. Li & Xu, 2009; Shaikh & Haque, 2018; Şahin vd., 2021; Y. Wang vd., 2021). Gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, hacimce %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında bazalt lif takviye edilen geopolimer hafif betonda %0.3 bazalt takviyesinin diğer oranlara kıyasla daha iyi basınç ve eğilme dayanımı değeri verdiği sonucuna ulaşılmıştır (Asil & Ranjbar, 2022). Başka bir deneysel çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer harçlarda %0,8-1,2 oranında bazalt lif kullanılması basınç ve eğilme dayanımı üzerinde olumlu etkilere sahip olduğu belirlenmiştir (Şahin vd., 2021).

Bazalt ve polipropilen liflerinin hafif agregalı betonun tokluğu üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışmada, hacimce %1 oranında bazalt lif kullanımının eğilme tokluğunu iyileştirmede üstün sonuçlar verdiği ifade edilmiştir (Zeng & Tang, 2021). Başka bir çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer betonda hacimce %0,05 oranında bazalt lif takviyesinin geopolimer betonun kırılma tokluğunu iyileştirdiği bulunmuştur (Y. Wang vd., 2022). Başka bir çalışmada, cüruf ve uçucu kül tabanlı geopolimer betonda, hacimce %0.3 bazalt lif takviyesinin geopolimer betonun deformasyon ve enerji yutma kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığı deneysel olarak belirlenmiştir (W. Li & Xu, 2009).

1.10. Hafif Geopolimer Beton Üretiminde Kullanılan Hafif Agregalar

Hafif agregalar, doğal hafif agrega ve yapay hafif agrega olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Pomza, diatomit, cüruf ve tuf doğal hafif agregalara örnektir. Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş vermikülit, şeyl, kuvars ve arduvaz ise yapay hafif agregalara örnek olarak verilebilir (Duan vd., 2017; Z. Li vd., 2021; Mo

vd., 2016; Öz vd., 2021; Top vd., 2020). Pomza, diyatomit, vermikülit ve perlit gibi hafif agregalar geleneksel beton üretiminde kullanılırken taban külü, ezilmiş kil tuğlası ve atık lastik kauçuğu gibi geri dönüştürülmüş agregalar da geopolimer hafif betonda hafif agrega olarak kullanılmaktadır (Sata & Chindaprasirt, 2020).

Hafif agregaların betondaki en önemli faydası yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlamasıdır. Aynı zamanda çekme mukavemetini, ısı ve ses yalıtımını arttırmakta ve termal genleşme hassasiyetini azaltmaktadır (Ameri vd., 2020; Mouli & Khelafi, 2008; Yang vd., 2010; Yliniemi vd., 2017). Bu özellikler hafif agregaların kütleyi azaltan, suyun hapsedilmesini ve ısı ve sesin daha düşük iletimini sağlayan boşluklu ve gözenekli morfolojiye sahip olmalarının bir sonucudur (Tale Masoule vd., 2022).

Hafif agrega kullanımının bazı zorlukları vardır. Bu agregaların boşluklu ve gözenekli yapıları dolayısıyla su gereksinimleri fazladır. Bu durum betonun dayanımına olumsuz etki eder. Su ile betonun boşluklarına taşınması muhtemel klor ve sülfat gibi tuzlar benzer şekilde betonun dayanıklılığını olumsuz etkiler. Beton boşluklarına taşınan bu tuzlar zamanla donatı ve metal aksamın korozyonunu hızlandırarak yapıların hizmet ömrünü kısaltır (Mo vd., 2016).

Doğal hafif agrega kategorisinde yer alan pomza, erimiş lavların hızla soğuması sonucu oluşan boşluklu ve süngerimsi yapıya sahip camsı volkanik bir kayadır (Wongsa vd., 2018). Asidik ve bazik olmak üzere iki tür pomza vardır. En yaygın olarak kullanılan çeşidi kirli beyaz renkte olan asidik pomzadır. Bazik pomzaya ise literatürde bazaltik pomza veya scoria adı verilmektedir ve siyahımsı renktedir. Asidik pomzanın özgül ağırlığı bazik pomzaya kıyasla daha düşük olup 0.5-1 mertebesindedir. Bazaltik pomzanın özgül ağırlığı ise 1-2 mertebesindedir. Her iki tür de oluşum esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi hızlı terk etmesi neticesinde oldukça gözenekli bir yapıdadır. Pomza bünyesindeki boşlukların birbiri ile bağlantılı olmaması pomzanın en karakteristik özelliklerindendir. Pomzanın pumisit (pumicite) adı verilen ince taneli olanları çimentoda tras malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Pumis (pumice) adı verilen iri taneli olanları ise çoğunlukla briket imalatında kullanılmaktadır (Dikici, 2010).

Dünyada pomza rezervine ilişkin net bir bilgi bulunmamakla birlikte ülkemizdeki pomza rezervinin 2.2 milyar ton olduğu belirtilmektedir. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü (MAPEG) tarafından yapılan araştırmaya göre 2022 yılı için ülkemizde pomza üretiminin 8 milyon ton olduğu rapor edilmektedir (MAPEG, 2023).

1.11. Alkali Aktivatörler

Alkali aktivatör çözeltinin rolü bağlayıcı malzemeyi aktive etmektir. Geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan alkali aktivatör tipi geopolimerizasyon süreci için önemli rol oynamaktadır. Genel olarak kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat ve potasyum silikat gibi hidroksitler ve çözünebilir silikatlardır. Geopolimer bağlayıcılarda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat veya potasyum hidroksit ve potasyum silikat birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır (Davidovits, 1999; Palomo vd., 1999; Swanepoel & Strydom, 2002; Van Jaarsveld vd., 2003; Xu & Van Deventer, 2000, 2002).

1.11.1. Sodyum Hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit (kostik) beyaz renkte nem çekici özellikte kimya ve birçok endüstride kullanılan bir malzemedir. Suda kolaylıkla çözünebilmekte, yumuşak, kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturmaktadır. Herhangi bir kokusu yoktur; sıvı veya katı formda bulunmaktadır. Katı olarak payet (flakes) ve boncuk (pearls) şeklinde, sıvı olarak ise genellikle sulu çözelti şeklinde bulunur. Sodyum hidroksit doğal olarak mevcut değildir. Sodyum klorürün elektrolizi sonucu %50'lik çözelti şeklinde üretilmektedir. Bu esnada klor gazı meydana gelmektedir. Çözeltideki su buharlaştırıldığında ise katı haldeki kostik elde edilmektedir. Sodyum hidroksit aynı zamanda kalsiyum hidroksit ve sodyum karbonat arasındaki bir çift yer değiştirme reaksiyonu ile de üretilmektedir (Şahin, 2020).

1.11.2. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)

Sodyum silikat (cam suyu), alkali silikat peletlerin sıcak suda çözdürülmesiyle veya silis kumu gibi reaktif bir silis kaynağının ilgili alkali hidroksit çözeltisinde hidrotermal olarak çözünmesiyle üretilmektedir. Sodyum silikat, alüminosilikatların aktivasyonunda sodyum hidroksitten sonra en çok kullanılan ikinci aktivatördür. Çözünebilir silis varlığı karışımın işlenebilirliğini, priz süresini ve mekanik özelliklerinin gelişimini etkilemektedir. Oluşan inorganik ürünün mikroyapısını ve kompozisyonunu da değiştirmektedir. Alüminosilikatların sodyum silikat ile aktivasyonunda çözünebilir silis, daha az gözenekli, düzenli ve daha yoğun bir mikroyapının oluşumunu sağlamaktadır. Ayrıca alüminosilikat esaslı toz malzemenin ve aktivatör çözeltisinin yüksek çözünebilir silis muhtevasına sahip

olması bu bağlayıcıların yapısındaki silisyum muhtevasında bir artışa neden olur (Á. Palomo vd., 2004).

1.12. Geopolimer Betonun Taze Hal Özellikleri

Geopolimer betonlarda toz malzemenin tane boyutu dağılımı, morfolojik yapısı ve amorflik derecesi gibi özellikleri betonun hem taze hem de sertleşmiş özellikleri üzerinde oldukça etkili olmaktadır (Diaz vd., 2010; Diaz-Loya vd., 2011).

Geopolimerler hidrasyon reaksiyonu göstermediğinden karışım tasarımı sırasında su ihtiyacı geleneksel betona kıyasla daha azdır. Geopolimer karışımında daha az su bulunması işlenebilirliği azaltmaktadır (Chindaprasirt vd., 2007; Jindal vd., 2017; Reddy, 2010; Srinivasreddy vd., 2013; Yang & Song, 2009). İşlenebilirlik karışımında kullanılan alkali konsantrasyonu, bağlayıcı türü ve miktarı ile ortam sıcaklığı gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Aynı zamanda işlenebilirlik alkali çözelti, süperakışkanlaştırıcı ve ekstra su gibi sıvı bileşenlerin önceden karıştırılıp ardından kuru karışıma ilave edilmesiyle iyileştirilebilir (Nuruddin vd., 2011).

Literatürde süperakışkanlaştırıcı kullanımının geopolimerlerin işlenebilirliğini arttırdığı ancak basınç dayanımı gelişimini olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Chindaprasirt vd., 2007). Geopolimer karışıma CaO içeren bir madde eklenerek süperakışkanlaştırıcı kullanımının basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi bertaraf edilebilir ve karışımın işlenebilirliği iyileştirilebilir (Jindal vd., 2017; Pacheco-Torgal vd., 2011). Ayrıca naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcılar da geopolimerlerin işlenebilirliğini arttırmaktadır (Palacios & Puertas, 2005). Ağırlıkça %2'ye varan oranda süperakışkanlaştırıcı kullanarak geopolimerlerin basınç dayanımını etkilemeden işlenebilirliklerinin arttırabileceği belirtilmektedir (Jindal vd., 2017). Geopolimerlerin işlenebilirlikleri aynı zamanda alkali içeriğinin miktarına göre değişir ve alkali konsantrasyonunun artması ile azalır (Jindal vd., 2023).

Mineral katkılar genellikle betonun mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılır. Metakaolin geleneksel betonda katkı maddesi olarak kullanıldığında işlenebilirliğin azalmasına neden olur. İşlenebilirlikteki azalmanın nedeni metakaolinin inceliği ve plaka benzeri yapısından dolayı su ihtiyacının fazla olmasındandır (Güneyisi vd., 2012; Melo & Carneiro, 2010; San Nicolas vd., 2013). Literatürde, metakaolin tabanlı

geopolimer betonda metakaolin kısmen cüruflla değiştirildiğinde işlenebilirliğin iyileştiği rapor edilmektedir (Alanazi vd., 2017).

Geopolimerlerin priz süresi alkali aktivatör çözeltisinin bileşimi, alkali aktivatör çözeltisinin kütlece bağlayıcı malzeme miktarına oranı, kür tipi ve kür sıcaklığı gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. Geopolimer karışımının ortam sıcaklığında ilk 24 saatte prizini aldığını ancak düşük sıcaklıkta kürlenmesi durumunda ise bu sürenin 7 gün sürdüğünü belirtmektedir. Havayla soğutulan karışımlarda priz süresinin 4 gün sürdüğü ancak ısıl kür yönteminde ise karışımların 2 ila 4 saat içinde priz aldığı belirtilmektedir (Rovnaník, 2010). Geopolimerlerde kalsiyum içeren malzemelerin varlığının priz sürecini hızlandırdığı ifade etmektedir (Pangdaeng vd., 2015). Kür sıcaklığı, geopolimerizasyon sürecinde önemli bir rol oynamakta ve genel olarak kür sıcaklığı arttıkça geopolimer betonun priz süresi kısalmaktadır (Givi vd., 2010; Liew vd., 2016; Marín-López vd., 2009). Geopolimer harcına farklı lifler eklendiğinde de priz süresi değişmektedir. Priz süresinin bazalt lif, polivinil alkol, karbon lif ve jüt lif takviyesiyle önemli ölçüde azaldığı deneysel olarak kanıtlanmıştır. Bu durum yukarıda bahsedilen liflerin özellikle de jüt lifinin yüksek su emme özelliğinden kaynaklı polimerizasyon reaksiyonuna girmemiş serbest suyu emerek malzemenin daha viskoz hale gelmesine ve daha hızlı priz almasına neden olması şeklinde açıklanmaktadır. Kullanılan lifler sertleşme süresi açısından kıyaslandığında bazalt lifin en kısa sürede sertleştiği belirtilmektedir (Chen vd., 2024).

Geopolimerlerin priz alma ve sertleşme mekanizması tam olarak anlaşılmamıştır. Geopolimerizasyon süreci alüminosilikat içeren ham maddelerin alkali çözeltilerde çözünmesi ve bunun sonucunda alüminat ve silikat monomerlerinin oluşmasıyla gerçekleşmektedir. Daha sonra monomerlerin oligomerlere ve ardından geopolimerlere dönüşmesiyle geopolimerizasyon süreci tamamlanmaktadır (Singh & Middendorf, 2020).

1.13. Geopolimer Betonun Mekanik Özellikleri

Geopolimer betonların basınç dayanımları çeşitli parametrelere bağlıdır (Ryu vd., 2013). Bağlayıcı olarak kullanılan hammaddelerin inceliğinin yüksek olması, nano boyutta malzeme ilavesi, alkali aktivatör çözeltileri ve alkali aktivatörlerin konsantrasyonu mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir. Toz malzemedeki alüminosilikat partiküllerinin yüzey hidrolizini artırmak için güçlü bir alkali ortam gerekmektedir (De Vargas vd., 2011; Hu vd., 2009). Düşük kalsiyumlu (ASTM F Sınıfı) uçucu kül tabanlı

geopolimer beton üretilen bir çalışma neticesinde yüksek sodyum hidroksit molaritesinin geopolimer betonda daha yüksek basınç dayanımı sağladığını rapor edilmiştir (Hardjito & Rangan, 2005). Çalışmada kütlece sodyum silikat çözeltisinin sodyum hidroksit çözeltisine oranının yüksek olması geopolimer betonun basınç dayanımını arttırmıştır. Gerçekleştirilen başka bir çalışmada geopolimer ve Portland çimento hamurunun farklı sıcaklıklardaki üç günlük basınç dayanımları karşılaştırılmış ve geopolimer hamurunun basınç dayanımının Portland çimento hamurunkine kıyasla çok daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Duan vd., 2015).

Metakaolin tabanlı geopolimer betonun mukavemet kazanımı geleneksel betona kıyasla daha yüksektir. Yüksek mukavemet kazancı kalsine bağlayıcı malzemelerin bağlayıcılık özelliği nedeniyledir (Marín-López vd., 2009). Geopolimer betonun basınç dayanımı gelişimi karışımdaki Si/Al oranının yanı sıra su miktarından da önemli ölçüde etkilenmektedir. Geopolimer beton üzerinde gerçekleştirilen pek çok çalışmada basınç dayanımı 20 ila 100 MPa arasında değiştiği rapor edilmektedir (Davidovits, 1991; Lizcano vd., 2012; Marín-López vd., 2009; Steveson & Sagoe-Crentsil, 2005; Wallah & Rangan, 2006). Geopolimerlerin kazandığı basınç dayanımı düzeyi geopolimerizasyon derecesi ile ilgilidir. Öncül malzemelerin çözünmesi ne kadar fazla olursa geopolimer üretimi de o kadar fazla olur ve basınç dayanımı da o denli yüksek olur.

Karışıma cüruf eklenmesi metakaolin tabanlı geopolimer betonun basınç dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Yüksek fırın cürufu ikamesinin metakaolin tabanlı geopolimerler üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada ağırlıkça %40 yüksek fırın cürufu ve %60 metakaolin içeren geopolimerlerin en yüksek basınç dayanımını verdiği rapor edilmiştir (Furlani vd., 2018).

Geopolimerlerin basınç dayanımı reaksiyon ürünlerinin türü, kalsinasyon hızı, sıcaklık, kür süresi ve bağıl nemden de önemli derecede etkilenmektedir (García-Mejía & de Lourdes Chávez-García, 2016). Deneysel bir çalışma neticesinde basınç dayanımının kaolinin kalsinasyon hızına da bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirtilmiştir. Yüksek basınç dayanımı için kalsinasyon hızının yavaş olması gerektiği tespit edilmiştir (Kenne Diffo vd., 2015). Gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise 30°C ila 90°C sıcaklık aralığında artan kür sıcaklığıyla 4 ila 96 saat (4 gün) aralığında artan kür süresinin uçucu kül tabanlı geopolimer betonun basınç dayanımını arttırdığı ancak 24 saatten sonra dayanım hızının yavaşladığı deneysel olarak tespit edilmiştir (Hardjito & Rangan, 2005).

1.14. Geopolimer Betonun Durabilite Özellikleri

Çiçeklenme, beton yüzeyinde oluşan ve genellikle beyazımsı renkli bir tuz birikintisidir. Çiçeklenme, geopolimerlerin kullanımı sırasında karşılaşılan önemli sorunlardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu durum, geopolimerlerin sadece görünüşünü etkilemekle kalmaz aynı zamanda mukavemette azalmaya da yol açar (Yao vd., 2016). Geopolimer betonlarda çiçeklenme alkali aktivatör çözeltinin yüksek konsantrasyonda kullanılmasından kaynaklanır. Çözeltideki alkalilerin yüksek hareketliliği nedeniyle normal koşullar altında doğal ve kendiliğinden gerçekleşen bir süreçtir. Geopolimerdeki çiçeklenme olayı, Portland çimentolu beton yüzeyinde meydana gelen çiçeklenmeden farklı olmaktadır. Geopolimerdeki reaksiyona girmemiş aşırı miktardaki alkali maddeler yüzeye yayılarak havadaki CO_2 ile reaksiyona girip yüzeyde beyaz karbonat birikintileri oluşturur. Geopolimer beton yüzeylerinde $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ tuzu birikirken, Portland çimentolu beton yüzeylerinde CaCO_3 birirmektedir. (Hyeok-Jung vd., 2018; Xie & Ozbakkaloglu, 2015; Z. Zhang vd., 2018).

Çiçeklenme, kapalı kürleme yöntemiyle azaltılabilir. Ancak bu durum erken yaş basınç dayanımını azaltmaktadır. Literatürde, 3 günlük ön kürleme sürelerinin çiçeklenmeyi önemli derecede azalttığı basınç dayanımı üzerinde iyileştirici etkiye sahip olduğu rapor edilmektedir. Bunun temel nedeni geopolimerlerin havayla gecikmeli olarak temas etmesi sonucu suyun buharlaşmasını yavaşlatması, alkali göçünü azaltması ve ham maddelerin reaksiyon derecesini arttırmasıdır. Bu durum, daha fazla N(C)-A-S-H jelinin oluşmasına ve iç gözenekliliğin yoğunlaşmasına fayda sağlamaktadır (Singh & Middendorf, 2020; M. Zhang vd., 2023).

Geopolimerler hava koşullarına karşı dayanıklıdır, 1000°C - 1200°C gibi yüksek sıcaklıklarda stabildir ve yangına dayanıklı malzeme olarak kullanılmaktadır (Davidovits, 1991; Singh & Middendorf, 2020). Gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve kalsine kil tabanlı geopolimerlerin ve harçların yangına dayanıklılıkları araştırılmıştır. Geopolimer harçların 600°C sıcaklığa kadar yangına karşı oldukça dayanıklı olduğu ancak daha yüksek sıcaklıklarda dirençlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca silis dumanı içeren uçucu kül tabanlı geopolimer harcın 800°C ve 1000°C sıcaklığa kadar yangına direnç gösterdikleri deneysel olarak kanıtlanmıştır. Bu malzemelerle üretilen geopolimerlerin özellikle yangına karşı

dayanıklılığın söz konusu olduğu mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği ifade edilmiştir (Saxena vd., 2017).

Geopolimer beton, yangına maruz kaldıktan sonra mukavemetini kaybederek çatlamaya ve ardından dökülmeye neden olması açısından yüksek dayanımlı betona muadil olarak gösterilmektedir (Abid vd., 2021). Ayrıca betonun kırılma dayanımı nedeniyle, basınç yükü altında çekme yüküne kıyasla çok daha iyi performans sergilediği kabul edilmektedir (Saradar vd., 2018). Geopolimer beton, Portland çimento betonundan daha düzgün kırılma düzlemlerine sahiptir (Sarker vd., 2013). Bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin morfolojisindeki değişiklikler aynı zamanda matrisin mikroyapısını da etkileyerek kırılma yükünü azaltabilir. Yüksek performanslı, bakımı yapılabilir bir yapı malzemesi elde edebilmek için geopolimer betonun kırılma dayanımının azaltılması gerekmektedir (Pan vd., 2011).

Yapısal beton elemanlar, elastik gerilme sınırına ulaştığında önce mikro çatlaklar oluşur ardından makro çatlaklar oluşur ve en son aşamada hasar meydana gelir (Lahoti vd., 2019). Su ve diğer zararlı maddeler çatlaklara sızarak çelik donatıyı aşındırır. Bu nedenle küçük çatlaklar betonun uzun vadede dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Ganesh & Muthukannan, 2019).

Literatürde metakaolin tabanlı geopolimerlerin farklı türde asidik özellikte çözeltilerde bekletildiğinde iyi stabilite gösterdiği bildirilmiştir. Geopolimer numuneler deiyonize su, sodyum sülfat çözeltisi, ASTM deniz suyu ve 0,001M sülfürik asit çözeltisi gibi çeşitli asidik özellikteki çözeltilerde bekletilmiş ve 270 güne kadar mükemmel stabilite gösterdiği ve mekanik özelliklerde herhangi bir bozulmaya rastlanmadığı tespit edilmiştir. Bu durum aynı zamanda asidik bir ortama maruz kalan geopolimerlerin alüminosilikat ağ yapısının amorf fazının daha kristalli bir faza geçişini göstermektedir (Liew vd., 2016; A. Palomo vd., 1999). Benzer bir çalışmada, geopolimer numuneler pH değeri 8 olan deniz suyuna maruz kaldığında mekanik özelliklerinde herhangi bir düşüş olmadığı ve %5'lik sodyum sülfat çözeltisinde de yaklaşık 1 yıla kadar benzer davranış sergilediği bildirilmiştir. Geopolimerler daha uzun süre asit çözeltisine maruz bırakıldığında ise pH derecesinin azalmasıyla ciddi bozulmalar meydana geldiği bildirilmiştir. Asit saldırısı Si-O-Al bağlarını kırdığı için çözeltideki asit iyonlarının sayısı artmakta ve bu durum polimer yapının kütle kaybetmesine yol açmaktadır (Slaty vd., 2015).

Donma-çözülme döngüleri, soğuk bölgelerde bulunan beton yapılara zarar vererek uzun vadede performanslarını zayıflatır. Beton yapı donma noktasının üstünde ve altında değişen sıcaklıklara maruz kaldığında bölge sürekli olarak komşu bölgeden su çeker ve bu durum betonda kütle kaybına ve mekanik özelliklerde bozulmaya neden olur (Fu vd., 2011; M. Zhao vd., 2019). Sınırlı sayıda rapor, metakaolin tabanlı geopolimerler üzerindeki donma-çözülme etkisini açıklamaktadır. Yapılan bir çalışmada, metakaolin tabanlı geopolimer beton üzerinde 30 donma-çözülme döngüsü gerçekleştirilmiş ve geopolimerin donma direncinin karışımın su içeriğinin artmasıyla azaldığını bildirilmiştir. Geopolimere cüruf ilave edilmesinin kütle kaybını azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca donma-çözülme döngülerinin beton yüzeyini parçalayarak geopolimer betonun dayanıklılığını önemli ölçüde etkilediği ve karışımdaki su yüzdesinin geopolimerin donma-çözülme direncini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır (Alanazi vd., 2017).

Önceki çalışmalar, geopolimerlerin mikro ölçekte olağanüstü termal kararlılık sergilediğini göstermiştir (Barbosa & MacKenzie, 2003; Bernal vd., 2011). Malzemenin termal etki nedeniyle hacim değişikliğine ve çatlak oluşumuna karşı gösterdiği direnç kapasitesi, yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımını koruyabilmesi, deformasyona karşı direnci termal kararlılık olarak tanımlanır. Yüksek sıcaklığın metakaolin tabanlı geopolimerlerin ağırlık kaybı, termal büzülmesi ve kimyası üzerindeki etkisine ilişkin araştırmalar devam etmektedir (Duxson vd., 2007). Dayanıklılık açısından beton performansının değerlendirilmesinden önce yangının beton üzerindeki etkisinin çok ölçekli bileşenleriyle birlikte incelenmesi önem arz etmektedir. Geopolimerler doğası gereği yangına dayanıklıdır ve inorganik yapıya sahip oldukları için organik polimerler gibi yanmazlar. Toksik değildir ve duman çıkarmazlar. Betonun yangına maruz kalması sonucu beton yüzeyinde dökülmeler meydana gelir ve nihayetinde betonun özellikle de basınç dayanımından ödün verilmesine yol açar. Söz konusu beton dökülmesi, önemli yapısal birimlerin çökmesine de neden olabilmektedir (Ding vd., 2016; Ma vd., 2015).

Beton hacminin %60 ila %80'ini oluşturan agregalar termal genleşmeden sorumludur (Ki-Yeol vd., 1999). Beton yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında agregalar genleşmekte ve çimento hamuru büzülmemektedir (Ghandehari vd., 2010). Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, agregalar türü ve bağlayıcı içeriği geopolimer betonun genleşme derecesini etkilemektedir. Bir ısıtma sürecinde geopolimer bağlayıcı sistemlerin termal deformasyonunun esas olarak altı aşaması vardır. İlk aşamada absorbe edilen su genellikle 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda buharlaşır ve bu durum hafif bir genleşmeyle sonuçlanır.

Daha sonra 100°C–300°C sıcaklık aralığında kılcal büzülme sonucu yüksek miktarda gerilme meydana gelir. Bu büzülme 300°C–350°C sıcaklık aralığında stabil hale gelir. Dördüncü aşamada 550°C–650°C sıcaklık aralığında geopolimerlerin yapısı yoğunlaşır (Toumi vd., 2007). Beşinci aşamada 650°C–800°C sıcaklık aralığında hızlı büzülme veya genleşme meydana gelir. En son aşamada ise 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda geopolimerler erimeye başlamakta ve gözenek yapısının da bozulmasıyla birlikte ilave büzölmeler göröölür (R. He vd., 2020).

Yüksek sıcaklıklara maruz kalma sonucu geopolimer bağlayıcıların büzölmesi ile agregaların genleşmesi arasındaki uyumsuzluğun, geopolimer betonun çatlamasının yanı sıra mukavemet kaybına da neden olduğu önceki literatür çalışmalarında rapor edilmiştir (H. Y. Zhang vd., 2014). Deneysel bir çalışmada, geopolimer betonların 400°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımının %93–107 arasında değıştiğı, 650°C'den sonra bu oranın %59-82, 800°C sıcaklık sonrası %21-29 ve 1000°C sıcaklık sonrası %11-16 oranında bir aralık gösterdiği bildirilmiştir (Sarker vd., 2014). Başka bir çalışmada, geopolimer numunelerin yüksek sıcaklık rejimlerine maruz kalmasının ardından hasar modeli, görsel görünümü ve renk değışimi incelenmiştir. Numunelerin 300°C sıcaklığa maruz kalmasıyla gözeneklerde bulunan serbest suyun buharlaşması sonucu numunelerde çok sayıda geniş ve ince çatlaklar meydana geldiğı ve 800°C sıcaklığa maruz kalmasının ardından 300°C' sıcaklıkta gözlemlenenden daha fazla çatlak ve parçalanma fark edildiğı rapor edilmiştir (Lahoti vd., 2018).

Geopolimerlerin ısı iletkenliğı, yalıtım ürünü veya inşaat malzemesi olarak kullanılıp kullanılamayacağına değeriendirilmesi bakımından önemlidir. Isı iletimini sınırlamaya yönelik tasarım amaçları nedeniyle yalıtım malzemelerinin düşük ısı iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Geopolimerler diğeri yapı malzemeleriyle kıyaslandığında termal iletkenlik değeri daha düşüktür. Örneğinin, metakaolin tabanlı geopolimerlerin termal iletkenlik değeri 1,68±0,09g/cc yoğunluk aralığı için yaklaşık 0,65±0,04 W/mK'dir (Subaer & van Riessen, 2007). Gerçekleştirilen bir çalışmada, uçucu kül tabanlı geopolimer beton 0.37 W/mK termal iletkenlik değeriyle ısı yalıtımı açısından metakaolin tabanlı geopolimer betona kıyasla daha etkili bulunmuştur (Rashad, 2019).

Numune boyutunun yüksek sıcaklıklara maruz kalan çimentolu kompozitlerin davranışını üzerindeki etkisini araştırıldığı bir çalışmada, yüksek sıcaklıkta numune boyutunun değışmesinin mekanik özellikler üzerinde anlamlı bir farklılık oluşturmadiğı tespit edilmiştir (Erdem, 2014). Benzer bir deneysel çalışmada da yüksek sıcaklıkta

numune boyutunun basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (Arioz, 2009).

Literatür çalışmaları ışığında, bu çalışma kapsamında bazalt lif takviyesinin taşıyıcı geopolimer hafif betonun mekanik, ısı özellikleri ve yüksek sıcaklık davranışının yanı sıra mikroyapısı üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı bir değerlendirme amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton üzerinde bazı mekanik deneyler ve yüksek sıcaklık direnci deneyi ile mikroyapısına ilişkin bazı karakterizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ilişkin ayrıntılar bir sonraki bölümde aktarılacaktır.

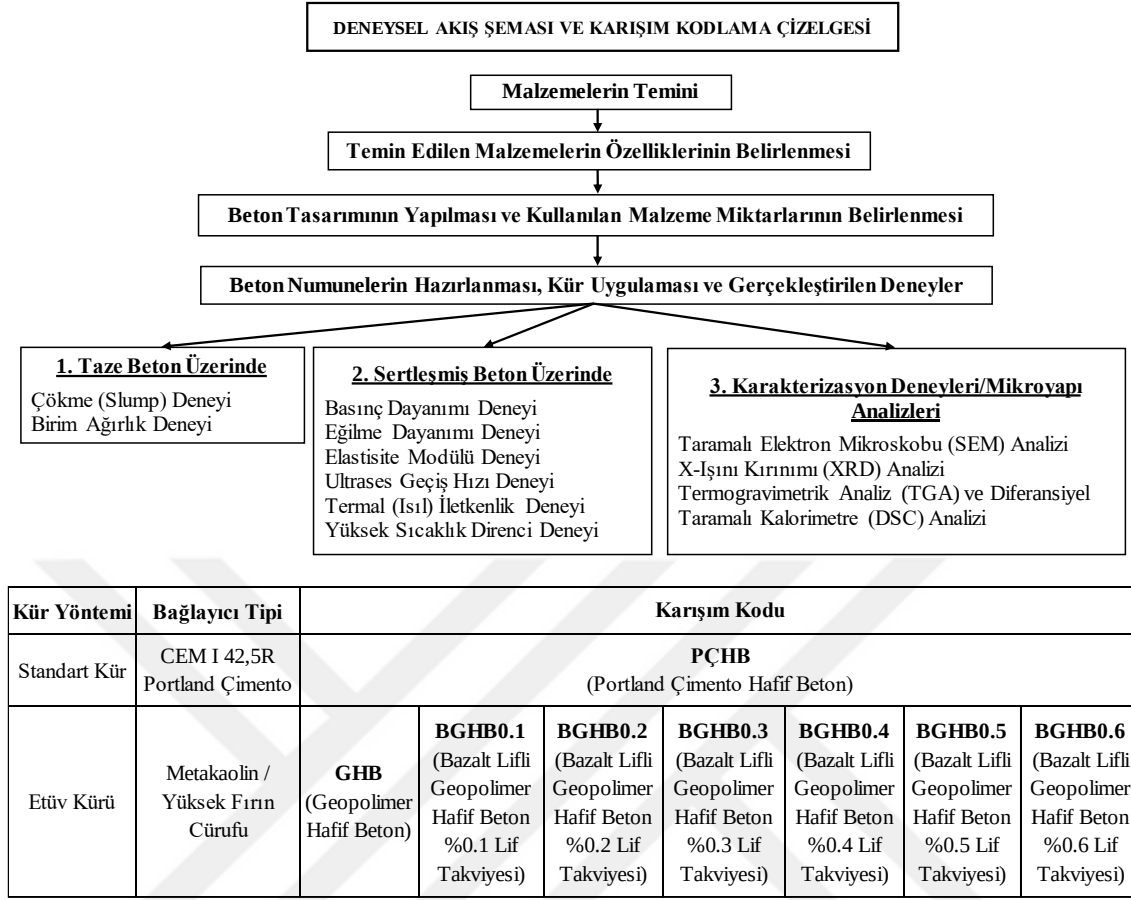


2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ilişkin ayrıntılar bu bölümde aktarılacaktır. Bu kapsamda deney programı, kullanılan malzemeler ve deney ekipmanı ile ön çalışmalar ve metodoloji detaylandırılacaktır.

2.1. Deney Programı

Gerçekleştirilen çalışmada bazalt lifi takviyesinin taşıyıcı geopolimer hafif betonun mekanik, ısı özellikleri ve yüksek sıcaklık davranışının yanı sıra mikroyapısı üzerindeki etkisi çeşitli mekanik deneyler, yüksek sıcaklık direnci deneyi ve karakterizasyon analizleri vasıtasıyla araştırılmıştır. Deneysel çalışmada bağlayıcı malzemeler olarak yüksek fırın cürufu, metakaolin ve çimento, takviye malzeme olarak bazalt lifi, agrega olarak kalker agregası ve pomza kullanılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Belirlenen oranlarda bazalt lifi takviye edilmiş yüksek fırın cürufu ve metakaolin tabanlı taşıyıcı geopolimer hafif betonlar ile karşılaştırma amaçlı bazalt lifi içermeyen referans taşıyıcı geopolimer hafif beton ve Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen betonlardan hazırlanan numuneler 28 gün sonunda mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Belli aralıklarla deneysel çalışma süresince diğer deneyler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar yaklaşık 20°C sıcaklık ve %70 bağıl neme sahip laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel gerçekleştirme neticesinde elde edilen ölçümler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve literatürle kıyaslamalı olarak irdelenmiş ve yorumlanmıştır. Tüm sonuçlar tablolar ve grafikler halinde verilmiştir. Çalışma programına ilişkin akış şeması ve ilişkin karışım kodlama çizelgesi Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Gerçekleştirilen çalışmaya ilişkin programı ve karışımların kodları

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen beton üretimleri ve ilişkin mekanik deneyler ile yüksek sıcaklık direnci deneyi için Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarı olanakları kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimini belirlemek için Enerji Dağılımlı X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında ve metakaolinin özgül yüzey ölçümü için BET Analizi Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Termal (Isıl) İletkenlik Tayini Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde gerçekleştirilirken; Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik (TG) Analiz ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizleri ise Ordu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.2. Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ilişkin detaylar ve özellikler verilmektedir.

2.2.1. Bağlayıcı Malzemeler

Deneysel çalışmada taşıyıcı geopolimer hafif beton üretmek amacıyla metakaolin ve yüksek fırın cürufu, Portland çimentolu hafif beton üretmek için CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu bağlayıcılara ait görsel Şekil 6'da verilmektedir. Metakaolin AVS Mineral firmasından, yüksek fırın cürufu özel bir firmadan temin edilirken çimento Trabzon Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3'te, çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler ise Tablo 4'te verilmektedir. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ilişkin XRD analizi sonucu ve 5000 kat büyütme SEM görüntüsü sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'te verilmektedir. XRD analizinde yüksek fırın cürufu yüksek oranda kalsit mineralleri içerirken metakaolinde ise yoğunluklu olarak kuvars minerali ve yanı sıra az miktarda mullit, hematit ve kaolinit mineralleri içermektedir.



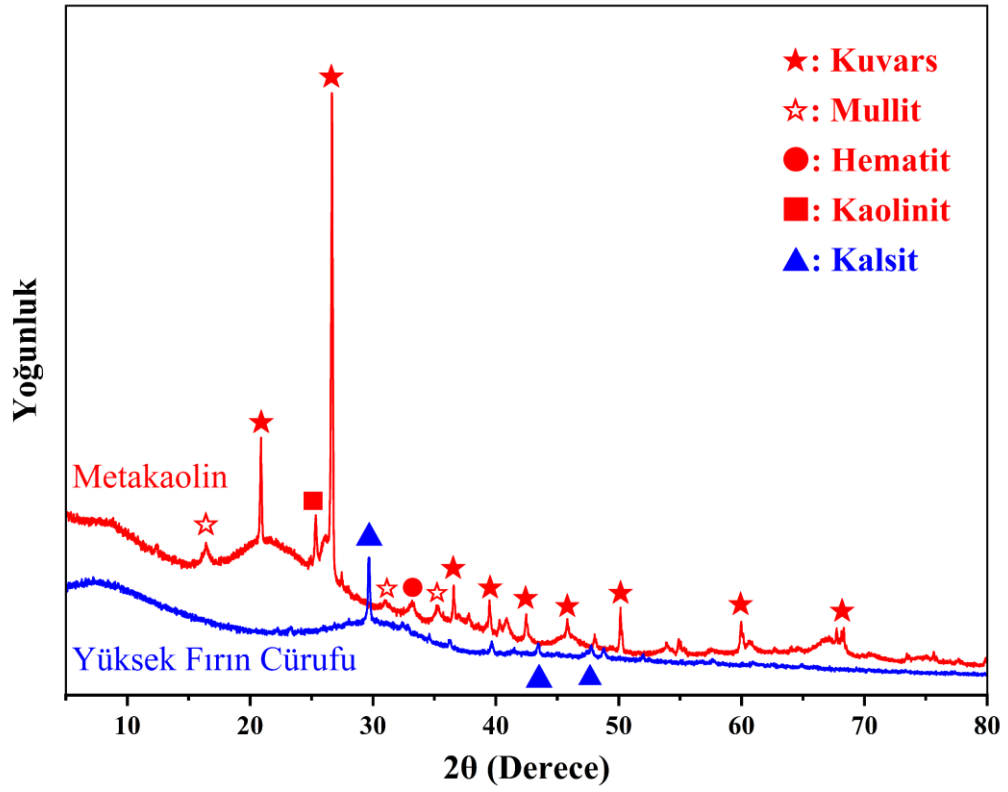
Şekil 6. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemeler

Tablo 3. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler

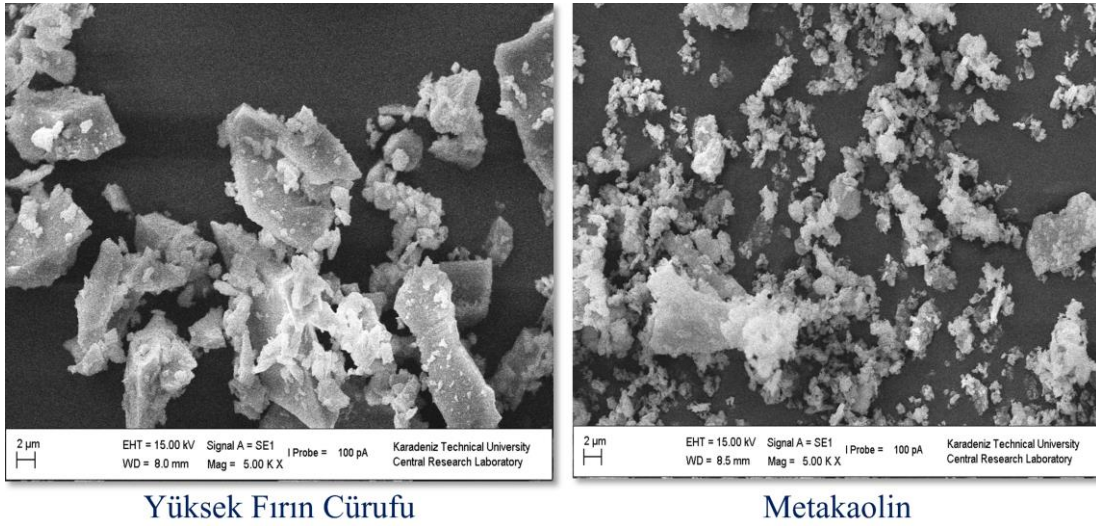
Kimyasal Bileşenler	Metakaolin (%)	Yüksek Fırın Cürufu (%)
SiO ₂	54.50	32.50
Al ₂ O ₃	42.50	14.40
CaO	-	35.70
Fe ₂ O ₃	< 0.50	1.46
MgO	-	4.15
K ₂ O	-	0.735
Na ₂ O	-	0.344
SO ₃	-	1.68
P ₂ O ₅	-	0.0176
TiO ₂	-	2.07
MnO	-	0.815
Kızdırma Kaybı (%)	1.0	-
Özgül Yüzey (m ² /kg)	6281	-
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2.60	2.90

Tablo 4. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel ve Mekanik Özellikler		
Bileşen	İçerik (%)			
SiO ₂	17.75	32 µm elek üstünde kalan (%)		9.4
Al ₂ O ₃	4.60	Özgül Ağırlık (g/cm ³)		3.10
Fe ₂ O ₃	2.97	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)		3356
CaO	58.96	Priz Başlama (dakika)		170
MgO	1.55	Priz Sonu (dakika)		225
SO ₃	3.05	Hacim Genleşmesi (mm)		1.0
Cl ⁻	0.0110	Basınç	2 Gün	29.3
Na ₂ O	1.03	Dayanımı		
Kızdırma Kaybı	3.91	(MPa)	28 Gün	53.0
Çözünmeyen Kalıntı	0.87			



Şekil 7. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ait XRD analizi



Şekil 8. Metakaolin ve yüksek fırın cürufuna ait 5000 kat büyütme SEM görüntüsü

2.2.2. Takviye Malzeme

Deneyisel çalışmada takviye malzeme olarak görseli Şekil 9'da verilen ve Dost Kimya firmasından temin edilen bazalt lif kullanılmıştır. Bazalt lifine ait teknik özellikler Tablo 5'te verilmektedir.



Şekil 9. Bazalt lifi

Tablo 5. Bazalt lifine ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	Değer
Lif Uzunluğu (mm)	12
Elyaf Çapı (μm)	9-23
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2.70
Çekme Dayanımı (MPa)	4840
Elastisite Modülü (GPa)	89
Uygulama Sıcaklık Limitleri ($^{\circ}\text{C}$)	-260 - +982
Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	1450

2.2.3. Alkali Aktivatörler

Çalışmada alkali aktivatör çözeltisi olarak görseli Şekil 10'da verilen sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit Pozitif Kimya firmasından, sodyum silikat ise Akbel Kimya firmasından temin edilmiştir. Sodyum

hidroksit % 98.5 saflıkta pul formdadır. Sodyum silikat ise 3 modül olup çözelti halindedir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikata ilişkin özellikleri sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7’de verilmektedir.



Şekil 10. Kullanılan alkali aktivatörler

Tablo 6. Sodyum hidroksitin özellikleri

NaOH (%)	CO ₃ ²⁻ (%)	Cl ⁻ (%)	SiO ₂ (%)	Fe (mg/kg)	Al (mg/kg)
98.5	0.5	0.01	< 0.01	7	1

Tablo 7. Sodyum silikatın özellikleri

Görünüş	Yoğunluk (gr/cm ³) (20°C)	Bome (20°C)	Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)
Renksiz sıvı	1.36	36-38	8.4	26.3

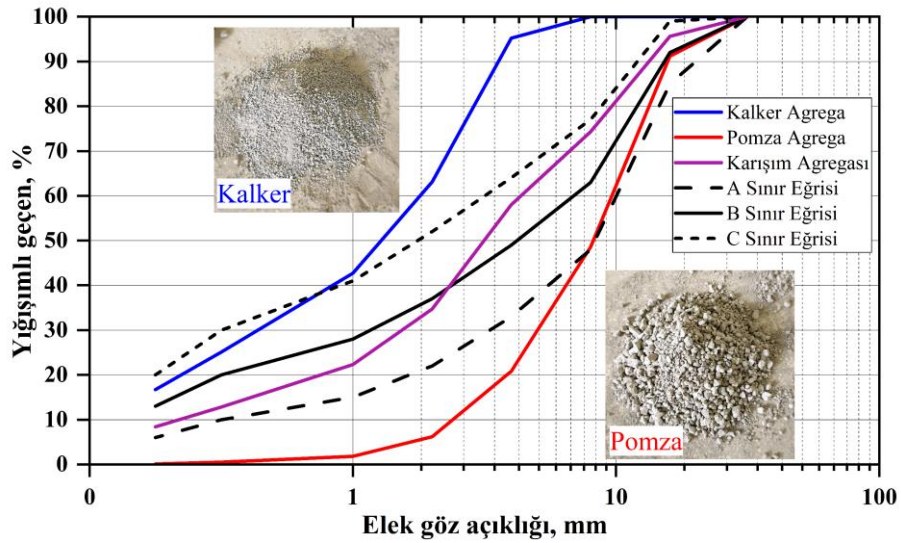
2.2.4. Agregalar

Deneyisel çalışmada normal ince agrega olarak kalker (kireçtaşı) kökenli agrega, hafif agrega olarak pomza kullanılmıştır. Kalker agregası 0-7 mm boyutunda olup Trabzon Aşkale Hazır Beton Tesisinden temin edilmiştir. Pomza Trabzon’da özel bir firmadan temin edilmiş olup 16 mm göz açıklıklı elekten elenerek kullanılmıştır. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan agregalara ilişkin granülometrik bileşim “TS 2511-Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları” standardında verilen sınır eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. İlgili standartta betonda kullanılacak uygun agrega tane büyüklüğü

dağılımı eğrisinin seçimi ve tane büyüklüğü dağılımının belirli sınırlar içerisinde kalabilecek şekilde “TS 802-Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları” standardında yer alan ilgili madde dikkate alınmıştır. A ve C sınır eğrileri arasında düşecek şekilde hacimce %50 kalker agrega ve %50 pomzadan oluşan bir karışım agregası hazırlanmıştır. Agregalara ilişkin elek analizleri ve fiziksel özellikler Tablo 8’de granülometri eğrileri de Şekil 11’de verilmektedir.

Tablo 8. Agregalara ilişkin elek analizleri ve fiziksel özellikler

Elek Göz Açıklığı (mm)	Pomza	Kalker	Karışım	Fiziksel Özellikler	
31.5	100	100	100	Pomza	Doygun Kuru Yüzey Özgöl Ağırlık 1.08
16	91.2	100	95.6		
8	48.6	100	74.3		
4	20.8	95.2	58	Kalker	Su Emme (%) 48.81
2	6.2	63.1	34.7		
1	1.8	42.7	22.3		
0.5	0.5	25.1	12.8	Kalker	Doygun Kuru Yüzey Özgöl Ağırlık 2.67
0.25	0.1	16.7	8.4		
					Su Emme (%) 2.50



Şekil 11. Kullanılan agregalara ilişkin granülometri eğrileri ve ilgili sınır eğrileri

2.3. Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar

Bu bölümde, gerçekleştirilen ön çalışmalar ve bu esnada karşılaşılan sorunlar özetlenmiştir. İlk olarak, Şekil 5'te verilen deneysel akış şemasında belirtildiği üzere kullanılan malzemelerin özellikleri belirlenmiştir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinin ardından TS 2511 standardı ve bu standardın atıf verdiği diğer standartlar uyarınca hafif beton tasarımı yapılmıştır. Deneme karışımları kıvam S3 ve minimum dayanım 17 MPa olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla 18 deneme karışımı gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Taşıyıcı Portland Çimentolu Hafif Beton Tasarımı

İlk denemeler taşıyıcı Portland çimentolu hafif beton üretmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu karışımların tasarımında su/bağlayıcı oranı 0.50, dozaj 350 kg/m³ ve kıvam S3 (~13 cm çökme) olacak şekilde belirlenmiştir. Bu şekilde üretilen hafif beton karışımlarının birim ağırlıkları 1300 kg/m³ mertebesinde olup basınç dayanımı 7 gün sonunda 9.74 MPa ve 28 gün sonunda 11.15 MPa olarak elde edilmiştir. Sonraki aşamada hedef dayanıma (≥ 17 MPa) ulaşmak amacıyla dozaj 400 kg/m³ olarak alınmıştır. Üretilen betonların birim ağırlıkları 1500 kg/m³ mertebesinde olup basınç dayanımı 7 gün sonunda 12.27 MPa, 28 gün sonunda 14.77 MPa olarak belirlenmiştir. Bu aşamada da hedef dayanıma ulaşılamadığından bu kez su/bağlayıcı oran 0.45 olacak şekilde alınarak bir deneme üretimi daha denenmiştir. Bu deneme neticesinde üretilen karışımın birim ağırlığı 1717 kg/m³ ve çökmesi 13 cm olarak belirlenmiş olup basınç dayanımı 7 gün sonunda 18.24 MPa ve 28 gün sonunda 20.09 MPa olarak ölçülmüştür. Bu şekilde taşıyıcı hafif beton için ilgili standartça öngörülen 28 günlük minimum basınç dayanımı koşulu sağlanmış oldu.

2.3.2. Taşıyıcı Geopolimer Hafif Beton Tasarımı

Bu aşamada taşıyıcı geopolimer hafif beton üretimi amacıyla bağlayıcı olarak 350 kg/m³ olacak şekilde metakaolin kullanılmıştır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.50 olarak sabit tutulmuş ve 10M konsantrasyona sahip sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Burada alkali aktivatör çözeltisi sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olacak şekilde kullanılmıştır. Yalnızca standart kür uygulanan numuneler 24 saat sonunda yeterince priz yapamadıkları için kalıplarından çıkarılabilecek düzeyde dayanım düzeyine ulaşamadıkları

görülmüştür. Bunun üzerine alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.80 olacak şekilde ve buhar kürü uygulamak üzere ikinci bir deneme karışımı üretilmiştir. Bu şekilde üretilen numunelere 12 saat ve 24 saat olacak şekilde iki farklı süreli buhar kürü uygulanmıştır. 7 gün sonunda elde edilen basınç dayanımları hem düşük düzeyde kalmış hem de aralarında anlamlı bir fark meydana gelmemiştir. Bu deneme üretimi neticesinde metakaolinin tek başına hedef dayanımı vermekte yeterli olmadığı ve metakaolin ile ikinci bir mineral bağlayıcı kullanmanın zorunlu olduğu hâsıl olmuştur. Bu amaçla yüksek fırın cürufu kullanmaya karar verilmiştir.

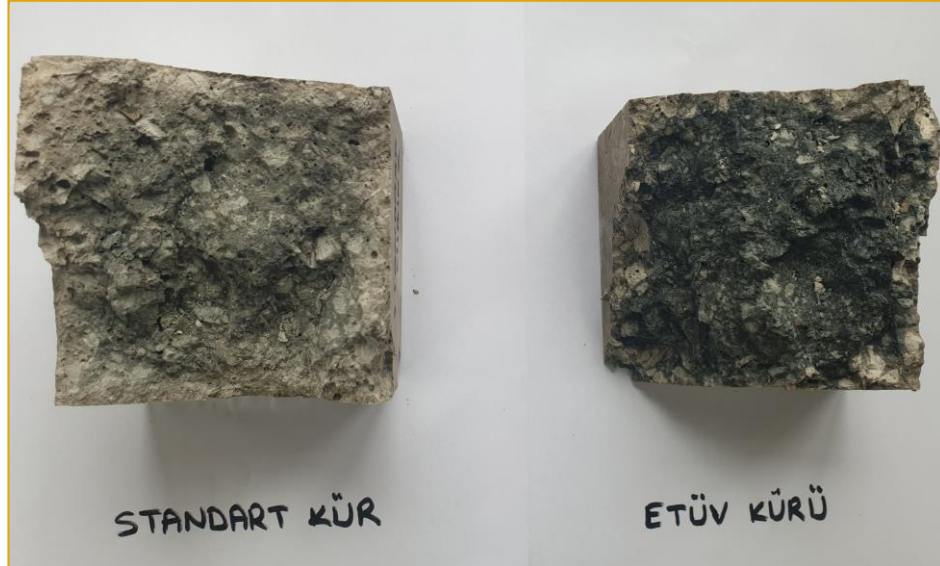
Yüksek fırın cürufu yüksek oranda alümin ve silika içermesi nedeniyle son yıllarda geopolimer üretiminde sıklıkla kullanılan bir mineral katkı malzemesidir. Literatürde bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve metakaolinin birlikte geopolimer beton üretiminde kullanıldığı ve bu şekilde işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık açısından başarılı sonuçların alındığı çok sayıda uygulamaya rastlamak mümkündür. Yüksek fırın cürufu kullanım yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımında artış meydana geldiği deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır (Alanazi vd., 2017; Furlani vd., 2018; Kumar vd., 2018; Shilar vd., 2023).

Tüm bunlar ışığında %50 metakaolin ve %50 yüksek fırın cürufu alınarak toplam bağlayıcı miktarı 400 kg/m^3 olacak şekilde yeni bir deneme karışımı hazırlanmıştır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.50 olarak alınarak gerçekleştirilen karışım sonucu hazırlanan numuneler standart küre tabi tutulmuştur. Bu şekilde hazırlanan geopolimer beton karışımının birim ağırlığı 1556 kg/m^3 ve 7 gün sonunda basınç dayanımı 5.39 MPa olarak belirlenmiştir. Bir sonraki deneme üretiminde yalnızca alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.65 olarak değiştirilmiş ve diğer oranlar sabit tutularak numunelere 24 saat 60°C etüv kürü uygulamaya karar verilmiştir. Bu üretimde birim ağırlık 1544 kg/m^3 ve 7 gün sonunda basınç dayanımı 9.26 MPa olarak ölçülmüştür. Bu denemelerde 7 gün sonunda ulaşılan dayanım düzeyine bakılarak 28 gün sonunda hedef dayanıma ulaşamayacağı anlaşıncı metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanım oranlarını değiştirme kararı alınmıştır. Yeni denemede %25 metakaolin ve %75 yüksek fırın cürufu alınmış ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.775 olarak değiştirilmiştir. Bu karışımdan elde edilen numunelere 24 saat 60°C etüv kürü uygulanmış olup kür sonrası numunelerin yüzeylerinde nem kaybı nedeniyle oldukça belirgin çatlakların meydana geldiği tespit edilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar yaklaşık 5 saat bekletildikten sonra kür havuzuna yerleştirilmiştir. Karışımın birim ağırlığı 1767 kg/m^3 olup 7 gün

sonunda basınç dayanımı 11.05 MPa olarak elde edilmiştir. Yeni bir üretim için sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2 alınarak ve sodyum hidroksit çözeltisi konsantrasyonu 12M olacak şekilde bir alkali aktivatör çözeltisi hazırlanmıştır. Etüv kürü uygulamasının neden olduğu nem kaybına bağlı çatlamanın önüne geçmek amacıyla numuneler ayrı ayrı fırın torbalarına konarak 24 saat 60°C etüv kürü uygulanmıştır. Kür sonrası numuneler torbalardan çıkarılarak nem ve sıcaklık itibarıyla standart hale getirilmiş kür odasına yerleştirilmiştir. Birim ağırlığı 1802 kg/m³ olan bu karışımdan bu şekilde kür gören numuneler üzerinde 7 gün sonunda ölçülen basınç dayanımı 23.46 MPa olup bu şekilde taşıyıcı hafif beton için ilgili standartça öngörülen minimum basınç dayanımı koşulu sağlanmıştır.

Etüv kürü ve standart kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonrası kırılma yüzeylerine ilişkin görsel Şekil 12'de verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, etüv kürü uygulanan numunenin kırılma yüzeyi standart kür gören numuneninkine kıyasla daha koyu renktedir. Etüv kürü uygulanan numunelerin kırılma yüzeyleri fiziksel olarak kolayca ufalanırken standart kür uygulanan numune daha sağlam bir yapı göstermektedir.

Tüm gerçekleştirilen deneme üretimleri neticesinde bağlayıcı olarak %25 metakaolin ve %75 yüksek fırın cürufu kullanarak taşıyıcı geopolimer hafif beton üretimine devam etme yönünde karar verilmiştir.

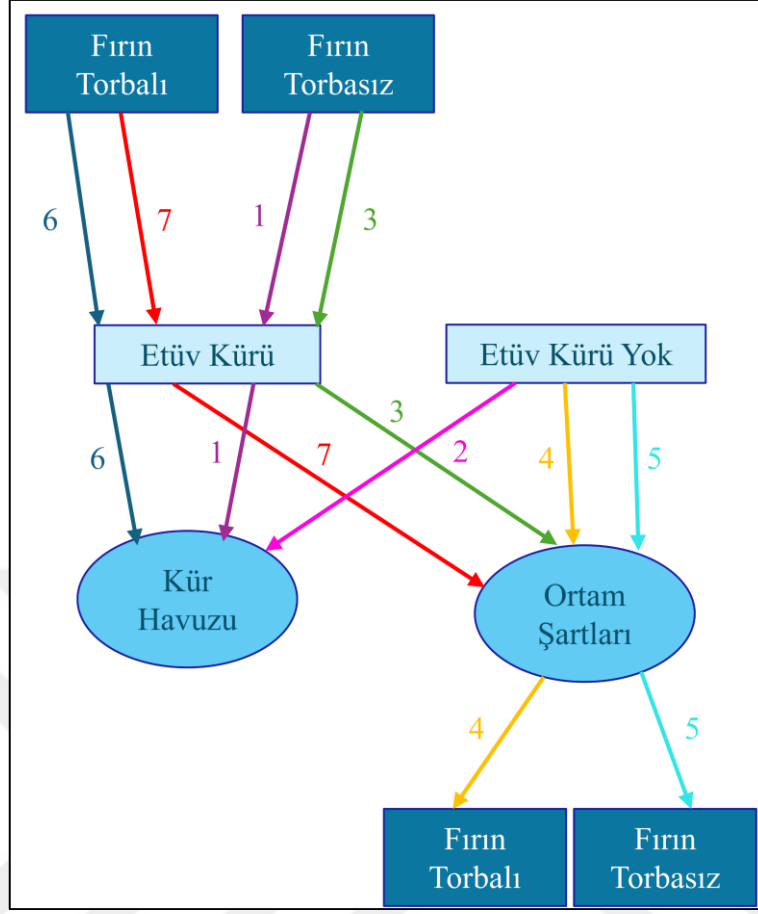


Şekil 12. Standart kür ve etüv kürü uygulanan numunelerin kırılma yüzeyi görseli

2.3.3. Basınç Dayanımı Açısından Farklı Kür Uygulamanın Etkisi

Fırın torbalı ve fırın torbasız etüv kürüne tabi tutmanın ve ayrıca su kürü ve laboratuvar ortamında kür uygulamanın basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla ön çalışmalar kapsamında ilave deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bağlayıcı miktarı, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, sodyum hidroksit konsantrasyonu ve sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı aynı olan üç üretim gerçekleştirilmiştir. Her bir deneme üretiminde karşılaştırma amaçlı 24 saat 60°C etüv kürü ve standart kür ayrı ayrı uygulanmış olup değerlendirme 7 gün sonunda elde edilen basınç dayanımları dikkate alınarak yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmaya ilişkin şematik gösterim Şekil 13'te verilmektedir.

Birinci deneme üretiminde, fırın torbasız numunelere etüv kürü (1 nolu yol) ve standart kür uygulanmış (2 nolu yol) ve numuneler kür havuzuna aktarılmıştır. İkinci deneme üretiminde, fırın torbasız numunelere etüv kürü uygulanmış (3 nolu yol) ve ortam şartlarına bırakılmıştır. Ayrıca ısıtma işlemi uygulanmamış numunelerin havayla temas edip etmemesine bağlı olarak basınç dayanımlarındaki değişimin değerlendirilmesi amacıyla, 4 ve 5 nolu yollardan görüleceği üzere ısıtma işlemi uygulanmamış numuneler fırın torbasına yerleştirilerek ve fırın torbası olmadan ortam şartlarına bırakılmıştır. Üçüncü ve son deneme üretiminde, fırın torbalı numuneler etüv kürü uygulandıktan sonra kür havuzuna ve ortam şartlarına (6 ve 7 nolu yollar) bırakılmıştır.



Şekil 13. Kür etkisini belirlemeye ilişkin şematik gösterim

Bu deneme çalışması neticesinde su kürü ve ortam kürü sonrası basınç dayanımında meydana gelen fark etüve fırın torbasız olarak yerleştirilen numunelerde (1 ve 3 nolu yollar) daha belirgin olmuştur. Kür havuzunda bekletilen numuneler (1 nolu yol) sıcaklık ve nem kontrolü sağlanmış ortam şartlarında bekletilenlere (3 nolu yol) kıyasla %21 oranında daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. Literatürde mevcut bazı çalışmalar bu durumu desteklemektedir (Youssef vd., 2022). Aynı zamanda fırın torbasız etüv kürü uygulanan (1 ve 3 nolu yollar) numunelerde meydana gelen nem kaybı nedeniyle oldukça belirgin çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 14-a).

Fırın torbalı etüv kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları arasında (6 ve 7 nolu yollar) su kürü ve ortam kürü uygulaması neticesinde anlamlı bir fark meydana gelmemiştir (Şekil 14-b). Ancak nem kaybının önlenmesi ve geopolimerizasyon sürecine yardımcı olması nedeniyle fırın torbalı etüv kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları hem kür havuzunda hem de ortam şartlarında fırın torbasız etüv kürü

uygulanan numunelere (1 ve 3 nolu yollar) kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Bu veriler ışığında etüv kürü uygulamasında fırın torbası kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmayan numuneler (2, 4 ve 5 nolu yollar) arasında fırın torbasız olarak ortam şartlarına bırakılan (5 nolu yol) numunelerde çiçeklenme meydana gelmiştir (Şekil 14-c). Kür havuzunda (2 nolu yol) ve havayla teması kesmek amacıyla fırın torbasına yerleştirilen numunelerde (4 nolu yol) çiçeklenme meydana gelmemiştir.



Şekil 14. a) Numune yüzeyinde çatlaklar, b) Su kürü ve ortam kürüne tabi tutulan numune yüzeyleri ve c) Numune yüzeylerinde çiçeklenme

2.3.4. Ön Çalışmalar Esnasında Karşılaşılan Sorunlar

Taşıyıcı Portland çimentolu ve geopolimer hafif betonlara ilişkin tasarım reçetesi belirlendikten sonra temel çalışma programının uygulamasına geçilmiştir. Lif takviyesiz referans taşıyıcı Portland çimentolu ve geopolimer hafif betonların üretimi aşamasında herhangi bir sorun yaşanmazken lif takviyeli üretimlerde literatür çalışmalarından öngörülen ve çalışma programını aksatan hatta gecikmeye neden olan önemli bir sorunla karşılaşılmıştır. Lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton ilk kez üretilirken karışımı oluşturan bileşenler miksera konulurken en son sırada lif ilave edildikten hemen sonra (2-3 dakika içerisinde) beton karışımı aniden katılaşmış ve sertleşmiştir. Katılaşmış ve sertleşen karışım beton kırıcı ile parçalanarak çıkarılabilmektedir (Şekil 15). Literatürde benzer sorunlarla karşılaşıldığı ve bunun kullanılan bağlayıcı malzemenin yüksek Ca^{+2} içeriği nedeniyle olduğu rapor edilmektedir (Lloyd & Rangan, 2009). Ayrıca bu durum literatürde bu tür liflerin yüksek su emme özelliğinden dolayı ve bu liflerin polimerizasyon reaksiyonuna

katılmamış serbest suyu hızlıca emerek karışımın aniden katılaşmasına neden olması şeklinde ifade edilmektedir (Chen vd., 2024).



Şekil 15. Mikserde aniden katılaşıp sertleşen geopolimer karışımı

Literatürde karşılaşılan bu durum karşısında kullanılan sodyum silikat çözeltisinin kimyasal bileşimine ilişkin inceleme yapılmış ve sodyum silikat çözeltisinin daha önce berrak iken bulanık ve gri hale geldiği rapor edilmiştir. Farklı bir tedarikçiden yeni sodyum silikat çözeltisi temin edilmiş ancak aynı sorunun tekrar ettiği belirtilmiştir. Karşılaşılan bu durum çalışmalar esnasında bağlayıcı olarak kullanılan uçucu külün, yüksek kalsiyum içeriğine sahip C Sınıfı taban külü ile kirlenmiş olması nedeniyle meydana geldiğini ifade edilmiştir. Daha sonra yenilenen uçucu kül ile gerçekleştirilmiş üretimlerde bu sorunun yaşanmadığını tespit edilmiştir (Lloyd & Rangan, 2009).

Literatürdeki bu tespitin aksine çalışmamızda aynı malzemelerle çok sayıda deneme üretimi gerçekleştirmiş ancak herhangi bir ani sertleşme gözlemlenmemiştir. Karşılaşılan bu ani katılaşp sertleşme durumu karışıma bazalt lif ilave edildikten hemen sonra gerçekleşmiştir. Sorunun kaynaklanma nedenini anlamak amacıyla küçük hacimli denemeler yapılmıştır. Aynı karışım reçetesine sahip olacak şekilde küçük hacimde taşıyıcı geopolimer hafif beton üretilmiş ve lif ilave edildiği anda ani sertleşme vuku bulmuştur. Benzer sorunun Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonda yaşanıp yaşanmayacağını görmek amacıyla hacimce %0.1 lif oranına sahip küçük bir üretim yapılmıştır. Üretim neticesinde işlenebilirlikte küçük bir kayıp yaşanmasına karşın geopolimer hafif betonda gerçekleştiği şekilde ani sertleşme yaşanmamıştır. Bunun sonucunda çalışmada kullanılan

2 modül sodyum silikat yerine farklı bir firmadan temin edilen 3 modül sodyum silikat çözeltisinin kullanımına karar verilmiştir. Aynı karışım oranları kullanılarak gerçekleştirilen üretimde bu kez işlenebilirlikte küçük bir kayıp yaşanmasına karşın ani sertleşme durumu meydana gelmemiştir. Şekil 16'dan görüleceği üzere 2 modül sodyum silikat kullanılarak hazırlanan çözeltide lif ilavesinden bir süre sonra çözelti bulanık ve gri hale gelmiş ve hemen katılaşmıştır. Üç modül sodyum silikat kullanılarak hazırlanan çözeltide lif ilavesi sonrası buna benzer bir sorun yaşanmamıştır. Dolayısıyla sorunun alkali aktivatör çözeltisinde kullanılan 2 modül sodyum silikat çözeltisinin bazalt lifle olan etkileşimi nedeniyle olabileceği ve bundan böyle çalışmada 3 modül alkali aktivatör çözeltisi kullanmaya karar verilmiştir.



Şekil 16. 2 modül ve 3 modül sodyum silikat çözeltisi ile lif ilavesi sonrası görünüm

2.4. Metodoloji

Bu bölümde, Şekil 5'te verilen deney programı kapsamında öngörülen karışımların tasarlanması, hazırlanması, üretilmesi, kür edilmesi ve bu süreçte gerçekleştirilen deneyler detaylandırılacaktır.

2.4.1. Taşıyıcı Geopolimer Hafif Beton Tasarımı, Hazırlanması, Üretimi ve Kür Koşulları

Burada ön çalışmalar sürecinde tasarlanan Portland çimentolu ve geopolimer hafif beton karışımları için mutlak hacim esasına göre hesaplanan malzeme miktarları kg/m^3 olarak Tablo 9'da verilmektedir. Bir üretim sonucu elde edilen Portland çimentolu ve geopolimer hafif betonlar Şekil 17'de verilmektedir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton karışımı PCHB olarak kodlanmıştır. Karşılaştırma amaçlı üretilen lif takviyesiz taşıyıcı

geopolimer hafif beton GHB olarak kodlanmıştır. Bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonlarda kullanılan hacimce lif yüzdesi kodun sonunda yer almıştır. Örneğin, %0.1 lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton BGHB0.1 şeklinde kodlanmıştır.

Tablo 9. Taşıyıcı hafif beton karışım miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	Çimento	Metakaolin	YFC	Pomza	Kalker	Su	NaOH (12M)	Na ₂ SiO ₃	Lif Oranı (%)
PÇHB	400	-	-	340.72	842.34	180	-	-	-
GHB	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	-
BGHB0.1	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	0.1
BGHB0.2	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	0.2
BGHB0.3	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	0.3
BGHB0.4	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	0.4
BGHB0.5	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	0.5
BGHB0.6	-	100	300	307.88	761.15	-	103.33	206.67	0.6



Şekil 17. Tek üretimde üretilen Portland çimentolu ve geopolimer hafif betonlar

Metakaolin tabanlı taşıyıcı geopolimer hafif betonda bazalt lifi takviyesinin betonun mekanik, ısı ve yüksek sıcaklık özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla 8 üretim gerçekleştirilmiş ve toplam 164 adet numune hazırlanmıştır. Üretilen hafif beton numunelerin boyutu ve sayısına ilişkin bilgiler tablo 10'da verilmektedir. Tabloda Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton numuneler PÇ ve taşıyıcı geopolimer hafif beton numunelerin tümü ise GB olarak kodlanmıştır.

Tablo 10. Üretilen hafif beton numunelerin boyutu ve sayısına ilişkin bilgiler

Deney Adı	Numune Boyutu (mm)	Numune Sayısı
Basınç Dayanımı	150x150x150 (PÇ) ve 100x100x100 (GB)	3PÇ+21GB=24
Eğilme Dayanımı	100x100x400	3PÇ+21GB=24
Elastisite Modülü	100/200	1PÇ+7GB=8
Termal (Isıl) İletkenlik	50x300x300	1PÇ+7GB=8
Yüksek Sıcaklık Direnci	100x100x100	8PÇ+84GB=92
Analizler	100x100x100	1PÇ+7GB=8

Üretimlerde 60 litre kapasiteli düşey eksenli bir karıştırıcı kullanılmış olup her üretim için 40 litrelik harman hazırlanmıştır. Karıştırıcı üretim öncesi ıslatılıp süzdürüldükten sonra karışımı oluşturan malzemelerin karıştırıcıya doldurma prosedürü aşağıdaki gibidir. Karıştırıcıya öncelikle pomza doyma suyu ile birlikte doldurulup iyice karıştırıldıktan sonra doyma suyu pomza tarafından tamamen emilmesi için 10-15 dakika kadar beklenmiştir. Ardından kalker agregası ilave edilip karıştırılmasının hemen akabinde Portland çimentolu hafif beton karışımı için sırasıyla çimento ve karışım suyu ilave edilerek homojen bir karışım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Geopolimer hafif beton üretiminde ise pomzaya ilave edilen doyma suyunun tamamı emildikten sonra karışıma sırasıyla metakaolin, yüksek fırın cürufu, NaOH çözeltisi ile sodyum silikat çözeltisi karışımı ilave edilerek homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemi sürdürülmüştür. 12M olacak şekilde 24 saat önceden hazırlanan NaOH çözeltisi deney öncesi sodyum silikat çözeltisiyle karıştırılarak alkali aktivatör karışımı elde edilmektedir. Burada kullanılan alkali aktivatör miktarı Portland çimentolu hafif beton karışımı kıvamında bir karışım elde edecek şekilde ayarlanmaktadır. Bu prosedür tüm geopolimer hafif beton üretimleri için geçerli olup lif takviyeli üretimlerde belirlenen miktarda bazalt lif nihai olarak karışıma ilave edilerek karıştırma işlemi homojen bir karışım elde edilinceye kadar sürdürülmüştür.

TS EN 12390-2 standardı uyarınca hazırlanan Portland çimentolu hafif beton numuneler kalıpları içinde 24 saat $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de %95 bağıl nem ortamında bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılarak $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de su havuzunda deney gününe kadar (28gün) saklandılar. Geopolimer hafif beton numuneler de benzer şekilde kalıplarında 24 saat $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 95% bağıl nem ortamında bekletildikten sonra fırın torbasına konarak 24 saat 60°C etüv kürü uygulamasına tabi tutulmuşlardır. Akabinde numuneler torbalarından çıkarılarak sıcaklık ve nem kontrollü kür odasına yerleştirilmiş ve deney gününe (28 gün)

kadar bu koşulda saklandılar. Numunelerin hazırlık ve kür sürecine ilişkin görsel Şekil 18 ve Şekil 19’da verilmektedir.



Şekil 18. Taşıyıcı geopolimer hafif betonların hazırlık süreci



Şekil 19. Su havuzunda ve kür odasında tutulan taşıyıcı hafif beton numuneler

2.4.2. Çökme (Slump) Deneyi

Çökme deneyi, taze betonun işlenebilirliğini belirlemek amacıyla TS EN 12350-2 (2019c) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde alt taban çapı 200 mm, üst yüz çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metal içi boş, kesik huni şeklinde kalıp kullanılmıştır. Taze beton, kesik huni şekilli kalıp içerisine eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı, kalıp yüksekliğinin yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirme esnasında her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Çökme hunisinin üstü mala ile düzeltildikten sonra çökme hunisi el tutamaklarından tutularak düşey şekilde yukarıya doğru yavaşça çekilerek alınmıştır. Huninin alınmasından hemen sonra, huni üst yüzey seviyesi ile çöken beton kütesinin en yüksek noktası arasındaki çökme mesafesi ölçülerek kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen çökme deneyi Şekil 20'de verilmektedir.



Şekil 20. Çökme deneyinin gerçekleştirilmesi

2.4.3. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Taze halde betonun birim hacim ağırlığını ölçmek amacıyla 5 litre hacme sahip metal kalıp kullanılmıştır. Taze beton, kalıba iki aşamada yerleştirilmiş ve her tabaka sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Kalıbın darası düşürülüp belirlenen beton ağırlığı kalıbın hacmine bölünerek taze betonun birim hacim ağırlığı belirlenmiştir.

2.4.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 (2019a) uyarınca gerçekleştirilmiştir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton için üç adet 150 mm ve taşıyıcı geopolimer hafif beton için her bir üretimde üçer adet olacak şekilde 100 mm boyutlu küp numuneler kullanılmıştır. Deneyde 250 ton yükleme kapasiteli pres kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi 28 günlük beton numuneler üzerinde yükleme hızı 0.6 MPa/s olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Beton numunelerin basınç dayanımı aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Burada, σ basınç dayanımını (MPa), F numunenin maksimum kırılma yükünü (N) ve A ise numunenin yüzey alanını (mm^2) ifade etmektedir. Gerçekleştirilen basınç dayanımı deneyi Şekil 21’de verilmektedir.



Şekil 21. Basınç dayanımı deneyi presi

2.4.5. Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyi TS EN 12390-5 (2019b) uyarınca gerçekleştirilmiştir. Her bir üretim için üçer adet 100x100x400 mm boyutlu prizmatik numuneler kullanılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi 28 günlük beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Beton numunelerin eğilme dayanımı aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (3)$$

Burada, f eğilme dayanımını (MPa), F numunenin maksimum kırılma yükünü (N), L mesnetler arası mesafeyi (mm), b ve d numunenin en kesit boyutlarını (mm) ifade etmektedir. Gerçekleştirilen eğilme dayanımı deneyi Şekil 22’de verilmektedir.



Şekil 22. Eğilme dayanımı deneyi aparatı

2.4.6. Elastisite Modülü Deneyi

Betonun elastisite modülünün belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyde her bir üretim için 100x200 mm boyutlu silindir numune kullanılmıştır. Elastisite modülü deneyi 28 günlük beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numunede meydana gelen deformasyon her numune için iki adet düşey olarak yerleştirilen tek eksenli 90 mm uzunluğundaki birim deformasyon ölçer (strain gauge) ile ölçülmüştür. Ölçüm yapılmadan önce birim deformasyon ölçerlerin beton yüzeye sağlam bir şekilde yapıştırılması gerekmektedir. Bunun için öncelikle yapıştırılacak yüzey temizlenip pürüzsüz ve düz hale getirildikten sonra beton yüzeye uygun yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Ardından yük ve deformasyon değerleri veri toplama cihazı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Beton numunelerin elastisite modülü gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin sıfır noktası ile numunenin basınç dayanımının %40’ına eşit gerilme değeri arasındaki doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen elastisite modülü deneyi Şekil 23’te verilmektedir.



Şekil 23. Elastisite modülünün belirlenmesi

2.4.7. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Betonun ultrases geçiş hızının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyde, basınç dayanımı deneyi için hazırlanan küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler basınç dayanımı deneyine tabi tutulmadan önce ultrases geçiş hızları ölçülmüştür. Ölçümler, kullanılan cihazın kalibrasyonu yapıldıktan sonra numunenin döküm yönüne dik ve numunenin düz yüzeylerinde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ultrases geçiş hızı deneyi Şekil 24’te verilmektedir. Beton numunelerin ultrases geçiş hızı aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$UGH \text{ (km/s)} = \frac{\text{Numunenin Uzunluğu (mm)}}{\text{İletim Süresi (\mu s)}} \quad (4)$$



Şekil 24. Ultrases geçiş hızı deneyi düzeneği

2.4.8. Termal (Isıl) İletkenlik Deneyi

Termal iletkenlik deneyi, betonun termal iletkenlik katsayısının belirlenmesi amacıyla ASTM C518 (2021) uyarınca gerçekleştirilmiştir. Deneyde her bir üretim için 50x300x300 mm boyutlu plak numune kullanılmıştır. Deney öncesi numunelerin yüzeyleri düzgün ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Numuneler termal iletkenlik deneyi öncesi $105 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Çalışmada ASTM C518, JIS A1412, ISO 8301 ve DIN12667 standartlarında belirtilen şartlara uygun ölçüm yapan LINSEIS HFM300/3 marka termal iletkenlik analiz cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz sıcak ve soğuk olmak üzere iki plakaya sahiptir. Sıcak plaka 25°C ve soğuk plaka 15°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Termal iletkenlik katsayısı aşağıda verilen Fourier ısı denklemi yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$q = -k \times A \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5)$$

Burada, q ısı akışını (W/m^2), k termal iletkenlik katsayısını, A alanı (m^2), ΔT sıcaklık farkını ve Δx numune kalınlığını ifade etmektedir. Gerçekleştirilen termal (ısıl) iletkenlik deneyi düzeneği Şekil 25'te verilmektedir.



Şekil 25. Termal iletkenlik deneyi düzeneği

2.4.9. Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyi

Yüksek sıcaklık direnci deneyi, betonun yüksek sıcaklık performansının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyde her bir üretim için üçer adet 100 mm boyutlu küp numuneler hazırlanmış, numuneler 200°C, 400°C, 600°C ve 700°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. 27. günde numuneler, 105±5°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilmiş ve ardından oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Numuneler ısıtma hızı 5°C/dakika olan yüksek sıcaklık fırınında 200°C, 400°C, 600°C ve 700°C sıcaklıklara 1 saat maruz bırakılmış ardından fırının kapağı açılmış ve numuneler fırın içinde soğumaya bırakılmıştır. Deney sonunda (28. günde) numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı değişimi ölçülmüş ve basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen yüksek sıcaklık direnci deneyi Şekil 26’da verilmektedir.



Şekil 26. Yüksek sıcaklık fırını

2.4.10. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taramalı elektron mikroskobu analizi, Portland çimentolu hafif betonlara ilişkin hidratasyon ve geopolimer hafif betonlara ilişkin geopolimerizasyon reaksiyonları sonrası oluşan ürünlerin mikroyapılarını incelemek ve elementel bileşimlerini karakterize etmek için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları ile sertleşmiş beton üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu şekilde hidratasyon ve geopolimerizasyon mekanizmasının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Deneyde her bir üretim için 100 mm boyutlu küp numuneler hazırlanmıştır ve hazırlanan numuneler diğer karakterizasyon deneylerinde de kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu analizi için beton numuneden 10 mm boyutunda örnekler alınmış ve incelenecek kırık yüzeyi dışındaki diğer yüzeyleri zımparalanıp düzeltilmiştir.

Hazırlanan kırık yüzey örnekler, üzerinde çift taraflı yapışkanlı karbon bant olan pirinç bir plaka üzerine yerleştirilmiş ve örneklerin üst kısmının kenarlarına da birer küçük bant yapıştırılmıştır. Karbon bant seramik ve beton gibi yalıtkan malzemelerin iletkenliğini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Örnekler daha sonra altın kaplama işlemi için vakum cihazına yerleştirilmiştir. İstenilen vakum değerine ulaşıldıktan sonra altın kaplama işlemi tamamlanmıştır. Altın kaplama işleminden sonra örnekler, ZEISS EVO LS 10 marka

taramalı elektron mikroskobu cihazına yerleştirilmiştir. Cihazda bulunan ikincil elektron (SE) ve geri saçılan elektron (BSE) dedektörleri ile yüksek çözünürlükte görüntü elde edilmektedir. Cihaz, enerji dağılım spektrometresi (EDS) sistemi ile belirlenen bir noktanın, çizginin ve alanın taramasını ve seçilen alanın X-ışını haritalamasını yapmaktadır. Gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu analizi düzeneği Şekil 27’de verilmektedir.



Şekil 27. Taramalı elektron mikroskobu deney düzeneği

SEM analizi ile hamur fazı ve agrega-hamur fazı arayüzeyinde oluşan ürünlerin yapısı incelenmiştir. Gerekli görülen bölgelerde EDS analizi de yapılarak element bileşimleri incelenmiştir.

2.4.11. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışını kırınımı analizi, Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonun ve taşıyıcı geopolimer hafif betonların kristalografik faz tayini amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analizde, karakterizasyon analizlerinde kullanılmak üzere hazırlanan 100 mm boyutlu küp numunelerden 10 mm boyutunda örnekler alınmıştır. Analizde Panalytical X'Pert3 Powder

marka X-ışını kırınımı analizi cihazı kullanılmıştır. Kullanılan X-ışını kırınımı analiz cihazı Şekil 28’de verilmektedir.



Şekil 28. X-ışını kırınımı analiz cihazı

2.4.12. Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi

Termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analizi, Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonun ve taşıyıcı geopolimer hafif betonların sıcaklığa ve zamana bağlı kütle değişiminin belirlenmesi, ısı kapasitesinin sıcaklıkla nasıl değiştiğinin belirlenmesi amacıyla eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Analizde, karakterizasyon deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan 100 mm boyutlu küp numunelerden örnekler alınıp toz haline getirilmiştir. Analiz, sıcaklık artış hızı 10°C/dakika olacak şekilde 25°C-1000°C sıcaklık aralığında uygulanmıştır. Kullanılan termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analiz cihazı Şekil 29’da verilmektedir.



Şekil 29. Termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analiz cihazı

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen bulgular ve bu bulgulara ilişkin irdeleme ve yorumlar bu bölümde aktarılmaktadır.

3.1. Taze Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.1.1. Çökme Deneyi Sonuçları

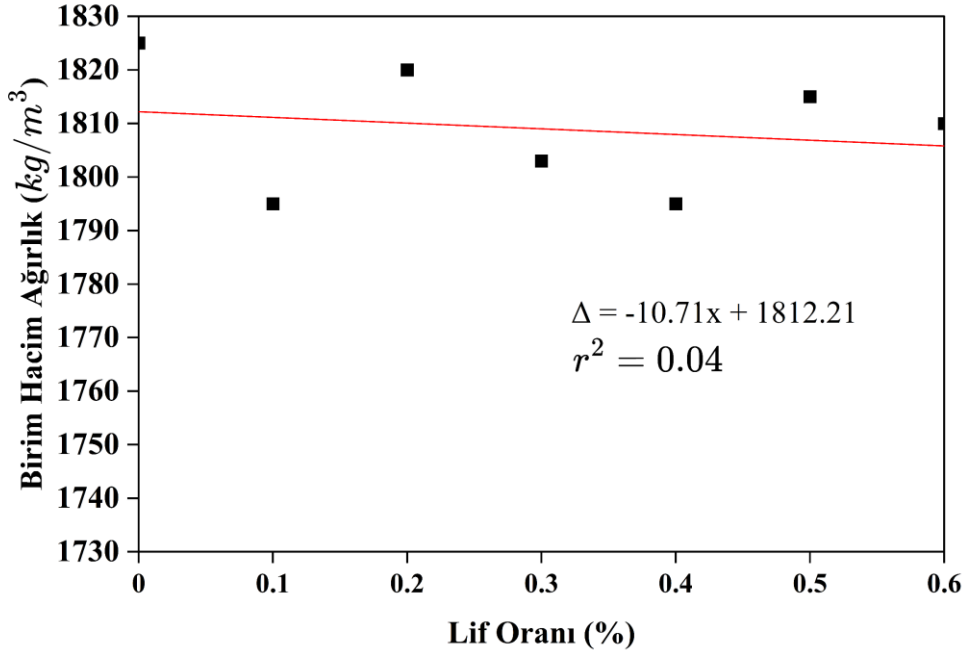
Üretilen taşıyıcı hafif betonların kıvamı S3 (10-15 cm çökme) olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bazalt lif kullanılan üretimlerde hedef kıvamı sağlamak amacıyla ilave alkali aktivatör solüsyon kullanılmıştır.

3.1.2. Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin ölçülen taze halde birim hacim ağırlıklar Tablo 11’de ve lif oranı ile taze halde birim hacim ağırlık arasındaki ilişki Şekil 30’da verilmektedir. Tablodan görüldüğü gibi taze betonlar üzerinde ölçülen birim hacim ağırlıklar 1775 kg/m^3 ile 1825 kg/m^3 arasında değişmektedir. Bazalt lif kullanım oranının artışına bağlı olarak taşıyıcı geopolimer hafif betonların birim hacim ağırlıklarında belirgin bir değişim görülmemektedir. SPSS Statistics V22.0 programı kullanılarak gerçekleştirilen lineer regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif oranı ile birim hacim ağırlık arasında %95 güven aralığı için hesaplanan belirlilik katsayısı $r^2=0.04$ mertebesindedir. Elde edilen bu değer birim hacim ağırlık ile lif oranı arasındaki ilişkiden söz etmenin imkânsız olduğunu göstermektedir. Referans taşıyıcı geopolimer hafif betonun (GHB) birim hacim ağırlığı Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonunkine (PCHB) oranla yaklaşık %3 daha yüksektir. Bazalt lifi matris gözenekliliğinde hafif bir artışa neden olması dolayısıyla lif içermeyen geopolimer hafif betona kıyasla yoğunlukta hafif bir azalma meydana geldiği literatürde belirtilmektedir (Asil & Ranjbar, 2022).

Tablo 11. Taşıyıcı hafif betonlara ait birim hacim ağırlıklar

Karışım Kodu	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)
PÇHB	1775
GHB	1825
BGHB0.1	1795
BGHB0.2	1820
BGHB0.3	1803
BGHB0.4	1795
BGHB0.5	1815
BGHB0.6	1810



Şekil 30. Lif oranı ile taze halde birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

3.2. Sertleşmiş Beton Üzerinde Gerçekleştirilen Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

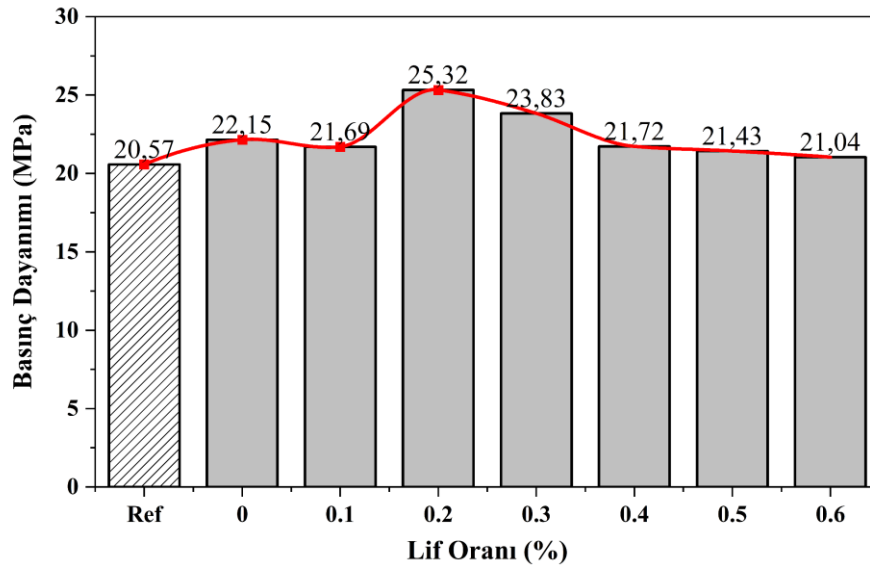
3.2.1. Basınç Dayanımı Ölçümleri

Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları Tablo 12’de ve ilişkin grafiksel gösterimler Şekil 31’de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere tüm betonlar taşıyıcı hafif beton için belirtilen minimum basınç dayanımı koşulunu (17 MPa) sağlamaktadır. %0.2 ve %0.3 bazalt lif içeren betonların basınç dayanımları diğerlerine kıyasla hafif yüksek olduğu görülmektedir. Ancak lif içeriğine bağlı olarak

basınç dayanımında belirgin bir değişimden söz etmek mümkün değildir. En yüksek basınç dayanımı %0.2 bazalt lif içeren taşıyıcı geopolimer hafif betonda 25.32 MPa olarak elde edilmiş olup bu değer referans geopolimer betona kıyasla yaklaşık %14 oranında yüksek olduğu görülmektedir. Şekilde “Ref” kodlu Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton (PÇHB) 20.57 MPa ile tüm betonlar arasında en düşük dayanıma sahiptir. Referans Portland çimentolu hafif betonun basınç dayanımı geopolimer hafif betona kıyasla yaklaşık %7 oranında daha düşüktür.

Tablo 12. Taşıyıcı hafif betonlara ait 28 günlük basınç dayanımları

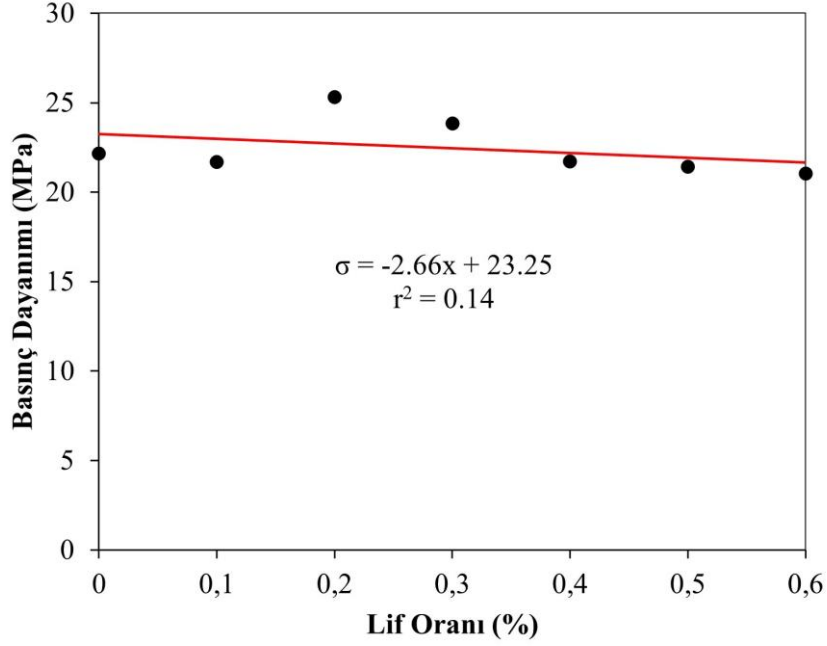
Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)
PÇHB	20.57
GHB	22.15
BGHB0.1	21.69
BGHB0.2	25.32
BGHB0.3	23.83
BGHB0.4	21.72
BGHB0.5	21.43
BGHB0.6	21.04



Şekil 31. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 günlük basınç dayanımları

Şekil 32’de bazalt lif oranına bağlı olarak taşıyıcı geopolimer hafif betonların basınç dayanımlarına ilişkin değişim verilmektedir. Gerçekleştirilen lineer regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif oranı ile basınç dayanımı arasında %95 güven

aralığı için hesaplanan belirlilik katsayısı $r^2=0.14$ mertebesinde. Elde edilen bu değer basınç dayanımı ile lif oranı arasındaki ilişkinin oldukça düşük korelasyonda olduğunu göstermektedir. Bu sonuç literatür (Benaicha vd., 2015) ile uyum sağlamaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere basınç dayanımı lif oranı arttıkça belli bir orana kadar artış ve ardından azalış eğilimi göstermektedir.



Şekil 32. Lif oranına bağlı olarak betonların basınç dayanımının değişimi

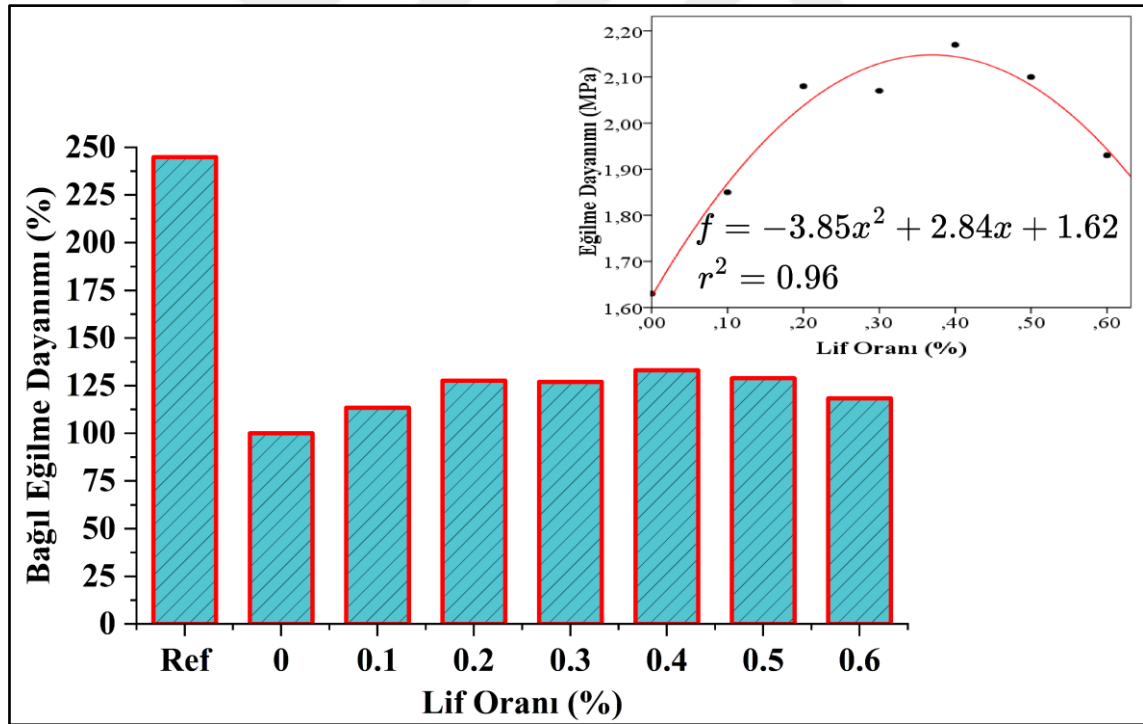
3.2.2. Eğilme Dayanımı Ölçümleri

Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda ölçülen eğilme dayanımları Tablo 13'te ve ilişkin grafiksel gösterim Şekil 33'te verilmektedir. Burada eğilme dayanımları referans betona (GHB) göre bağıl dayanımlar şeklinde hesaplanarak verilmektedir. PCHB için ölçülen eğilme dayanımı 3.99 MPa olup GHB için ölçülenin yaklaşık 2.5 katıdır. Tüm betonlar arasında en düşük eğilme dayanımı referans taşıyıcı geopolimer hafif beton için elde edilmiştir. Bu sonuç literatür (C. Liu vd., 2020; Ranjbar vd., 2015) tarafından desteklenmektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için bazalt lif kullanılmıştır. Lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonların eğilme dayanımları yaklaşık 2 MPa mertebesinde olup lifsiz betona kıyasla lif takviyeli betonların bağıl eğilme dayanımları %13.5 ila %33 arasında daha yüksek değerler verdiği görülmektedir.

Gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif oranı ile eğilme dayanımı arasında %95 güven aralığında $r^2=0.96$ belirlilik katsayılı ikinci dereceden bir ilişki olduğu görülmektedir. Bağımlı örneklem t-testi ile %0.1 lif takviye edilen taşıyıcı geopolimer hafif beton hariç diğer tüm taşıyıcı geopolimer hafif betonlar GHB'ye göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

Tablo 13. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 günlük eğilme dayanımları

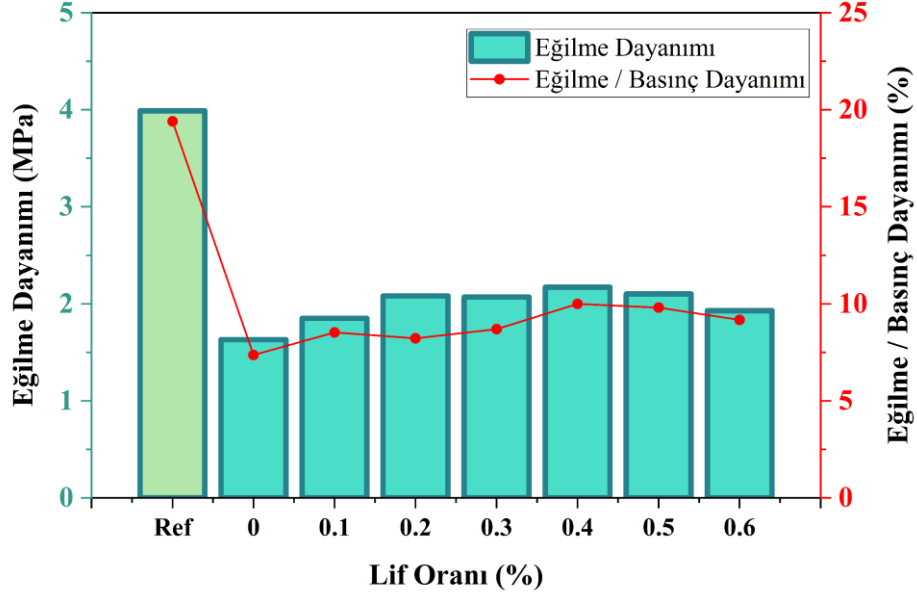
Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)
PÇHB	3.99
GHB	1.63
BGHB0.1	1.85
BGHB0.2	2.08
BGHB0.3	2.07
BGHB0.4	2.17
BGHB0.5	2.10
BGHB0.6	1.93



Şekil 33. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 günlük bağıl eğilme dayanımları

Şekil 34'te taşıyıcı hafif betonların eğilme/basınç dayanımı grafiği verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere taşıyıcı geopolimer hafif betonların eğilme dayanımının basınç dayanımına oranları %7.36 ila %10 arasında değişmektedir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı tüm betonlar arasında en düşük olmasına rağmen eğilme

dayanımı diğer betonlara kıyasla oldukça yüksek olup bu oran yaklaşık %19 olarak belirlenmiştir. Eğilme/basınç dayanımı oranı GHB’de en düşük olup yaklaşık %7 mertebesinde.



Şekil 34. Taşıyıcı hafif betonların eğilme/basınç dayanımı oranları

3.2.3. Elastisite Modülü Ölçümleri

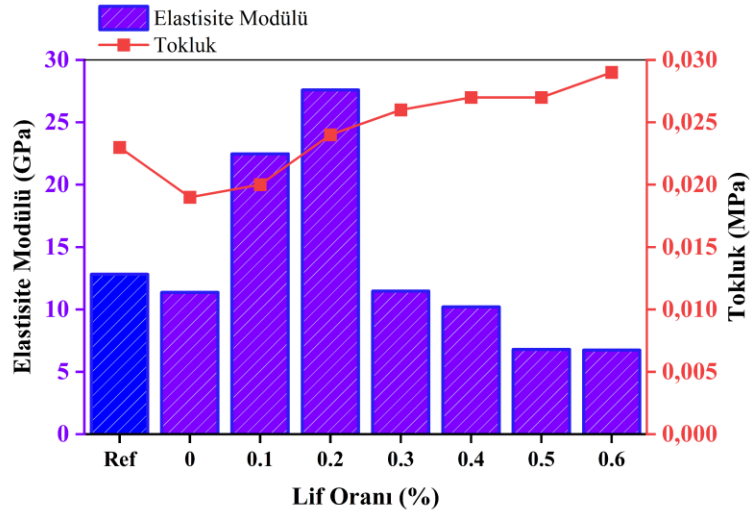
Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen elastisite modülü ve tokluk ölçümleri Tablo 14’te ve ilişkin grafiksel gösterim Şekil 35’te verilmektedir. Elastisite modülü ve tokluk hesabına ilişkin detaylı hesap Ek Şekil 1’de verilmektedir. Taşıyıcı hafif betonlar için deneysel olarak belirlenen elastisite modülü değerleri 6.74 ila 27.59 GPa arasında değişmektedir. %0.1 ve %0.2 lif oranına sahip taşıyıcı geopolimer hafif betonlar sırasıyla 22.48 ve 27.59 GPa ile tüm betonlar arasında en yüksek elastisite modülü değerlerini vermiştir. PÇHB GHB’ye oranla yaklaşık %13 oranında daha yüksek elastisite modülüne sahiptir. %0.3 lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonun elastisite modülü referans taşıyıcı geopolimer hafif betonunkine oldukça yakın bulunmuştur. Diğer betonlarda lif oranı arttıkça elastisite modülü değerleri azalmaktadır. %0.1 ve %0.2 lif takviyeli betonlar hariç diğer betonların elastisite modülü değerleri literatürde öngörülen elastisite modülü değerleriyle genel olarak uyumludur. Hem basınç dayanımı hem de elastisite modülü itibarıyla %0.2 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton en

yüksek değerleri vermiştir. %0.6 lif oranına sahip taşıyıcı geopolimer hafif beton 6.74 GPa ile en düşük elastisite modülüne sahiptir.

Tokluk eksenel yükleme halinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile elde edilir (Khosh & Atapour, 2024; Topçu, 1997). Tokluk değerleri kıyaslandığında tüm betonlar için hesaplanan tokluk değerleri birbirine yakın değerler olduğu görülür. Lif oranı artışına bağlı olarak taşıyıcı geopolimer hafif betonların tokluğu da artmaktadır. %0.6 lif içerikli betonun en düşük basınç dayanımına sahip olmasına karşın tokluk açısından değerlendirildiğinde diğer betonlara kıyasla en yüksek tokluk değerini verdiği görülmektedir. Liflerin matris içindeki dağılımı dolayısıyla mikro çatlakların açılmasını ve matris içerisinde yayılmasını geciktirerek betonun gevrek davranış göstermesini engellemektedir. Bu durum nispeten düşük dayanıma sahip betonların daha fazla miktarda enerji absorbe etmesine olanak sağlamaktadır (Benaicha vd., 2015).

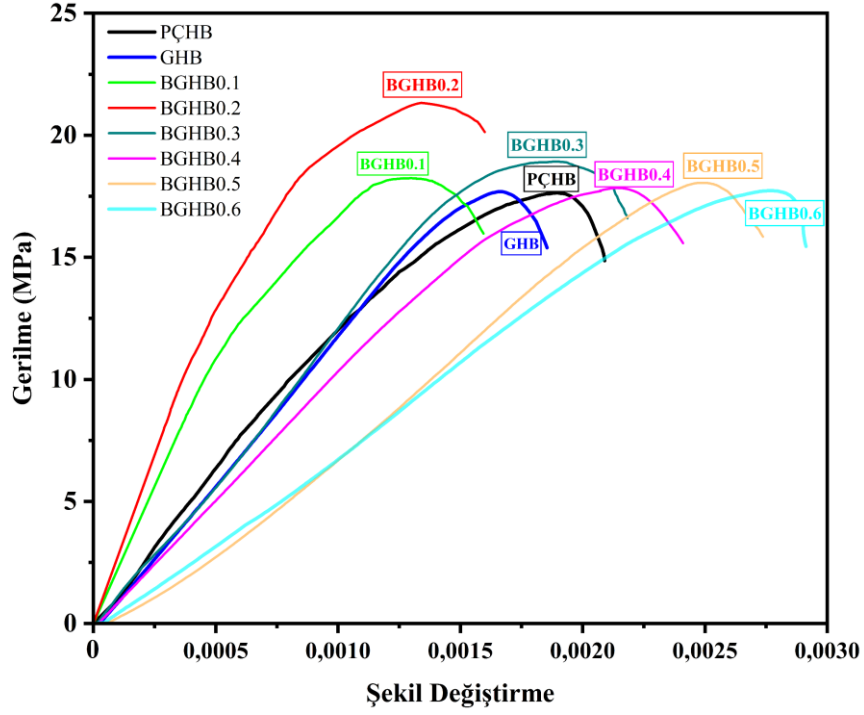
Tablo 14. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin elastisite modülü ve tokluk değerleri

Karışım Kodu	Elastisite Modülü (GPa)	Tokluk (MPa)
PÇHB	12.84	0.023
GHB	11.37	0.019
BGHB0.1	22.48	0.020
BGHB0.2	27.59	0.024
BGHB0.3	11.47	0.026
BGHB0.4	10.21	0.027
BGHB0.5	6.79	0.027
BGHB0.6	6.74	0.029



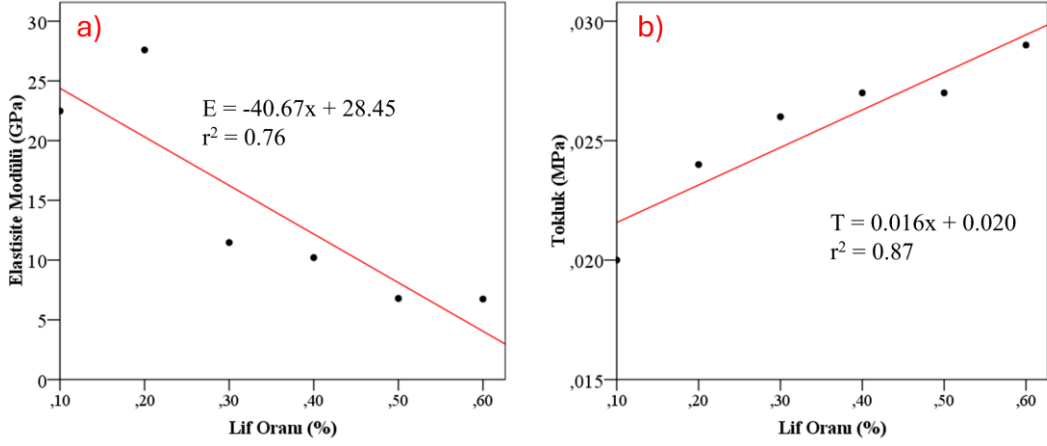
Şekil 35. Betonlara ait elastisite modülü ve tokluğun lif oranına bağlı olarak değişimi

Şekil 36’da taşıyıcı hafif betonlara ait tokluk değerleri verilmektedir. Şekilde %0.1 ve %0.2 lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonların diğer betonlara kıyasla daha gevrek bir davranış sergilediği görülebilir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonun lif içermeyen referans taşıyıcı hafif betona kıyasla daha sünek bir davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 36. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Şekil 37’de taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif oranına bağlı olarak elastisite modülü ve tokluk ilişkisi verilmektedir. Şekil 37-a’da görüldüğü üzere gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif oranı ile elastisite modülü arasında %95 güven aralığında yüksek düzeyde bir ilişki tespit edilmiştir ($r^2 = 0.76$). Şekil 37-b’de taşıyıcı geopolimer betonlar için belirlenen tokluk değerleri üzerinde gerçekleştirilen regresyon analizi görülmektedir. Buna göre %95 güven aralığında lif oranı artışı ile tokluk arasında $r^2=0.87$ belirlilik katsayılı belirgin bir artış söz konusudur.



Şekil 37. Betonlarda lif oranına göre a) elastisite modülü ve b) tokluk değerleri

3.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri

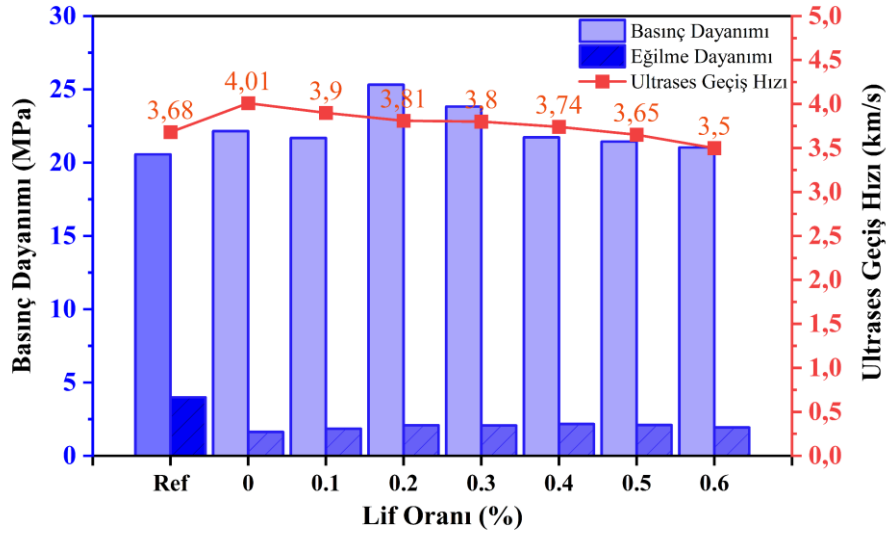
Çalışmada üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen ultrases geçiş hızı ölçümleri Tablo 15'te ve ultrases geçiş hızına göre beton kalitesi değerlendirmesi Tablo 16'da verilmektedir. Basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi Şekil 38'de verilmektedir. Taşıyıcı hafif betonların ultrases geçiş hızları 3.50 km/s ila 4.01 km/s arasında değişmektedir. Kullanılan bazalt lif oranı arttıkça taşıyıcı geopolimer hafif betonların ultrases geçiş hızları azalmaktadır. Bu sonuçlar literatürdeki benzer çalışmalarla uyumludur (Wongsa vd., 2016). Ultrases geçiş hızı GHB'de en yüksek değerdedir. Lif ilavesi arttıkça liflerin homojen dağılmaması nedeniyle daha boşluklu bir mikroyapı oluşması söz konusudur. Bu nedenle ultrases geçiş hızının azaldığına ilişkin literatürde mevcut çalışmalarda rapor edilmektedir (Kantarcı, 2022). GHB'nin ultrases geçiş hızı PÇHB'ye kıyasla yaklaşık %9 oranında daha yüksektir. Üretilen tüm betonlar Tablo 16'daki değerlendirmeye göre iyi kalitededir.

Tablo 15. Taşıyıcı hafif betonlar için ölçülen ultrases geçiş hızları

Karışım Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
PÇHB	3.68
GHB	4.01
BGHB0.1	3.90
BGHB0.2	3.81
BGHB0.3	3.80
BGHB0.4	3.74
BGHB0.5	3.65
BGHB0.6	3.50

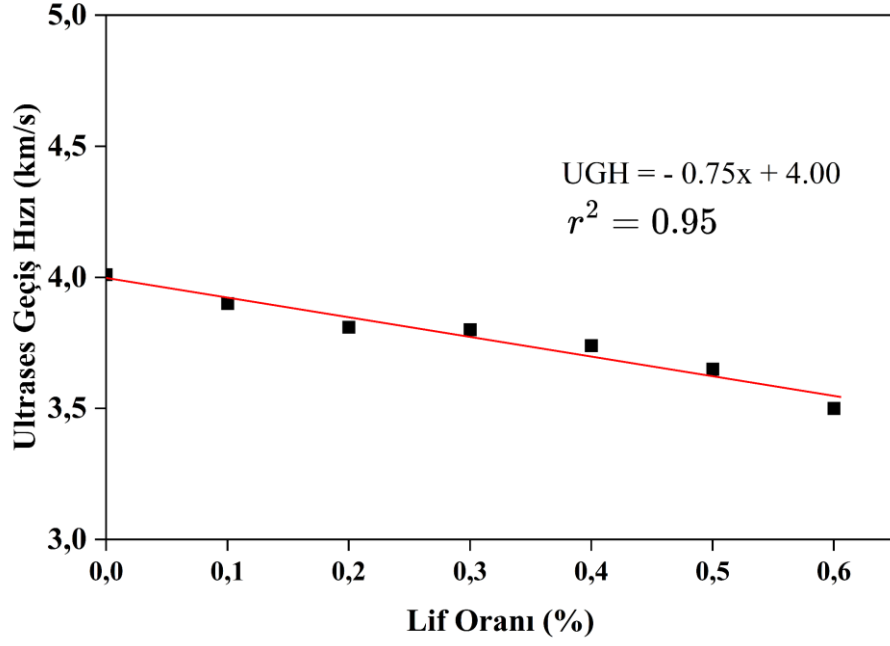
Tablo 16. Beton kalitesinin ultrases geçiş hızına göre değerlendirmesi (BS, 1986)

Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Beton Kalitesi
> 4.5	ok İyi
3.5 – 4.5	İyi
3.0 – 3.5	Orta
< 3.0	Kötü



Şekil 38. Betonlara ilişkin basınç dayanımı-eğilme dayanımı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

Şekil 39’da lif oranına göre ultrases geçiş hızı değişimini veren ilişki görölmektedir. Gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için %95 güven aralıklı değerlendirme yapılmış ve kullanılan lif oranı ile ultrases geçiş hızı arasında oldukça yüksek korelasyonlu bir ilişki ($r^2 = 0.95$) tespit edilmiştir. Bağımlı örneklem t-testi sonucu lif takviyeli tüm taşıyıcı geopolimer hafif betonlar referans taşıyıcı geopolimer hafif betona kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık sergilemektedir ($p < 0.05$).



Şekil 39. Geopolimer hafif betonlarda lif oranı-ultrases geçiş hızı ilişkisi

3.2.5. Termal (Isıl) İletkenlik Katsayısı Ölçümleri

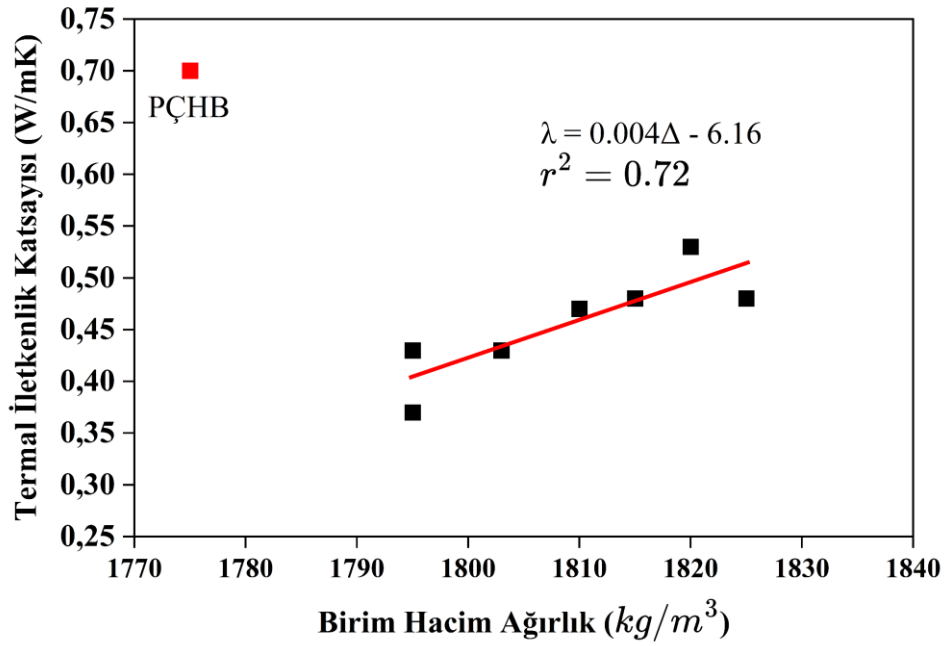
Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen termal iletkenlik katsayısı ölçümleri Tablo 17’de ve ilişkin grafiksel gösterim Şekil 40’ta verilmektedir. Geopolimer taşıyıcı hafif betonlar için belirlenen ısı iletkenlik katsayıları (λ) 0.37 W/mK ila 0.53 W/mK arasında değişmektedir. Bu değerler yalıtım hafif betonlar için standartta öngörülen 0.43 W/mK değerine yakındır (ASTM, 2023). PÇHB ve GHB kendi aralarında kıyaslandığında GHB’nin termal iletkenlik katsayısı PÇHB’ye göre yaklaşık %31 oranında düşüktür. Bu değer itibarıyla geopolimer hafif betonun çimentolu hafif betona kıyasla ısı yalıtımı açısından daha üstün olduğunu söylemek mümkündür. Tüm betonlar arasında en yüksek termal iletkenlik katsayısına sahip beton PÇHB olmuştur. En düşük termal iletkenlik katsayısına sahip beton ise %0.4 lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar literatürdeki geopolimer hafif betonlarla ilgili çalışmalarla uyumludur (M. Y. J. Liu vd., 2014; Wongs vd., 2016).

Taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için %95 güven aralıklı gerçekleştirilen regresyon analizi ile birim hacim ağırlık ile termal iletkenlik katsayısı arasında nispeten yüksek korelasyonlu bir ilişkinin varlığından ($r^2=0.72$) söz edilebilir. Birim hacim ağırlık arttıkça termal iletkenlik katsayısında hafif bir artış görülmektedir. Literatürde boşluklu betonun

termal iletkenliğinin daha düşük değerler aldığı rapor edilmektedir (Ng & Low, 2010; Saygili & Baykal, 2011).

Tablo 17. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin termal iletkenlik katsayıları

Karışım Kodu	Termal İletkenlik Katsayısı (W/mK)
PÇHB	0.70
GHB	0.48
BGHB0.1	0.43
BGHB0.2	0.53
BGHB0.3	0.43
BGHB0.4	0.37
BGHB0.5	0.48
BGHB0.6	0.47

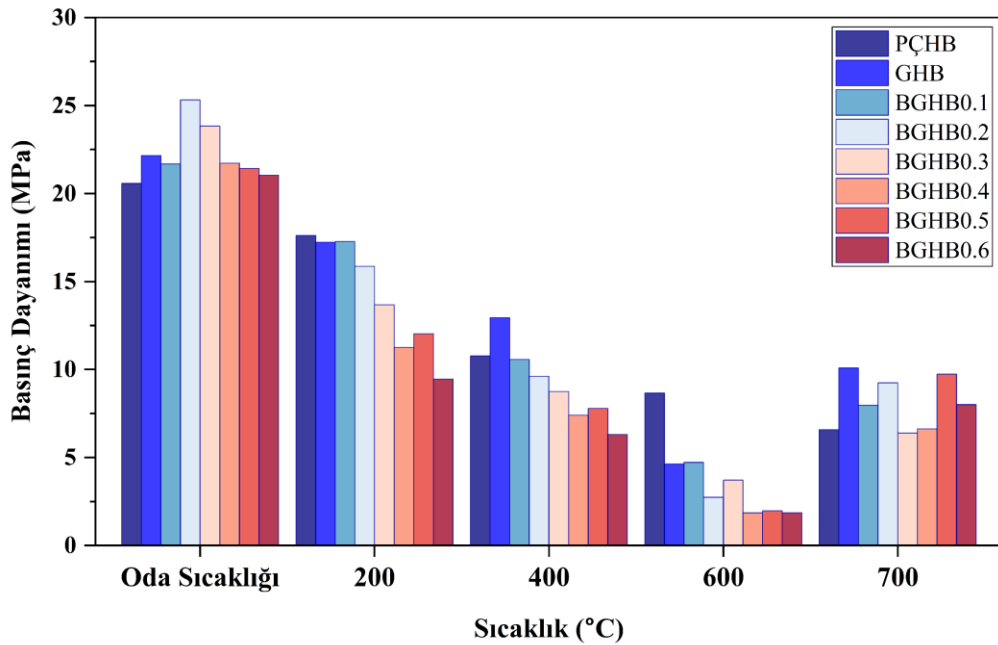


Şekil 40. Birim hacim ağırlık ile termal iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki

3.2.6. Yüksek Sıcaklık Direnci Ölçümleri

Yüksek sıcaklık uygulaması sonrası tüm betonlara ait 28 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları Şekil 41’de verilmektedir. Şekilde aynı zamanda oda sıcaklığındaki betonlara ait basınç dayanımları da verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi basınç dayanımı tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere lif oranı artışına bağlı olarak belirgin bir şekilde azalmaktadır. Basınç dayanımı aynı zamanda sıcaklık arttıkça benzer şekilde belirgin bir

eğilim göstermektedir. Şekil incelendiğinde göze çarpan diğer önemli bir husus 600°C'ye kadar belirgin bir azalış içinde olan basınç dayanımının bu sıcaklıktan sonra belirgin bir artış göstermesidir. Dayanımda meydana gelen artış tüm geopolimer betonlar için geçerli olmasına karşın diğer sıcaklıklarda lif artışına bağlı olarak görülen azalış eğiliminin 700°C'de meydana gelmediği görülmektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen çatlaklar basınç etkisi altında kapanacağından beton yük taşımaya devam eder. Geopolimer betonların basınç dayanımlarında gözlemlenen bu sonuç literatürde birkaç çalışma ile uyum göstermektedir (Joseph, 2015; Luhar vd., 2018). Basınç dayanımındaki bu değişim 600°C üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşen polimerizasyon reaksiyonu neticesinde meydana gelen ilave ürünlerle ilişkilendirilmektedir. Aynı çalışmalarda benzer durumun normal ağırlıklı geopolimer ve kauçuk katkılı geopolimer betonlarda da meydana geldiği rapor edilmektedir. Dayanımda görülen bu değişim ilgili çalışmalarda 600°C ila 800°C sıcaklık aralığında gözlemlenirken gerçekleştirdiğimiz çalışmada bu değişim 600°C ila 700°C aralığında gerçekleşmiştir. Basınç dayanımında meydana gelen bu değişimin hem normal ağırlıklı hem taşıyıcı hafif geopolimer betonlarda meydana gelmesi önem arz etmektedir. Bu sıcaklıkta geopolimer beton dayanımında meydana gelen bu değişim Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonda gerçekleşmemiştir.

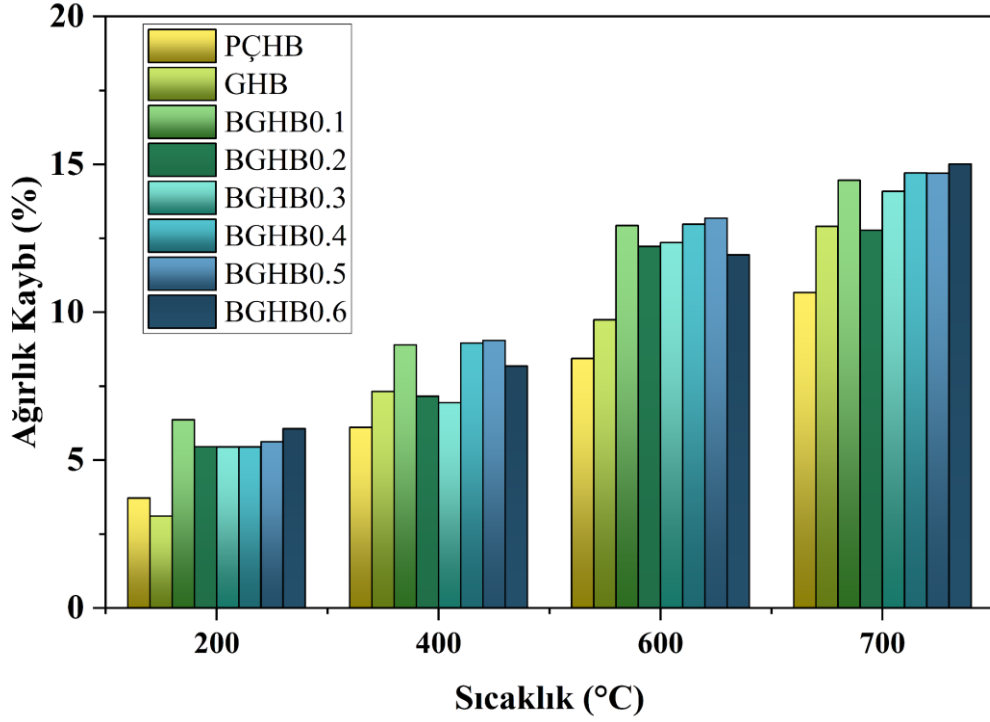


Şekil 41. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin sıcaklık-basınç dayanımı ilişkisi

Sıcaklık artışına bağlı olarak geopolimer betonların basınç dayanımında meydana gelen azalma geopolimerde mevcut Si-O-Al ve Si-O-Si yapılarının bağlanma kuvvetindeki azalma ve zincir yapıdaki bozulmanın bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Dayanımdaki azalma aynı zamanda dehidratasyon olayı neticesinde geopolimer bünyesinde meydana gelen aşırı su kaybına da bağlanmaktadır (Joseph, 2015; Manzoor vd., 2024).

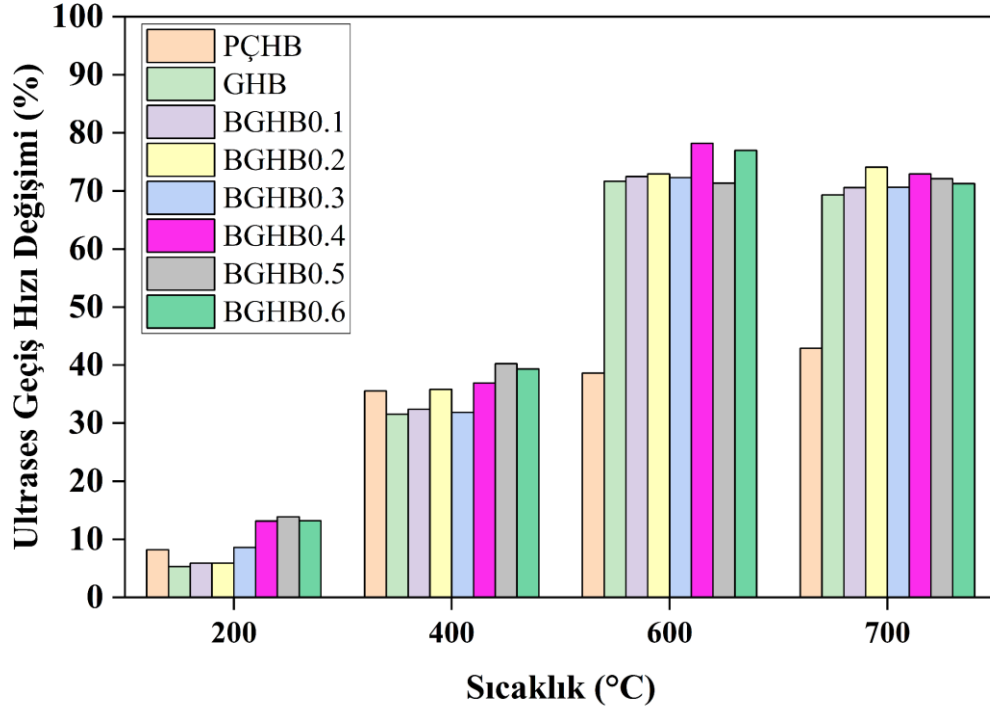
Şekil 41`de görüldüğü üzere 700°C`de geopolimer betonun Portland çimentolu hafif betona kıyasla dayanımının yüksek olması geopolimerlerde yüksek sıcaklıklarda kararlı C-A-S-H ve N-A-S-H yapıda polimerik zincir yapının oluşması ile açıklanmaktadır (Park vd., 2016). Aynı şekil incelendiğinde lifli geopolimer hafif betonların GHB`ye yakın ancak düşük dayanımlar verdiği görülmektedir. Bunun nedeninin inorganik liflerin mekaniksel avantajlarına rağmen yüksek sıcaklıkta bazı dezavantajlar göstermesi olarak belirtilmektedir (Puertas vd., 2006). Literatürde bazalt lifin 650°C`ye kadar başarılı bir şekilde çalıştığı ifade edilirken bu sıcaklıktan sonraki sıcaklıklarda kristalleştiği ve erimeye yüz tuttuğu rapor edilmektedir (Bhat vd., 2015; Welter vd., 2015).

Sıcaklık artışına bağlı olarak betonların ağırlık kaybı Şekil 42`de verilmektedir. Söz konusu şekilden görüldüğü üzere sıcaklık arttıkça tüm betonlarda ağırlık kaybı oldukça belirgin bir şekilde artmaktadır. Ancak tüm sıcaklıklar için geçerli olmak üzere ağırlık kaybı tüm lifli betonlarda ciddi bir değişim göstermemektedir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonda meydana gelen ağırlık kaybı tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere diğer betonlara kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni geopolimer betonda hedef kıvamı tutturmak amacıyla üretim esnasında kullanılan solüsyonun lif miktarı artışına paralel olarak artması ve haliyle sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan su kaybının fazla olmasıyla izah edilebilir (Topçu & Karakurt, 2008).



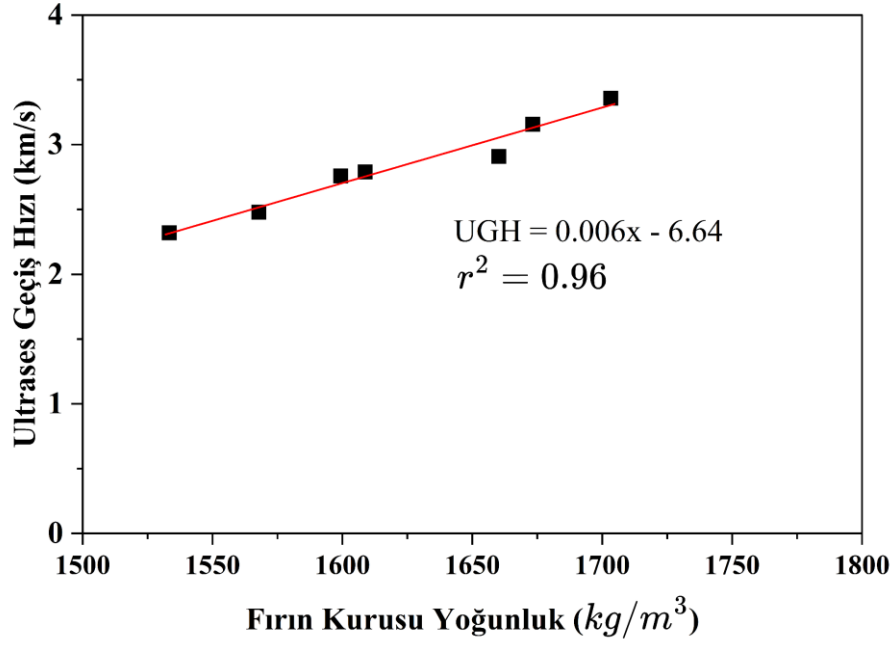
Şekil 42. Sıcaklık artışına bağlı olarak betonlarda meydana gelen ağırlık kaybı

Sıcaklığa bağlı olarak betonlar için ölçülen ultrases geçiş hızı değişimi Şekil 43'te verilmektedir. Ultrases geçiş hızı değişimi sıcaklık sonrası ölçülen ultrases değeri sıcaklık öncesi ölçülene oranla yüzde olarak belirlenmiştir. 600°C'ye kadar tüm betonlar için geçerli olmak kaydıyla ultrases geçiş hızı değişimi belirgin bir şekilde artmaktadır. Bunun nedeni yüksek sıcaklıkta betonların bünyesinde meydana gelen çatlakların varlığı ile ilişkilendirilebilir. Zira sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen çatlakların yapısı, miktarı ve boyutu ultrases geçiş hızı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Ultrases geçiş hızı değişimi açısından 700°C'de gözlemlenen değişim 600°C'de gözlemlenene kıyasla önemli bir fark göstermemektedir. Bu husus betonların içyapısında 600°C'de meydana gelen hasarın 700°C'de oluşana oldukça benzer olmasıyla izah edilebilir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı 400°C'den sonra önemli bir değişim göstermemektedir. Bu netice bu betonun içyapısında 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli bir değişimin meydana gelmemesi nedeniyle olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 43. Sıcaklığa bağlı olarak betonlara ilişkin ölçülen ultrases geçiş hızı değişimi

Yüksek sıcaklık uygulamadan önce taşıyıcı geopolimer hafif betonların fırın kurusu halde ölçülen yoğunlukları ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişki Şekil 44'te verilmektedir. Fırın kurusu yoğunluk arttıkça ultrases geçiş hızı belirgin bir artış göstermektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyumludur (M. Y. J. Liu vd., 2014; Neville, 1997). Bu iki değişken arasında gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için fırın kurusu yoğunluk ile ultrases geçiş hızı arasında %95 güven aralıklı $r^2=0.96$ belirlilik katsayılı bir istatistiksel ilişki olduğu belirlenmiştir.

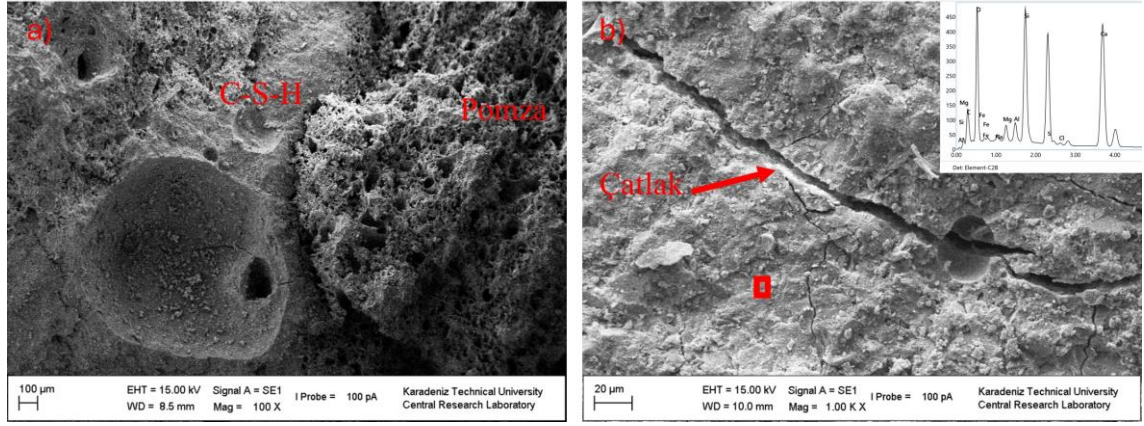


Şekil 44. Fırın kuru betonların yoğunluğu ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

3.3. Karakterizasyon Deneylerinin Değerlendirilmesi

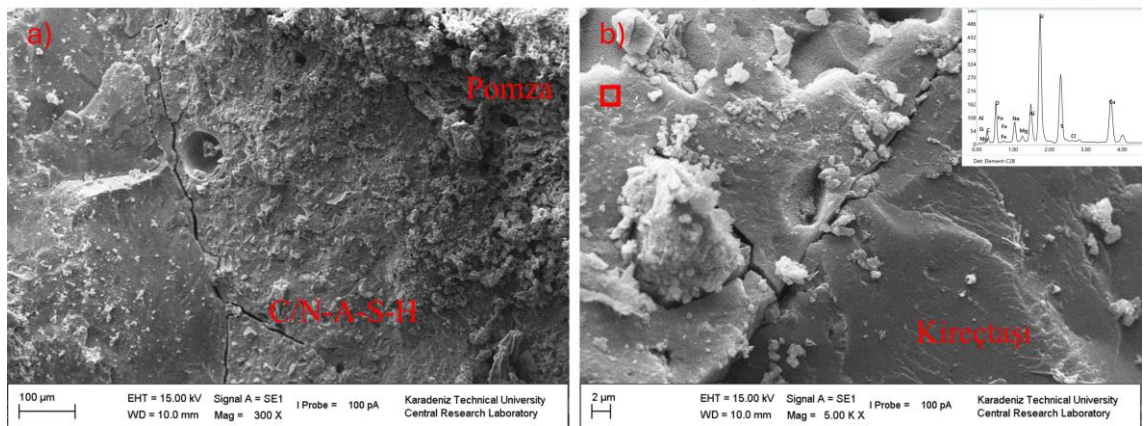
3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile İçyapı Analizi

Çalışmada üretilen Portland çimentolu taşıyıcı hafif betona ilişkin SEM analizi ile elde edilen içyapı görüntüsü Şekil 45'te verilmektedir. Şekil 45-a'da hamur fazı ve pomza arayüzey geçiş bölgesi net bir biçimde görünmektedir. Geçiş bölgesinde herhangi bir çatlak görünmemektedir. Şekil 45-b'de görüldüğü üzere çatlaklar hamur fazında meydana gelmiş olup yaklaşık 8 μm genişliğindedir. Şekil 45-b'de işaretli bölgede gerçekleştirilen EDS analizi ile bölgede oluşan C-S-H jeli yapısının %34.30 O, %26.43 Ca ve %9.88 Si içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 45. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonun içyapısından bir görüntü

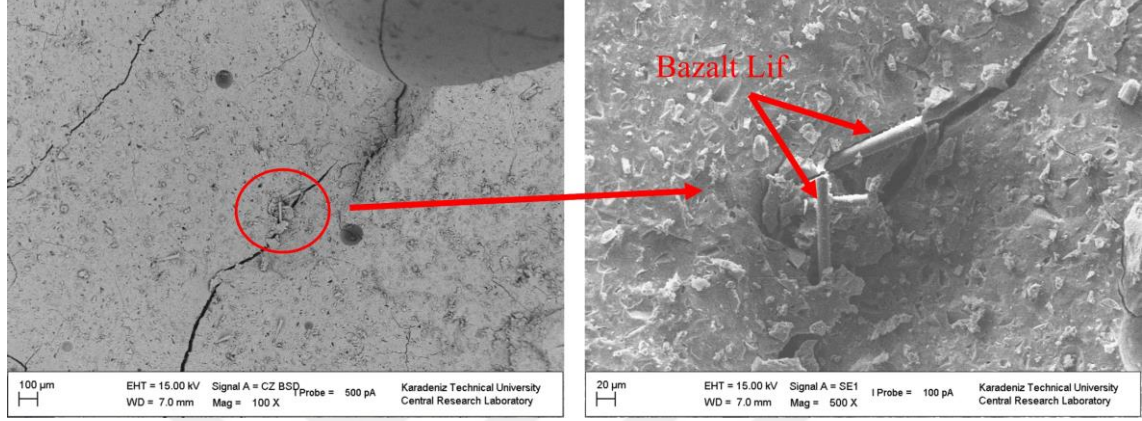
Şekil 46'da referans geopolimer hafif betona ilişkin içyapı görüntüsü verilmektedir. Şekil 46-a'da görüldüğü üzere geopolimer hafif betonda hamur fazı-pomza arayüzey geçiş bölgesi Portland çimentolu hafif betondaki arayüzey geçiş bölgesine kıyasla daha homojen ve kompakt bir yapıdadır. Şekil 46-b'de hamur fazı-kireçtaşı arayüzey geçiş bölgesinde meydana gelen çatlak benzeri ayrım dikkat çekmektedir. Burada hamur fazı-pomza uyumunun hamur fazı-kireçtaşına kıyasla daha iyi bir bütünsellik sağladığını söylemek mümkündür. Şekil 46-b'de işaretli bölgede gerçekleştirilen EDS analizi ile bölgede C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin birlikte bulunduğu ve yapının %19.51 O, %19.20 Ca, %19.11 Si, %5.44 Al ve %4.42 Na içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 46. Referans taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısından bir görüntü

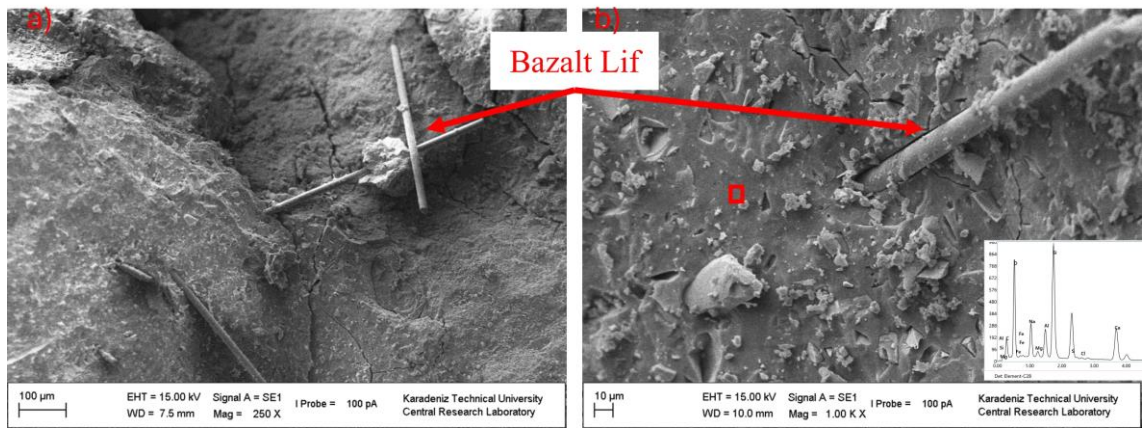
Şekil 47'de %0.1 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betona ait içyapı görüntüsü verilmektedir. Burada hamur fazında meydana gelen farklı genişliklerde

çatlaklar dikkat çekmektedir. Ayrıca aynı şekilde bazalt lifin bulunduğu işaretli bölgenin büyütülmüş görüntüsü verilmektedir. Görüntüde lifin köprülenme etkisi net olarak görünmemektedir. Bundan dolayıdır ki %0.1 bazalt lif takviyeli betonun davranışı referans betona kıyasla belirgin bir fark göstermemektedir (Şekil 36).



Şekil 47. %0.1 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısından bir görüntü

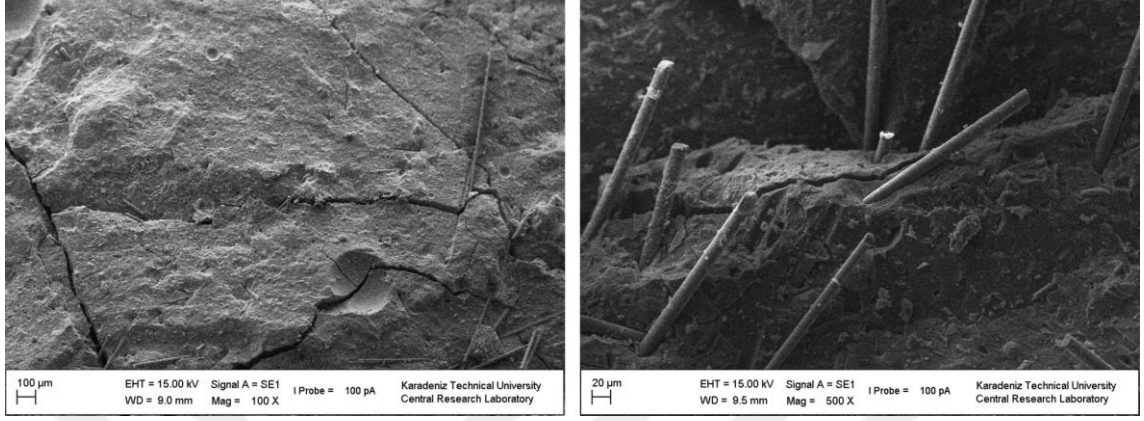
Şekil 48'de %0.2 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betona ait içyapı görüntüsü verilmektedir. Şekil 48-b'de işaretli bölgede gerçekleştirilen EDS analizi ile bölgede C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin birlikte meydana geldiği ve yapılarının %34.89 O, %15.49 Si, %12.46 Ca, %6.72 Na ve %3.81 Al içerikte olduğu belirlenmiştir. Görüntüden bazalt lifin hamur fazı ile kenetlenmesinin iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 48. %0.2 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü

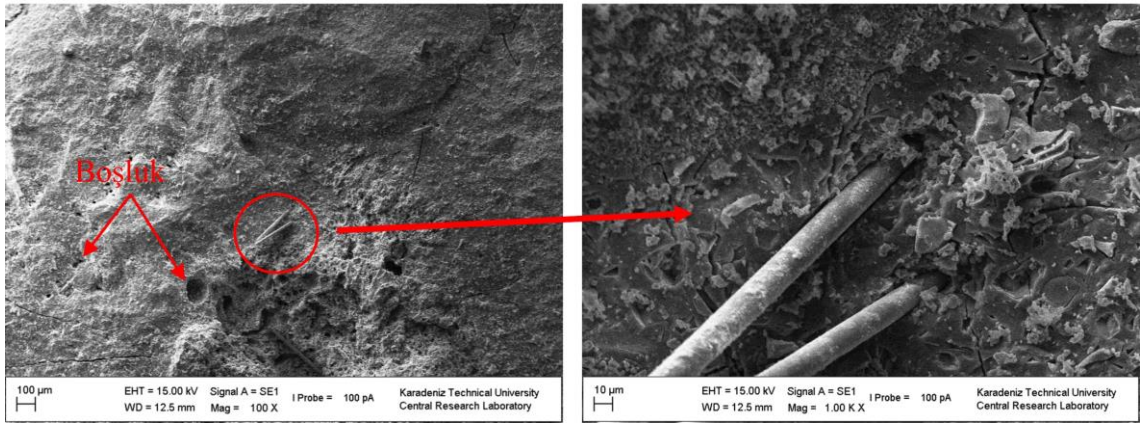
Şekil 49'da %0.3 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betona ait içyapı görüntüsü verilmektedir. Görüntüde hamur fazında farklı genişlikte çatlakların meydana

geldiği dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra liflerin kümелendiği göze çarpmaktadır. Bazalt liflerin hamur fazı ile kenetlenmesinin iyi olduğu görülmektedir.



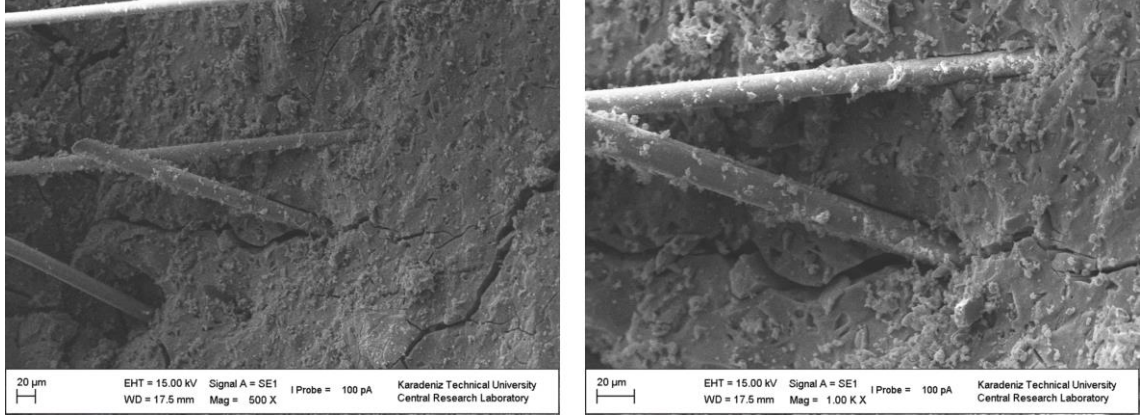
Şekil 49. %0.3 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısından bir görüntü

Şekil 50’de %0.4 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betona ait içyapı görüntüsü verilmektedir. Görüntüde hamur fazında farklı büyüklükte hava boşlukları dikkat çekmektedir. Görüntüde ayrıca lif-hamur fazı kenetlenmesini görmek mümkündür.



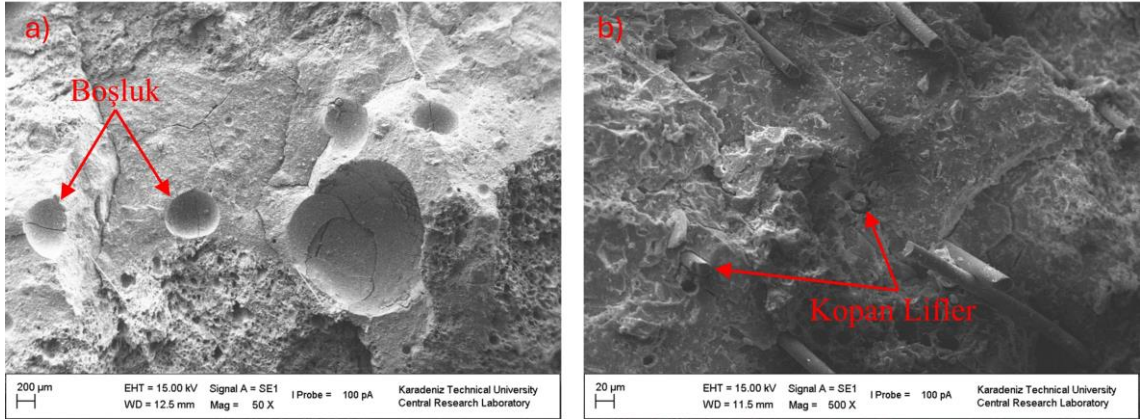
Şekil 50. %0.4 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü

Şekil 51’de %0.5 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntüsü verilmektedir. Görüntüden hamur fazında farklı genişlikte çatlakların varlığı dikkat çekmektedir. Burada da lif-hamur fazı kenetlenmesinin iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 51. %0.5 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü

Şekil 52’de %0.6 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntüsü verilmektedir. Şekil 52-a’da farklı genişlikte çatlaklar ve oldukça büyük hava boşlukları dikkat çekmektedir. Şekil 52-b’de ise matris içerisindeki liflerin kopmuş olduğu görülmektedir. Liflerin kopması bir anlamda hamur fazı ile lifler arasındaki kenetlenmenin iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 52. %0.6 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betonun içyapısına ait bir görüntü

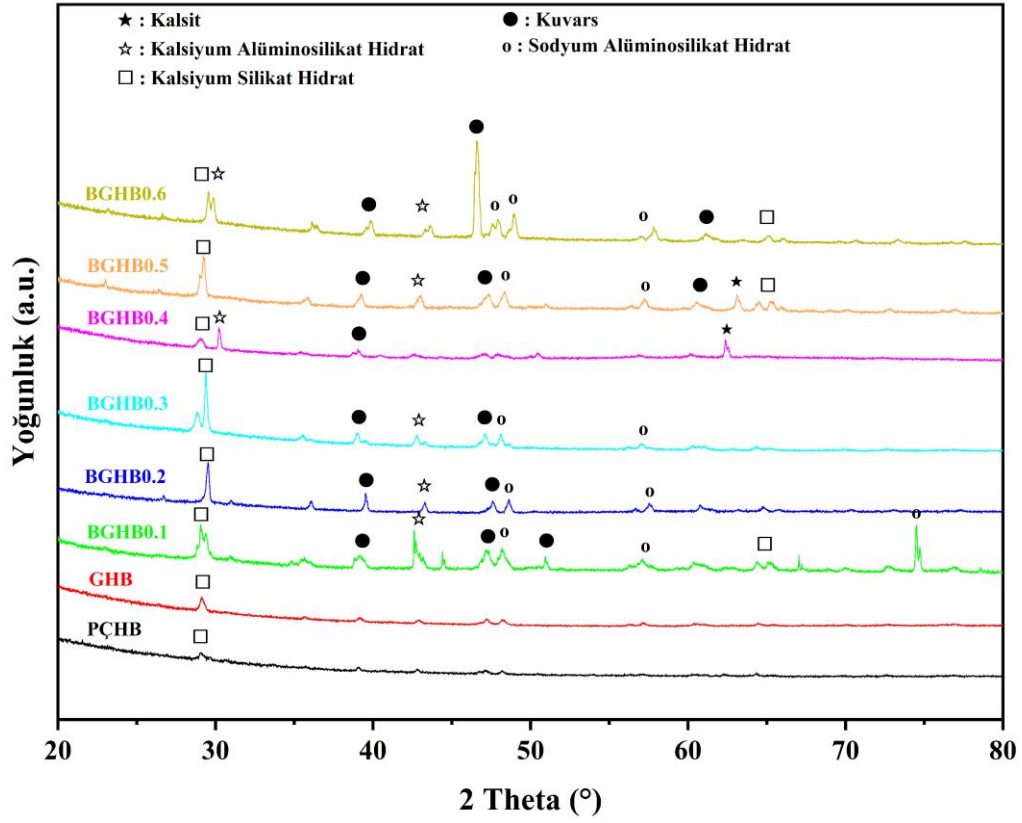
%0.3 ve daha yüksek lif oranlarında hamur fazı-lif kenetlenmesinin iyileşmesi neticesinde betonların şekil değiştirmesi daha düşük lif oranlı betonlara kıyasla oldukça fazla olmaktadır (Şekil 36). Bunun yanı sıra lif oranı artışına bağlı olarak hamur bünyesinde boyut itibarıyla büyüyen hava boşluklarının varlığı söz konusudur. Bu durum özellikle %0.6 oranında lif içeren betonda oldukça belirgindir. Görüntülerden çıkarılabilecek bir başka sonuç hamur fazı-pomza uyumunun hamur fazı-kireçtaşı

uyumuna kıyasla daha iyi olduğudur. Bunu hamur fazı-kireçtaşı arayüzey bölgesinde meydana gelen çatlak oluşumu ile izah etmek mümkündür.

3.3.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen XRD analizleri birleştirilmiş olarak Şekil 53'te verilmektedir. Analizlerde 2θ açısı 20° - 80° arasında referans Portland çimentolu (PÇHB) ve geopolimer taşıyıcı hafif betonların (GHB) diğer betonlara kıyasla kristal pik sayısının daha az olduğu ve amorf faz içeriğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonlarda kristal pik sayısı artmaktadır. XRD grafiğindeki yoğunluk tepe noktaları kristal malzemeleri, tepe noktası olmayanlar ise amorf malzemeleri temsil etmektedir (Joseph, 2015). Tüm betonlarda 2θ açısı 25° - 35° arasında C-S-H fazı belirlenmiştir (Qiu vd., 2019; Sithole & Mashifana, 2020). Genel olarak referans taşıyıcı geopolimer hafif betona (GHB) kıyasla lif takviyesi C-S-H piki yoğunluğunu arttırdığı görülmektedir. 2θ açısı 35° - 55° arasında geopolimer betonların genelinde C-A-S-H, N-A-S-H ve kuvars fazları belirlenmiştir (Kamath vd., 2021; Mehta & Siddique, 2017; Saludung vd., 2018). 2θ açısı 55° - 75° arasında betonlarda C-S-H, N-A-S-H, kalsit ve kuvars fazları tespit edilmiştir (Kamath vd., 2021).

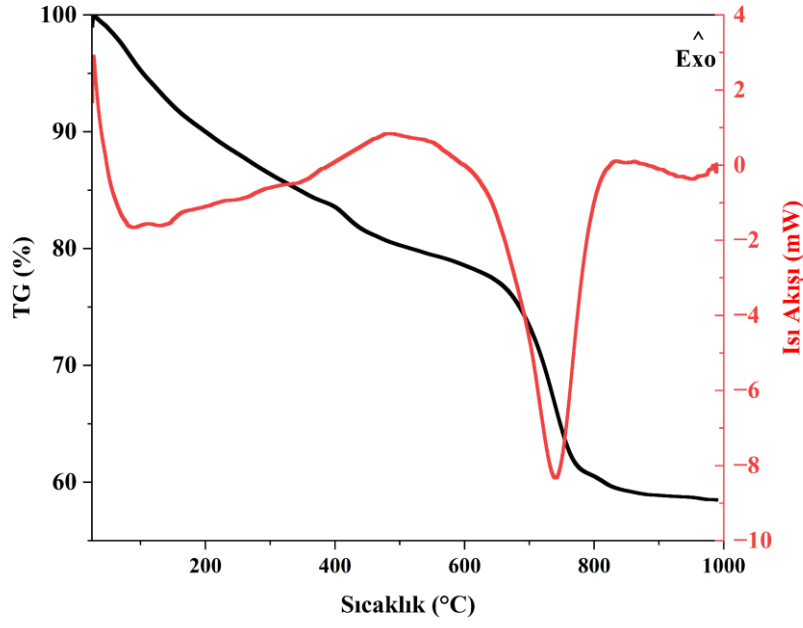
XRD analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlarda geopolimerizasyon sonucu tespit edilen C-A-S-H ve yarı kristal yapıdaki N-A-S-H fazları gerçekleştirilen EDS analizi sonuçlarıyla desteklenmektedir. Bu sonuçlar literatürle uyumludur (F. Farooq vd., 2021; Hussin vd., 2015; Luhar vd., 2018). Bu analiz neticesinde lif miktarının artışına bağlı olarak oluşan reaksiyon ürünleri açısından önemli bir fark yoktur. Bu sonuç geopolimer beton karışımlarının aynı olması nedeniyle beklenen bir durumdur.



Şekil 53. Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin birleştirilmiş XRD analizleri

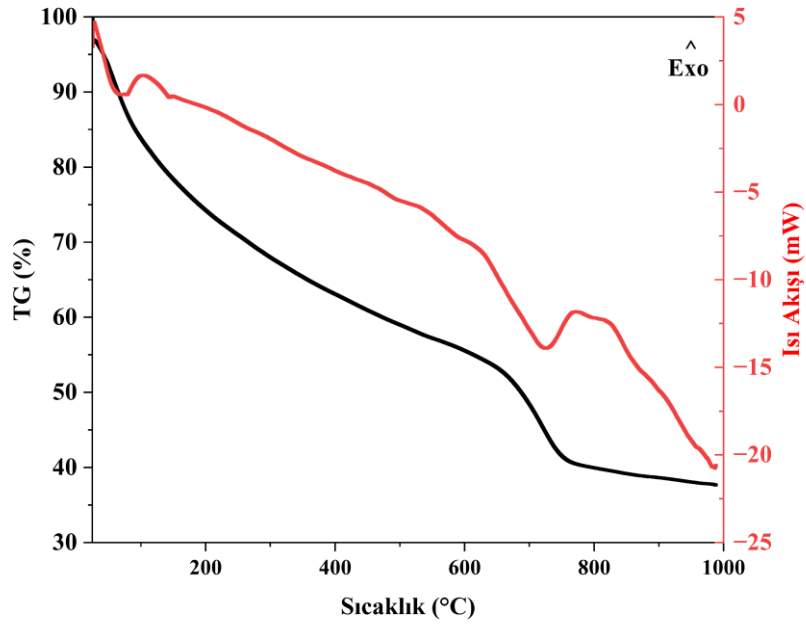
3.3.3. Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi

Portland çimentolu taşıyıcı hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 54'te verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C'de beton ağırlığının yaklaşık %58'i kalmıştır. TG eğrisinden görüldüğü üzere yaklaşık 100°C'de beton bünyesindeki nemin uzaklaşması sonucu ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Ağırlık kaybı yaklaşık 650°C'ye kadar sürekli bir azalış sergilemektedir. Ardından 650°C ila 800°C arasında kalsiyum karbonatın ayrışması nedeniyle endotermik tepkimeye bağlı olarak ağırlıkta ani bir azalış meydana gelmektedir. Ağırlık kaybı 800°C'den itibaren 1000°C'ye kadar sabit kalmıştır. Portland çimentolu betonlarda analiz esnasında bu kimyasal ve fiziksel değişim nedeniyle meydana gelen ağırlık kayıpları literatürle uyumludur (Alarcon-Ruiz vd., 2005).



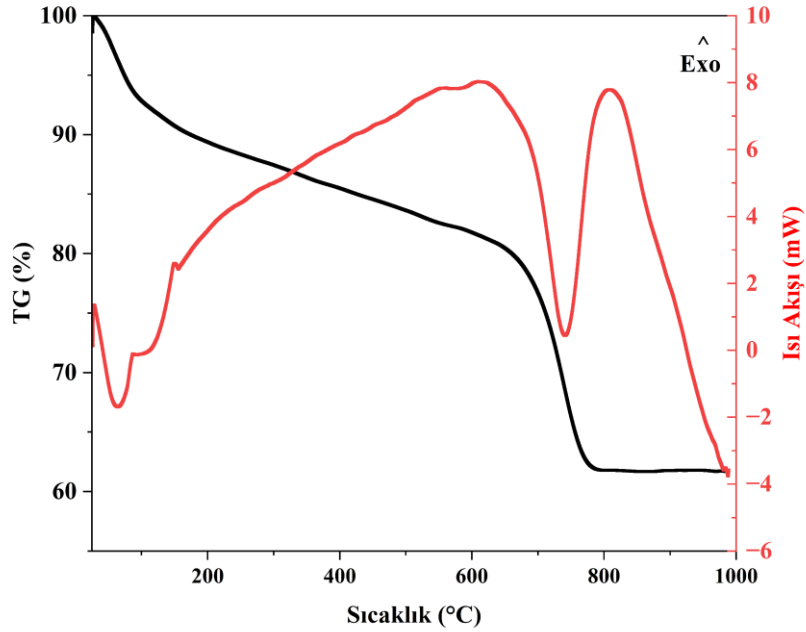
Şekil 54. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

Referans taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 55'te verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C'de beton ağırlığının yaklaşık %38'i kalmıştır. Sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelen ağırlık kaybı 650°C'ye kadar sürekli olarak devam etmektedir. Literatürde 200°C'nin üzerinde meydana gelen ağırlık kaybının nedeni geopolimer matriste absorbe edilen suyun buharlaşmasına ve kimyasal yapının değişmesine bağlanmaktadır (Joseph, 2015; Kong vd., 2007; Kong & Sanjayan, 2008; Xin & Huang, 2013). TG eğrisinden görüldüğü üzere PÇHB'de olduğu gibi 650°C ile 800°C arasında dikkat çekici bir ağırlık kaybı meydana gelmektedir. Bu sıcaklıklardaki ağırlık kaybının nedeni beton numunelerin analizden önceki hazırlık aşamasında meydana gelen karbonatlaşmanın kimyasal değişime uğraması sonucu olduğu belirtilmektedir (Bernal vd., 2010). Bunu aynı zamanda DSC eğrisindeki endotermik pikten görmek mümkündür. Ağırlık kaybı 800°C'den itibaren 1000°C'ye kadar hemen hemen sabit kalmıştır.



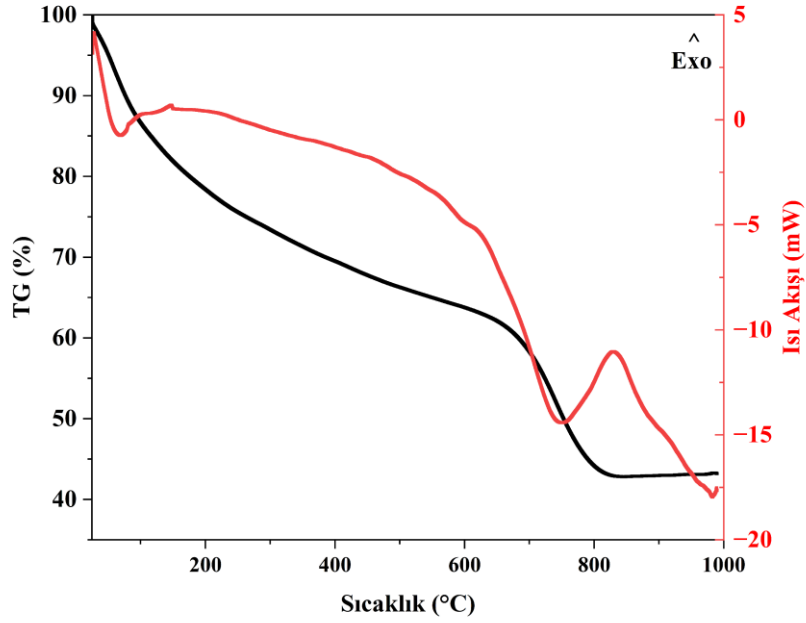
Şekil 55. Referans taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

%0.1 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC görseli Şekil 56’da verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C sonunda beton ağırlığının yaklaşık %62’si kalmıştır. TG eğrisinden görüldüğü üzere %0.1 bazalt lif içeren geopolimer beton 650°C ila 800°C arasında referans betona benzer davranış göstermektedir.



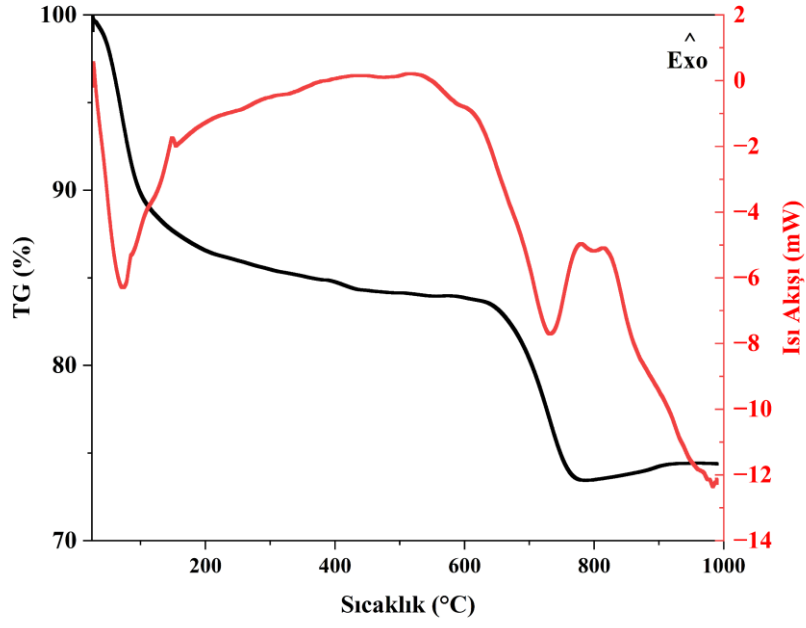
Şekil 56. %0.1 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

%0.2 bazalt lif takviye edilen taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 57’de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C sonunda beton ağırlığının yaklaşık %45’i kalmıştır. TG eğrisinden %0.2 bazalt lif içeren geopolimer betonun 650°C ila 800°C arasında referans betona benzer davranış sergilediği görülmektedir.



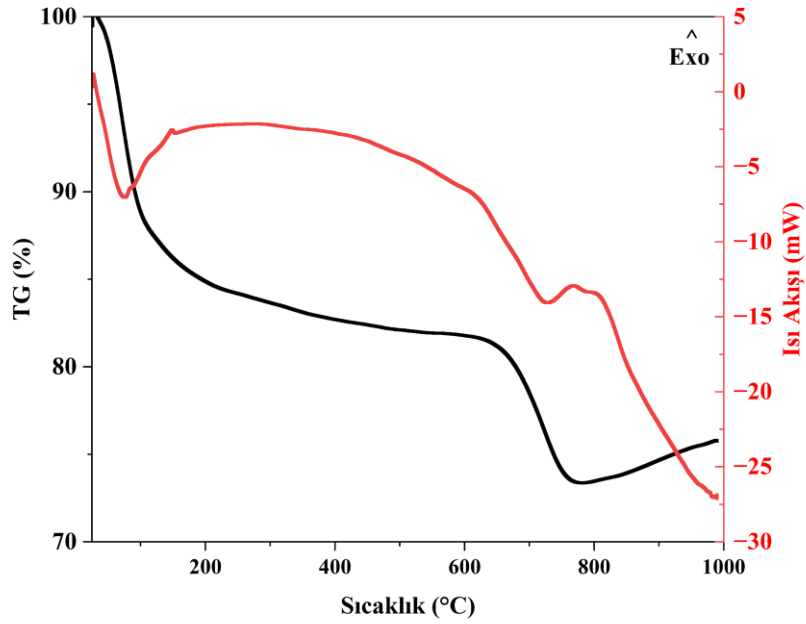
Şekil 57. %0.2 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

%0.3 bazalt lif takviye edilen taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 58’de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C sonunda beton ağırlığının yaklaşık %75’i kalmıştır. TG eğrisinden görüldüğü üzere %0.3 bazalt lif içeren geopolimer beton 650°C ila 800°C arasında referans betona benzer davranış göstermektedir.



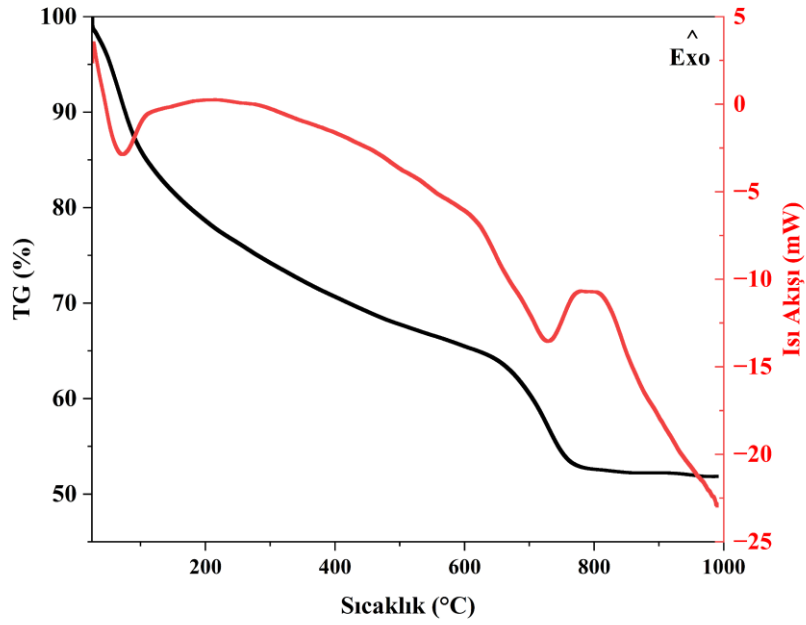
Şekil 58. %0.3 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

%0.4 bazalt lif takviye edilen taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 59’da verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C sonunda beton ağırlığının yaklaşık %76’sı kalmıştır. TG eğrisinden görüldüğü üzere %0.4 bazalt lif içeren geopolimer beton 650°C ila 800°C arasında referans betona benzer davranış göstermektedir.



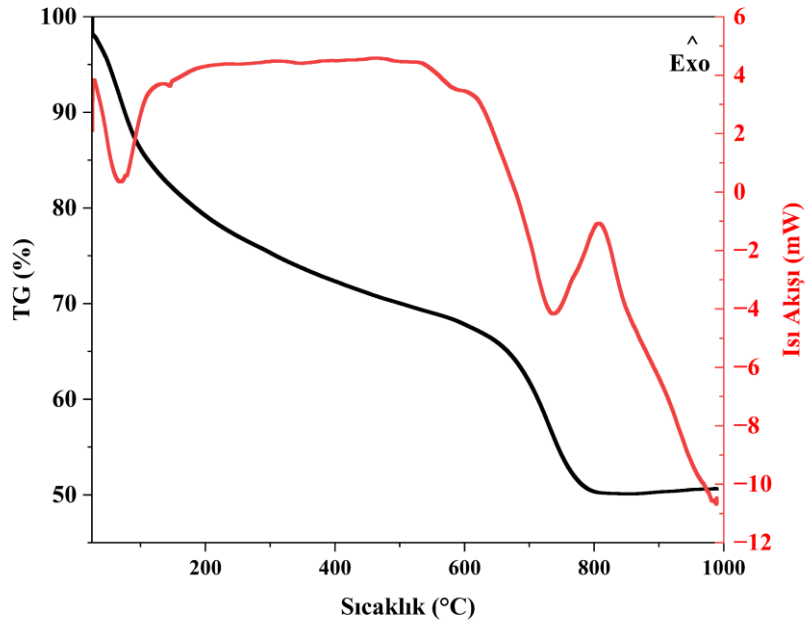
Şekil 59. %0.4 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

%0.5 bazalt lif takviye edilen taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 60'ta verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C sonunda beton ağırlığının yaklaşık %53'ü kalmıştır. TG eğrisinden görüldüğü üzere %0.5 bazalt lif içeren geopolimer beton 650°C ila 800°C arasında referans betona benzer davranış sergilemiştir.



Şekil 60. %0.5 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

%0.6 bazalt lif takviye edilen taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin 28 gün sonunda elde edilen TG-DSC analizi Şekil 61'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere 1000°C sonunda beton ağırlığının yaklaşık %51'i kalmıştır. TG eğrisinden görüldüğü üzere %0.6 bazalt lif içeren geopolimer beton 650°C ila 800°C arasında referans betona benzer davranış göstermektedir.



Şekil 61. %0.6 bazalt lifli taşıyıcı geopolimer hafif betona ilişkin TG-DSC analizi

Şekil 56 ile Şekil 61'de bazalt lif ilaveli geopolimer betonlara ait TG eğrilerinden görüldüğü üzere 650°C ila 800°C arasında ağırlık kaybı belirginleşmektedir. Bu durum analiz öncesi meydana gelen karbonatlaşmanın bu sıcaklık aralığında ayrışması nedeniyle meydana gelebileceği literatürde belirtilmektedir (Bernal vd., 2010). Lifli geopolimer hafif betonlarda 1000°C'de meydana gelen ağırlık kaybı referans betona kıyasla daha az olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada %0.1 ila %0.6 arasında bazalt lifi takviyesinin yüksek fırın cürufu ve metakaolin tabanlı taşıyıcı geopolimer hafif betonun mekanik, ısı özellikleri ve yüksek sıcaklık davranışının yanı sıra mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla çeşitli mekanik deneyler ve yüksek sıcaklık direnci deneyi ile karakterizasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde özetle aşağıdaki çıktılar elde edilmiştir:

- Taşıyıcı hafif betonlar üzerinde ölçülen birim hacim ağırlıklar 1775 kg/m^3 ila 1825 kg/m^3 arasında değişmektedir. Geopolimer betonlar için geçerli olmak kaydıyla istatistiksel olarak gerçekleştirilen analiz ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlarda kullanılan lif miktarı ile birim hacim ağırlıkları arasında düşük korelasyonlu bir ilişki belirlenmiştir.
- Taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları 20.57 MPa ila 25.32 MPa arasında değişmektedir. Bu itibarla tüm betonlar taşıyıcı hafif beton için belirtilen minimum basınç dayanımı koşulunu (17 MPa) sağlamaktadır.
- Lif miktarına bağlı olarak betonların basınç dayanımında belirgin bir değişimden söz etmek mümkün değildir. Gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için basınç dayanımı ile lif oranı arasında düşük korelasyonlu bir ilişki belirlenmiştir.
- Geopolimer hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda ölçülen eğilme dayanımları 1.63 MPa ila 2.17 MPa arasında değişmektedir. Lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif betonların eğilme dayanımları yaklaşık 2 MPa düzeyinde olup referans betona (GHB) kıyasla lif takviyeli betonların bağıl eğilme dayanımları %13.5 ila %33 arasında daha yüksek değerler vermektedir.
- Portland çimentolu hafif beton için ölçülen eğilme dayanımı 3.99 MPa olup referans taşıyıcı geopolimer hafif beton için ölçülenin yaklaşık 2.5 katıdır. Gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif miktarı ile eğilme dayanımı arasında yüksek korelasyonlu ikinci dereceden bir ilişki belirlenmiştir.
- Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen elastisite modülü ölçümleri 6.74 ila 27.59 GPa arasında değişmektedir. Gerçekleştirilen

regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif miktarı ile elastisite modülü arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki belirlenmiştir.

- Tüm betonlar için hesaplanan tokluk değerleri birbirine oldukça yakındır. Lif oranı artışına bağlı olarak taşıyıcı geopolimer hafif betonların tokluğu da artmaktadır. Buna binaen gerçekleştirilen regresyon analizi ile lif miktarı-tokluk arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki belirlenmiştir.
- Gerek basınç dayanımı gerekse elastisite modülü açısından %0.2 bazalt lif takviyeli taşıyıcı geopolimer hafif beton en yüksek değerleri vermiştir. Diğer betonlara kıyasla daha gevrek bir davranış göstermesine rağmen, tokluk açısından diğer betonlara yakın sonuç vermiştir.
- Üretilen taşıyıcı hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen ultrases geçiş hızları 3.50 km/s ile 4.01 km/s arasında değişmektedir. Kullanılan bazalt lif oranı arttıkça taşıyıcı geopolimer hafif betonların ultrases geçiş hızları azalmaktadır. Gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için lif miktarı ile ultrases geçiş hızı arasında oldukça yüksek korelasyonlu bir ilişki elde edilmiştir.
- Üretilen taşıyıcı geopolimer hafif betonlara ilişkin 28 gün sonunda elde edilen termal iletkenlik katsayıları (λ) 0.37 W/mK ile 0.53 W/mK arasında değişmektedir. PÇHB için ölçülen termal iletkenlik katsayısı 0.70 W/mK'dir. Buna göre GHB PÇHB'ye kıyasla yaklaşık %31 oranında düşük termal iletkenlik katsayısına sahiptir.
- Gerçekleştirilen regresyon analizi ile taşıyıcı geopolimer hafif betonlar için birim hacim ağırlık ile termal iletkenlik katsayıları arasında nispeten yüksek korelasyonlu bir ilişki belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık arttıkça termal iletkenlik katsayısında hafif bir artış görülmektedir.
- Yüksek sıcaklık uygulaması sonrası tüm betonlara ait 28 gün sonunda ölçülen basınç dayanımları tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere lif oranı artışına bağlı olarak belirgin bir şekilde azalmaktadır. Basınç dayanımı aynı zamanda sıcaklık arttıkça benzer şekilde azalma eğilimi göstermektedir.
- Taşıyıcı geopolimer hafif betonların 600°C'ye kadar belirgin bir azalış içinde olan basınç dayanımı bu sıcaklıktan itibaren belirgin bir artış göstermektedir. Basınç dayanımındaki bu değişim 600°C üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşen

polimerizasyon reaksiyonu neticesinde meydana gelen ilave ürünlerle ilişkilendirilmektedir.

- Sıcaklık arttıkça tüm betonlarda ağırlık kaybı oldukça belirginleşmektedir. Ancak tüm sıcaklıklar için geçerli olmak kaydıyla ağırlık kaybı tüm lifli betonlarda önemli bir değişim göstermemektedir. Portland çimentolu taşıyıcı hafif betonda meydana gelen ağırlık kaybı tüm sıcaklıklarda geçerli olmak üzere diğer betonlara kıyasla daha düşüktür.
- Tüm betonlar için 600°C'ye kadar ultrases geçiş hızı değişimi belirgin bir şekilde artış göstermektedir. Ultrases geçiş hızında 700°C'de gözlemlenen değişim 600°C'dekine oldukça yakındır. Portland çimentolu taşıyıcı hafif beton üzerinde ölçülen ultrases geçiş hızı 400°C'den sonra önemli bir değişim göstermemektedir.
- Gerçekleştirilen regresyon analizi ile yüksek sıcaklık uygulamadan önce taşıyıcı geopolimer hafif betonların fırın kurusu halde ölçülen yoğunlukları ile ultrases geçiş hızları arasında oldukça yüksek korelasyonlu ilişki vardır. Fırın kurusu yoğunluk arttıkça ultrases geçiş hızı belirgin bir biçimde artmaktadır.
- Yüksek sıcaklık direnci açısından değerlendirildiğinde lif takviyeli geopolimer taşıyıcı hafif betonların referans taşıyıcı geopolimer hafif betona benzer davranış sergilediği tespit edilmiştir. Literatürde rapor edilen bazalt lifi takviyeli betonların sergilediği davranışın aksine bu çalışmada gerçekleştirilen yüksek sıcaklık direnci deneyi sonucunda bazalt lif etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.
- SEM analizinden görüldüğü üzere %0.3 ve daha yüksek lif oranlarında hamur fazı-lif kenetlenmesinin iyileşmesi neticesinde betonların şekil değiştirmesi daha düşük lif oranlı betonlara kıyasla oldukça fazla olmaktadır (Şekil 36). Bunun yanı sıra lif oranı artışına bağlı olarak hamur bünyesinde boyut itibarıyla büyük hava boşluklarının varlığı söz konusudur. Bu durum özellikle %0.6 oranında lif içeren betonda oldukça belirgindir.
- SEM görüntülerinden çıkarılabilecek bir başka sonuç hamur fazı-pomza uyumunun hamur fazı-kireçtaşı uyumuna kıyasla daha iyi olduğudur. Bunu hamur fazı-kireçtaşı arayüzey bölgesinde meydana gelen çatlak oluşumu ile izah etmek mümkündür.
- Portland çimentolu taşıyıcı geopolimer hafif beton (PÇHB) ve lif içermeyen taşıyıcı geopolimer hafif betonun (GHB) kristal pik yoğunluklarının lif içeren betonlara kıyasla daha az olduğu XRD analizi ile belirlenmiştir. Bu analiz

neticesinde lif miktarının artışına bağlı olarak oluşan reaksiyon ürünleri açısından önemli bir farkın oluşmadığı görölmektedir. Bu sonuç geopolimer beton karışım reçetelerinin oldukça benzer olması nedeniyle beklenen bir durumdur.

- TG-DSC analizi neticesinde tüm betonlar için geçerli olmak üzere sıcaklık artışına bağlı olarak ağırlık kaybı olduğu görölmektedir. Ağırlıkta gözlemlenen bu kayıp geopolimer betonlarda yaklaşık olarak 700°C`de oldukça belirgindir.
- Bu alışma kapsamında elde edilen sonuçlar çalışmada kullanılan malzemeler ve deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği koşullar içerisinde geçerlidir.



5. ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen bulgular ışığında bu kapsamda gerçekleştirilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler verilebilir:

- Çalışmada elde edilen sonuçlar kullanılan lifin özelliklerine bağlı olup sonuçlar çalışmadan çalışmaya farklılık gösterebilir.
- Taşıyıcı hafif beton üretiminde hafif agrega olarak pomza kullanılması halinde mekanik özellikleri itibariyle uygunluğu araştırılmalıdır.
- Yüksek sıcaklık deneyi sonrası meydana gelen kristal piklerin ve amorf fazların daha net anlaşılması açısından uygulanan her sıcaklık sonrası XRD analizleri gerçekleştirmek yararlı olabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abid, S. R., Murali, G., Amran, M., Vatin, N., Fediuk, R., & Karelina, M. (2021). Evaluation of Mode II Fracture Toughness of Hybrid Fibrous Geopolymer Composites. *Materials*, 14(2), 349. <https://doi.org/10.3390/ma14020349>
- ACI. (2003). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. *ACI 213R-03*. Michigan: American Concrete Institute.
- ACI. (2014). Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. *ACI 213R-14*. Michigan: American Concrete Institute.
- Adesina, A. (2020). Performance of Fibre Reinforced Alkali-Activated Composites – A Review. *Materialia*, 12, 100782. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100782>
- Alanazi, H., Yang, M., Zhang, D., & Gao, Z. (Jerry). (2017). Early Strength and Durability of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69(1), 46-54. <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00118>
- Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., & Ehrlicher, A. (2005). The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 609-613. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.015>
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential Applications of Geopolymer Concrete in Construction: A Review. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>
- Ameri, F., Shoaee, P., Reza Musaei, H., Alireza Zareei, S., & Cheah, C. B. (2020). Partial Replacement of Copper Slag with Treated Crumb Rubber Aggregates in Alkali-Activated Slag Mortar. *Construction and Building Materials*, 256, 119468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119468>
- Amran, M., Huang, S.-S., Debbarma, S., & Rashid, R. S. M. (2022). Fire Resistance of Geopolymer Concrete: A Critical Review. *Construction and Building Materials*, 324, 126722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126722>
- Andiç-Çakır, Ö., & Ramyar, K. (2014). Doğal ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç ve Beton Geliştirilmesi. TÜBİTAK Projesi.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F., & Santoro, L. (2008). Coal Fly Ash as Raw Material for the Manufacture of Geopolymer-Based Products. *Waste Management*, 28(2), 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.001>
- Andrew, R. M. (2018). Global CO2 Emissions from Cement Production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.

- Arioz, O. (2009). Retained Properties of Concrete Exposed to High Temperatures: Size Effect. *Fire and Materials*, 33(5), 211-222. <https://doi.org/10.1002/fam.996>
- Arunagiri, K., Elanchezhian, P., Marimuthu, V., Arunkumar, G., & Rajeswaran, P. (2017). Mechanical Properties of Basalt Fiber Based Geopolymer Concrete. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 6(4), 551.
- Asil, M. B., & Ranjbar, M. M. (2022). Hybrid Effect of Carbon Nanotubes and Basalt Fibers on Mechanical, Durability, and Microstructure Properties of Lightweight Geopolymer Concretes. *Construction and Building Materials*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129352>
- Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., & Low, I.-M. (2015). Characterisation of Mechanical and Thermal Properties in Flax Fabric Reinforced Geopolymer Composites. *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4), 272-281. <https://doi.org/10.1007/s40145-015-0161-1>
- ASTM. (2021). Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. *ASTM C518-21*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2023). Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete. *ASTM C332-23*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Bagheri, A., & Samea, S. A. (2018). Parameters Influencing the Stability of Foamed Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 4018091. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002290](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002290)
- Barbosa, V. F. F., & MacKenzie, K. J. D. (2003). Synthesis and Thermal Behaviour of Potassium Sialate Geopolymers. *Materials Letters*, 57(9-10), 1477-1482. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01009-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01009-1)
- Benaicha, M., Jalbaud, O., Hafidi Alaoui, A., & Burtschell, Y. (2015). Correlation Between the Mechanical Behavior and the Ultrasonic Velocity of Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials* (C. 101, ss. 702-709). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.047>
- Bernal, S. A., de Gutierrez, R. M., Provis, J. L., & Rose, V. (2010). Effect of Silicate Modulus and Metakaolin Incorporation on the Carbonation of Alkali Silicate-Activated Slags. *Cement and Concrete Research*, 40(6), 898-907. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.003>
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Mejía de Gutiérrez, R., Gordillo, M., & Provis, J. L. (2011). Mechanical and Thermal Characterisation of Geopolymers Based on Silicate-Activated Metakaolin/Slag Blends. *Journal of Materials Science*, 46(16), 5477-5486. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5490-z>
- Bhat, T., Chevali, V., Liu, X., Feih, S., & Mouritz, A. P. (2015). Fire Structural Resistance of Basalt Fibre Composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 71, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.006>

- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., & Taylor, C. (2016). Mechanical Behaviour of Basalt Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878-886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.009>
- Bremner, T. W., Holm, T. A., & Stepanova, V. F. (1994). Lightweight Concrete-A Proven Material for Two Millennia. *Advances in Cement and Concrete*, 37-51.
- Brigante, D. (2014). *New Composite Materials*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01637-5>
- BS. (1986). Testing Concrete - Recommendations For Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete. *BS 1881-203*. British Standards Institution.
- Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y., & Uysal, M. (2018). High-Temperature Behavior and Mechanical Characteristics of Boron Waste Additive Metakaolin Based Geopolymer Composites Reinforced with Synthetic Fibers. *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.062>
- Chen, K. yu, Wang, Y. qing, Min, W. lin, Chen, J. jing, Wu, R. jie, Peng, Y., Zhao, Y. xi, & Xia, J. (2024). Performance Characteristics of Micro Fiber-Reinforced Ambient Cured One-Part Geopolymer Mortar for Repairing. *Construction and Building Materials*, 415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135086>
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224-229. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., & Rattanasak, U. (2014). Strength and Resistance to Sulfate and Sulfuric Acid of Ground Fluidized Bed Combustion Fly Ash-Silica Fume Alkali-Activated Composite. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1087-1093. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.02.007>
- Clarke, D. J. L. (1993). *Structural Lightweight Aggregate Concrete* (D. J. L. Clarke, Ed.; 1st Edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482269307>
- Çelik, A. (2019). *Sentetik Liflerle Güçlendirilmiş Bor Atığı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Davranışı ve Mekanik Özellikleri*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- Davidovits, J. (1984). Synthetic Mineral Polymer Compound of the Silicoaluminates Family and Preparation Process. US Patents.
- Davidovits, J. (1987). Geopolymeric Reactions in Archaeological Cements and in Modern Blended Cements. *Concr. Int*, 9, 23-29.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>

- Davidovits, J. (1994a). High-Alkali Cements for 21st Century Concretes. “*SP-144: Concrete Technology: Past, Present, and Future*”, 144. <https://doi.org/10.14359/4523>
- Davidovits, J. (1994b). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1, 131-149.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. *Geopolymer*, 99(292), 9-39.
- Davidovits, J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. *Geopolymer 2002 Conference*, 28, 29.
- Davidovits, J. (2013). A Review. Geopolymer Cement. *Geopolymer Institute, Technical Papers*, 21, 1-11.
- Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 335-350. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00038>
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer Chemistry and Applications* (5th Edition). Institut Géopolymère.
- De Vargas, A. S., Dal Molin, D. C. C., Vilela, A. C. F., Silva, F. J. da, Pavão, B., & Veit, H. (2011). The effects of Na₂O/SiO₂ Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 653-660. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.006>
- Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). The Effects of Ground Granulated Blast-Furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on the Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Materials & Design* (1980-2015), 62, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>
- Diaz, E. I., Allouche, E. N., & Eklund, S. (2010). Factors Affecting the Suitability of Fly Ash as Source Material for Geopolymers. *Fuel*, 89(5), 992-996. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.012>
- Diaz-Loya, E. I., Allouche, E. N., & Vaidya, S. (2011). Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 108(3). <https://doi.org/10.14359/51682495>
- Dikici, T. (2010). *Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Ding, Y., Zhang, C., Cao, M., Zhang, Y., & Azevedo, C. (2016). Influence of Different Fibers on the Change of Pore Pressure of Self-Consolidating Concrete Exposed to Fire. *Construction and Building Materials*, 113, 456-469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>

- Duan, P., Song, L., Yan, C., Ren, D., & Li, Z. (2017). Novel Thermal Insulating and Lightweight Composites from Metakaolin Geopolymer and Polystyrene Particles. *Ceramics International*, 43(6), 5115-5120. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.025>
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., & Shen, C. (2015). An Investigation of the Microstructure and Durability of a Fluidized Bed Fly Ash–Metakaolin Geopolymer After Heat and Acid Exposure. *Materials & Design*, 74, 125-137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.009>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer Technology: The Current State of the Art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- Duxson, P., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The Thermal Evolution of Metakaolin Geopolymers: Part 2 – Phase Stability and Structural Development. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(22-23), 2186-2200. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.02.050>
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & van Deventer, J. S. J. (2005). Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>
- Erdem, T. K. (2014). Specimen Size Effect on the Residual Properties of Engineered Cementitious Composites Subjected to High Temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 45, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.019>
- Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., & Demirboğa, R. (2021). Impact of Fiber Reinforcements on Properties of Geopolymer Composites: A Review. *Journal of Building Engineering*, 44, 102628. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102628>
- Farooq, F., Jin, X., Faisal Javed, M., Akbar, A., Izhar Shah, M., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer Concrete as Sustainable Material: A State of the Art Review. *Construction and Building Materials*, 306, 124762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>
- Farooq, M., Krishna, A., & Banthia, N. (2022). Highly Ductile Fiber Reinforced Geopolymers under Tensile Impact. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104374>
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., & Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034>
- Forss, B. (1983). F-Cement, A New Low-Porosity Slag Cement. *Silicates Industriels*, 3, 79-82.

- 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>
- Furlani, E., Maschio, S., Magnan, M., Aneggi, E., Andreatta, F., Lekka, M., Lanzutti, A., & Fedrizzi, L. (2018). Synthesis and Characterization of Geopolymers Containing Blends of Unprocessed Steel Slag and Metakaolin: The Role of Slag Particle Size. *Ceramics International*, 44(5), 5226-5232. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.131>
- Gagg, C. R. (2014). Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114-140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Ganesh, A. C., & Muthukannan, M. (2019). Effect of Elevated Temperature over Geopolymer Concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(1S3), 450-453. <https://doi.org/10.35940/ijeat.a1025.1291s419>
- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., Blanco, M. T., & Palomo, A. (2008). FTIR Study of the Sol–Gel Synthesis of Cementitious Gels: C–S–H and N–A–S–H. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 45(1), 63-72. <https://doi.org/10.1007/s10971-007-1643-6>
- García-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2007). Alkali–Aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.002>
- García-Mejía, T. A., & de Lourdes Chávez-García, Ma. (2016). Compressive Strength of Metakaolin-Based Geopolymers: Influence of KOH Concentration, Temperature, Time and Relative Humidity. *Materials Sciences and Applications*, 07(11), 772-791. <https://doi.org/10.4236/msa.2016.711060>
- Gartner, E. (2004). Industrially Interesting Approaches to “Low-CO₂” Cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489-1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
- Ghandehari, M., Behnood, A., & Khanzadi, M. (2010). Residual Mechanical Properties of High-Strength Concretes after Exposure to Elevated Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 59-64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(59))
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Assessment of the Effects of Rice Husk Ash Particle Size on Strength, Water Permeability and Workability of Binary Blended Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2145-2150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.045>
- Glukhovskiy, V. D. (1959). *Soil Silicates*. Kiev: Gosstroyizdat Publish.
- Görhan, G., Kürklü, G., & Başpınar, M. S. (2016). Metakaolin ve Uçucu Kül İçerikli Geopolimer Malzeme Üretiminde Termal Kür Prosesinin Optimizasyonu ve Karışım Dizayn Metodolojisinin Geliştirilmesi. TÜBİTAK Projesi.

- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Ozturan, T., & Mermerdaş, K. (2012). Comparing Pozzolanic Activity of Metakaolin and Calcined Kaolin, and Their Effects on Strength of Concrete. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Ankara.
- Haldar, S. K. (2017). Geology and Geochemistry. *Platinum-Nickel-Chromium Deposits*, 37-61. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802041-8.00002-x>
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology.
- He, P., Jia, D., Lin, T., Wang, M., & Zhou, Y. (2010). Effects of High-Temperature Heat Treatment on the Mechanical Properties of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Geopolymer Composites. *Ceramics International*, 36(4), 1447-1453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.02.012>
- He, R., Dai, N., & Wang, Z. (2020). Thermal and Mechanical Properties of Geopolymers Exposed to High Temperature: A Literature Review. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2020/7532703>
- Heah, C. Y., Kamarudin, H., Bakri, A. M. M. Al, Binhussain, M., Luqman, M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C. M., & Liew, Y. M. (2011). Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.048>
- Hu, M., Zhu, X., & Long, F. (2009). Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers with Zeolite or Bentonite as Additives. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 762-768. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.006>
- Huang, X., Yu, L., Li, D. W., Shiao, Y. C., Li, S., & Liu, K. X. (2015). Preparation and Properties of Geopolymer from Blast Furnace Slag. *Materials Research Innovations*, 19(sup10), S10-413-S10-419. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000002210>
- Hussin, M. W., Bhutta, M. A. R., Azreen, M., Ramadhansyah, P. J., & Mirza, J. (2015). Performance of Blended Ash Geopolymer Concrete at Elevated Temperatures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(3), 709-720. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0251-5>
- Hyeok-Jung, K., Kang, S.-P., & Choe, G.-C. (2018). Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali-Activated Slag Cement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0258-3>
- Jafari Nadoushan, M., & Ramezaniannpour, A. A. (2016). The Effect of Type and Concentration of Activators on Flowability and Compressive Strength of Natural Pozzolan and Slag-Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 337-347. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.086>

- Jindal, B. B., Alomayri, T., Hasan, A., & Kaze, C. R. (2023). Geopolymer Concrete with Metakaolin for Sustainability: a Comprehensive Review on Raw Material's Properties, Synthesis, Performance, and Potential Application. *Environmental Science and Pollution Research* (C. 30, Sayı 10, ss. 25299-25324). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17849-w>
- Jindal, B. B., Parveen, Singhal, D., & Goyal, A. (2017). Predicting Relationship between Mechanical Properties of Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 76(4), 258-265. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2017.1412837>
- Joseph, B. (2015). *Behavior of Geopolymer Concrete Exposed to Elevated Temperatures*, Cochin University of Science and Technology, Doktora Tezi.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in Alternative Cementitious Binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232-1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- 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>
- Kamalloo, A., Ganjkhani, Y., Aboutalebi, S. H., & Noranian, H. (2010). Modeling of Compressive Strength of Metakaolin Based Geopolymers by The Use of Artificial Neural Network RESEARCH NOTE). *International Journal of Engineering. Transactions A: Basics*, 23, 145-152. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134633499>
- Kamath, M., Prashant, S., & Kumar, M. (2021). Micro-Characterisation of Alkali Activated Paste with Fly Ash-GGBS-Metakaolin Binder System with Ambient Setting Characteristics. *Construction and Building Materials*, 277, 122323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122323>
- Kantarci, F. (2022). Influence of Fiber Characteristics on Sulfate Resistance of Ambient-Cured Geopolymer Concrete. *Structural Concrete*, 23(2), 775-790. <https://doi.org/10.1002/suco.202100540>
- Kenne Dikko, B. B., Elimbi, A., Cyr, M., Dika Manga, J., & Tchakoute Kouamo, H. (2015). Effect of the Rate of Calcination of Kaolin on the Properties of Metakaolin-Based Geopolymers. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(1), 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.12.003>
- Khan, M. Z. N., Shaikh, F. uddin A., Hao, Y., & Hao, H. (2016). Synthesis of High Strength Ambient Cured Geopolymer Composite by Using Low Calcium Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 125, 809-820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.097>
- Khosh, B., & Atapour, H. (2024). Assessment of Mechanical Behavior of Sprayed Concrete Reinforced with Waste Tire Textile Fibers. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59339-2>

- Ki-Yeol, S., Kim, S.-B., Kim, J.-H., Chung, M., & Jung, P.-S. (1999). Thermophysical Properties and Transient Heat Transfer of Concrete at Elevated Temperature. *Nucl Eng Des*, 212, 233-241.
- Komnitsas, K., & Zaharaki, D. (2007). Geopolymerisation: A Review and Prospects for the Minerals Industry. *Minerals Engineering*, 20(14), 1261-1277. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>
- Kong, D. L. Y., & Sanjayan, J. G. (2008). Damage Behavior of Geopolymer Composites Exposed to Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986-991. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001>
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative Performance of Geopolymers Made with Metakaolin and Fly Ash after Exposure to Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1583-1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.021>
- Korniejenko, K., Łach, M., & Mikula, J. (2021). The Influence of Short Coir, Glass and Carbon Fibers on the Properties of Composites with Geopolymer Matrix. *Materials*, 14(16), 4599. <https://doi.org/10.3390/ma14164599>
- Krishna, R. S., Mishra, J., Zribi, M., Adeniyi, F., Saha, S., Baklouti, S., Shaikh, F. U. A., & Gökçe, H. S. (2021). A Review on Developments of Environmentally Friendly Geopolymer Technology. *Materialia*, 20(April), 101212. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101212>
- Kumar, P., Pankar, C., Manish, D., & Santhi, A. S. (2018). Study of Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete with GGBS and Metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28127-28135. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.054>
- 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>
- Lahoti, M., Wong, K. K., Yang, E.-H., & Tan, K. H. (2018). Effects of Si/Al Molar Ratio on Strength Endurance and Volume Stability of Metakaolin Geopolymers Subject to Elevated Temperature. *Ceramics International*, 44(5), 5726-5734. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.226>
- Lee, N. K., & Lee, H. K. (2015). Reactivity and Reaction Products of Alkali-Activated, Fly Ash/Slag Paste. *Construction and Building Materials*, 81, 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.022>
- Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The Comparison Between Alkali-Activated Slag (Si + Ca) and Metakaolin (Si + Al) Cements. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341-1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>
- Li, M., Luo, R., Qin, L., Liu, H., Duan, P., Jing, W., Zhang, Z., & Liu, X. (2022). High Temperature Properties of Graphene Oxide Modified Metakaolin Based

- Geopolymer Paste. *Cement and Concrete Composites*, 125, 104318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104318>
- Li, W., & Xu, J. (2009). Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Geopolymeric Concrete Under Impact Loading. *Materials Science and Engineering: A*, 505(1-2), 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.063>
- Li, Z., Chen, W., Hao, H., Khan, M. Z. N., & Pham, T. M. (2021). Dynamic Compressive Properties of Novel Lightweight Ambient-Cured EPS Geopolymer Composite. *Construction and Building Materials*, 273, 122044. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122044>
- Liew, Y.-M., Heah, C.-Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and Properties of Clay-Based Geopolymer Cements: A Review. *Progress in Materials Science*, 83, 595-629. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>
- Liu, C., Huang, X., Wu, Y.-Y., Deng, X., Liu, J., Zheng, Z., & Hui, D. (2020). Review on the Research Progress of Cement-Based and Geopolymer Materials Modified by Graphene and Graphene Oxide. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 155-169. <https://doi.org/doi:10.1515/ntrev-2020-0014>
- Liu, M. Y. J., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Mo, K. H. (2014). Evaluation of Thermal Conductivity, Mechanical and Transport Properties of Lightweight Aggregate Foamed Geopolymer Concrete. *Energy and Buildings*, 72, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.029>
- Lizcano, M., Gonzalez, A., Basu, S., Lozano, K., & Radovic, M. (2012). Effects of Water Content and Chemical Composition on Structural Properties of Alkaline Activated Metakaolin-Based Geopolymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(7), 2169-2177. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05184.x>
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2009). Geopolymer Concrete-Sustainable Cementless Concrete. *Proceedings of Tenth ACI International Conference*, 33-53.
- Luhar, S., Chaudhary, S., & Luhar, I. (2018). Thermal Resistance of Fly Ash Based Rubberized Geopolymer Concrete. *Journal of Building Engineering*, 19, 420-428. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.025>
- Lyon, R. E., Balaguru, P. N., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J., & Davidovics, M. (1997). Fire-Resistant Aluminosilicate Composites. *Fire and Materials*, 21(2), 67-73. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1018\(199703\)21:2<67::AID-FAM596>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1018(199703)21:2<67::AID-FAM596>3.0.CO;2-N)
- Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical Properties of Concrete at High Temperature-A Review. *Construction and Building Materials*, 93, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- Malek, R. I. A., Roy, D. M., & Langton, C. A. (1986). Slag Cement-Low Level Radioactive Waste Forms at Savannah River Plant. *American Ceramic Society Bulletin*, 65, 1578-1583. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134686581>

- Manzoor, T., Bhat, J. A., & Shah, A. H. (2024). Performance of Geopolymer Concrete at Elevated Temperature – A Critical Review. *Construction and Building Materials* (C. 420). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135578>
- MAPEG. (2023). <https://mapeg.gov.tr>. <https://mapeg.gov.tr> adresinden alınmıştır.
- Marín-López, C., Reyes Araiza, J. L., Manzano-Ramírez, A., Rubio Avalos, J. C., Perez-Bueno, J. J., Muñiz-Villareal, M. S., Ventura-Ramos, E., & Vorobiev, Y. (2009). Synthesis and Characterization of a Concrete Based on Metakaolin Geopolymer. *Inorganic Materials*, 45(12), 1429-1432. <https://doi.org/10.1134/S0020168509120231>
- Marjanović, N., Komljenović, M., Bašćarević, Z., Nikolić, V., & Petrović, R. (2015). Physical–Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash–Blast Furnace Slag Blends. *Ceramics International*, 41(1), 1421-1435. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.09.075>
- Martin, A. (2024). *The Global Change Institute*. <https://www.architectureanddesign.com> adresinden alınmıştır.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Sulfuric Acid Resistance of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.077>
- Melo, K. A., & Carneiro, A. M. P. (2010). Effect of Metakaolin's Finesses and Content in Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1529-1535. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.002>
- Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., Cioffi, R., & Manfredi, G. (2013). Use of Geopolymers for Composite External Reinforcement of RC Members. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1667-1676. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.019>
- Mishra, J., Kumar Das, S., Krishna, R. S., Nanda, B., Kumar Patro, S., & Mohammed Mustakim, S. (2020). Synthesis and Characterization of a New Class of Geopolymer Binder Utilizing Ferrochrome Ash (FCA) for Sustainable Industrial Waste Management. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5001-5006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.832>
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Liu, M. Y. J., & Lim, J. (2016). Assessing Some Durability Properties of Sustainable Lightweight Oil Palm Shell Concrete Incorporating Slag and Manufactured Sand. *Journal of Cleaner Production*, 112, 763-770. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.122>
- Mouli, M., & Khelafi, H. (2008). Performance Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Containing Natural Pozzolan. *Building and Environment*, 43(1), 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.038>
- Nath, P., Sarker, P. K., & Rangan, V. B. (2015). Early Age Properties of Low-calcium Fly Ash Geopolymer Concrete Suitable for Ambient Curing. *Procedia Engineering*, 125, 601-607. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.077>

- Neville, A. M. (1997). *Properties of Concrete* (4th and Final Ed.). Pearson Education Limited.
- Ng, S.-C., & Low, K.-S. (2010). Thermal Conductivity of Newspaper Sandwiched Aerated Lightweight Concrete Panel. *Energy and Buildings*, 42(12), 2452-2456. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.026>
- Nuruddin, M. F., Demie, S., & Shafiq, N. (2011). Effect of Mix Composition on Workability and Compressive Strength of Self-Compacting Geopolymer Concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(11), 1196-1203. <https://doi.org/10.1139/111-077>
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., & Singh, N. B. (2016). Effect of Silica Fume on the Mechanical Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete. *Ceramics International*, 42(2, Part B), 3000-3006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.084>
- Öz, H. Ö., Yücel, H. E., Güneş, M., & Köker, T. Ş. (2021). Fly-Ash-Based Geopolymer Composites Incorporating Cold-Bonded Lightweight Fly Ash Aggregates. *Construction and Building Materials*, 272, 121963. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121963>
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-Activated Binders: A Review. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J. A., Leonelli, C., Palomo, A., & Palomo, A. (Ed.). (2015). *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16511-7>
- Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., & Jalali, S. (2011). Composition, Strength and Workability of Alkali-Activated Metakaolin Based Mortars. *Construction and Building Materials*, 25(9), 3732-3745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.017>
- Palacios, M., & Puertas, F. (2005). Effect of Superplasticizer and Shrinkage-Reducing Admixtures on Alkali-Activated Slag Pastes and Mortars. *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1358-1367. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.014>
- Palomo, Á., Alonso, S., Fernandez-Jiménez, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2004). Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products. *Journal of the American Ceramic Society*, 87(6), 1141-1145. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.01141.x>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Pan, Z., Sanjayan, J. G., & Rangan, B. V. (2011). Fracture Properties of Geopolymer Paste and Concrete. *Magazine of Concrete Research*, 63(10), 763-771. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.10.763>

- Pangdaeng, S., Sata, V., Aguiar, J. B., Pacheco-Torgal, F., & Chindaprasirt, P. (2015). Apatite Formation on Calcined Kaolin–White Portland Cement Geopolymer. *Materials Science and Engineering: C*, 51, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.02.039>
- Park, S. M., Jang, J. G., Lee, N. K., & Lee, H. K. (2016). Physicochemical Properties of Binder Gel in Alkali-Activated Fly Ash/Slag Exposed to High Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 89, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.004>
- Patil, S., Karikatti, V., & Chitawadagi, M. (2018). Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Based Geopolymer Concrete–Review. *Int. J. Adv. Sci. Eng*, 5(1), 879-885.
- Perera, D. S., Uchida, O., Vance, E. R., & Finnie, K. S. (2007). Influence of Curing Schedule on the Integrity of Geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3099-3106. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0533-6>
- Perez-Cortes, P., & Escalante-Garcia, J. I. (2020). Design and Optimization of Alkaline Binders of Limestone-Metakaolin – A Comparison of Strength, Microstructure and Sustainability with Portland Cement and Geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>
- Priyanka, M., Karthikeyan, M., & Chand, M. S. R. (2020). Development of Mix Proportions of Geopolymer Lightweight Aggregate Concrete with LECA. *Materials Today: Proceedings*, 27, 958-962. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.271>
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 44(1), 299-327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2005). Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. *Chemistry of Materials*, 17(12), 3075-3085. <https://doi.org/10.1021/cm050230i>
- Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015). Advances in Understanding Alkali-Activated Materials. *Cement and Concrete Research*, 78, 110-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
- Puertas, F., Gil-Maroto, A., Palacios, M., & Amat, T. (2006). Alkali-Activated Slag Mortars Reinforced with ar Glassfibre. Performance and Properties. *Materiales de Construcción*, 56(283). <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i283.10>
- Purdon, A. O. (1940). The Action of Alkalis on Blast-Furnace Slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), 191-202.
- Qiu, J., Zhao, Y., Xing, J., & Sun, X. (2019). Fly Ash/Blast Furnace Slag-Based Geopolymer as a Potential Binder for Mine Backfilling: Effect of Binder Type and Activator Concentration. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/2028109>

- Rahier, H., Wastiels, J., Biesemans, M., Willem, R., Van Assche, G., & Van Mele, B. (2007). Reaction Mechanism, Kinetics and High Temperature Transformations of Geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2982-2996. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0568-8>
- Ramasamy, S., Hussin, K., Abdullah, M. M. A. B., Ghazali, C. M. R., Binhussain, M., & Sandu, A. V. (2016). Interrelationship of Kaolin, Alkaline Liquid Ratio and Strength of Kaolin Geopolymer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133, 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/133/1/012004>
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrali, M., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2015). Graphene Nanoplatelet-Fly Ash Based Geopolymer Composites. *Cement and Concrete Research*, 76, 222-231.
- Rashad, A. M. (2019). Insulating and Fire-Resistant Behaviour of Metakaolin and Fly Ash Geopolymer Mortars. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 172(1), 37-44. <https://doi.org/10.1680/jcoma.17.00016>
- Reddy, B. S. K. (2010). Strength and Workability of Low Lime Fly-Ash Based Geopolymer Concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 3(12), 1188-1189. <https://doi.org/10.17485/ijst/2010/v3i12.11>
- Rossignolo, J. A., Agnesini, M. V. C., & Morais, J. A. (2003). Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 77-82. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00046-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00046-4)
- Rovnaník, P. (2010). Effect of Curing Temperature on the Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176-1183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023>
- Roy, D. M., & Langton, C. A. (1989). *Studies of Ancient Concrete as Analogs of Cementitious Sealing Materials for a Repository in Tuff*. <https://doi.org/10.2172/60684>
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with Alkaline Activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409-418. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- Saludung, A., Ogawa, Y., & Kawai, K. (2018). Microstructure and Mechanical Properties of FA/GGBS-Based Geopolymer. *MATEC Web of Conferences*, 195, 01013. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201819501013>
- San Nicolas, R., Cyr, M., & Escadeillas, G. (2013). Characteristics and Applications of Flash Metakaolins. *Applied Clay Science*, 83-84, 253-262. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.036>
- Saradar, A., Tahmouresi, B., Mohseni, E., & Shadmani, A. (2018). Restrained Shrinkage Cracking of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete. *Fibers*, 6(1), 12. <https://doi.org/10.3390/fib6010012>

- Sarıdemir, M., & Çelikten, S. (2020). Investigation of Fire and Chemical Effects on the Properties of Alkali-Activated Lightweight Concretes Produced with Basaltic Pumice Aggregate. *Construction and Building Materials*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119969>
- Sarker, P. K., Haque, R., & Ramgolam, K. V. (2013). Fracture Behaviour of Heat Cured Fly Ash Based Geopolymer concrete. *Materials & Design*, 44, 580-586. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.005>
- Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). Effect of Fire Exposure on Cracking, Spalling and Residual Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete. *Materials & Design*, 63, 584-592. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.059>
- Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2020). Use of Construction and Demolition Waste (CDW) for Alkali-Activated or Geopolymer Concrete. *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00019-X>
- Saxena, S. K., Kumar, M., & Singh, N. B. (2017). Fire Resistant Properties of Alumino Silicate Geopolymer Cement Mortars. *Materials Today: Proceedings*, 4(4, Part E), 5605-5612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.018>
- Saygili, A., & Baykal, G. (2011). A New Method for Improving the Thermal Insulation Properties of Fly Ash. *Energy and Buildings*, 43(11), 3236-3242. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.024>
- Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in Use and Research on Cementitious Material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.
- 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). <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0267-2>
- Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2003). Alkali-Activated Cements and Concretes. *Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar* (Sayı August). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266900>
- Shilar, F. A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Neelakanta Reddy, I., & Shim, J. (2023). Preparation and Validation of Sustainable Metakaolin Based Geopolymer Concrete for Structural Application. *Construction and Building Materials*, 371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130688>
- Siddique, R., Kunal, & Mehta, A. (2020). 11 - Utilization of Industrial By-Products and Natural Ashes in Mortar and Concrete Development of Sustainable Construction Materials. K. A. Harries & B. B. T.-N. and V. C. M. (Second E. Sharma (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (ss. 247-303). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00011-1>

- Silva, P. De, Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of Geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an Alternative to Portland Cement: An Overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Sithole, N. T., & Mashifana, T. (2020). Geosynthesis of Building and Construction Materials Through Alkaline Activation of Granulated Blast Furnace Slag. *Construction and Building Materials*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120712>
- Slaty, F., Khoury, H., Rahier, H., & Wastiels, J. (2015). Durability of Alkali Activated Cement Produced from Kaolinitic Clay. *Applied Clay Science*, 104, 229-237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.037>
- Srinivasreddy, A. B., McCarthy, T. J., & Lume, E. (2013). Effect of Rice Husk Ash on Workability and Strength of Concrete. *Sociological Research Online*.
- Steinerova, M., Matulova, L., Vermach, P., & Kotas, J. (2017). The Brittleness and Chemical Stability of Optimized Geopolymer Composites. *Materials* (C. 10, Sayı 4). <https://doi.org/10.3390/ma10040396>
- Steveson, M., & Sagoe-Crentsil, K. (2005). Relationships Between Composition, Structure and Strength of Inorganic Polymers. *Journal of Materials Science*, 40(8), 2023-2036. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1226-2>
- Subaer, & van Riessen, A. (2007). Thermo-Mechanical and Microstructural Characterisation of Sodium-Poly(Sialate-Siloxo) (Na-PSS) Geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3117-3123. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0522-9>
- Sun, Z., Cui, H., An, H., Tao, D., Xu, Y., Zhai, J., & Li, Q. (2013). Synthesis and Thermal Behavior of Geopolymer-Type Material from Waste Ceramic. *Construction and Building Materials*, 49, 281-287. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.063>
- Sun, Z., Lin, X., & Vollpracht, A. (2018). Pervious Concrete Made of Alkali Activated Slag and Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 189, 797-803. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067>
- Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material. *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143-1148. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00005-7)
- Şahin, F. (2020). *Farklı Tür Agregalarda Üretilen Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi*. İstanbul Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Şahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). Effect of Basalt Fiber on Metakaolin-Based Geopolymer Mortars Containing Rilem,

- Basalt and Recycled Waste Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 301(March). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124113>
- Tale Masoule, M. S., Bahrami, N., Karimzadeh, M., Mohasanati, B., Shoaee, P., Ameri, F., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lightweight Geopolymer Concrete: A Critical Review on the Feasibility, Mixture Design, Durability Properties, and Microstructure. *Ceramics International* (C. 48, Sayı 8, ss. 10347-10371). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.298>
- 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(August), e00673. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00673>
- 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>
- Topçu, İ. B. (1997). Assessment of the Brittleness Index of Rubberized Concretes. *Cement and Concrete Research*, 27(2), 177-183. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00199-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00199-8)
- Topçu, İ. B., & Karakurt, C. (2008). Properties of Reinforced Concrete Steel Rebars Exposed to High Temperatures. *Research Letters in Materials Science*, 2008, 1-4. <https://doi.org/10.1155/2008/814137>
- Toumi, B., Guemmadi, Z., Houari, H., & Chabil, H. (2007). The Behaviour of Geopolymer Paste and Concrete at Elevated Temperatures. *Design and Sustainability*, 291.
- TSE. (2017). Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları. TS 2511. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE. (2019a). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini. TS EN 12390-3. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE. (2019b). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. TS EN 12390-5. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE. (2019c). Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi. TS 12350-2. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TSE. (2021). Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TS EN 206+A2. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2003). The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers. *Materials Letters*, 57(7), 1272-1280. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00971-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00971-0)

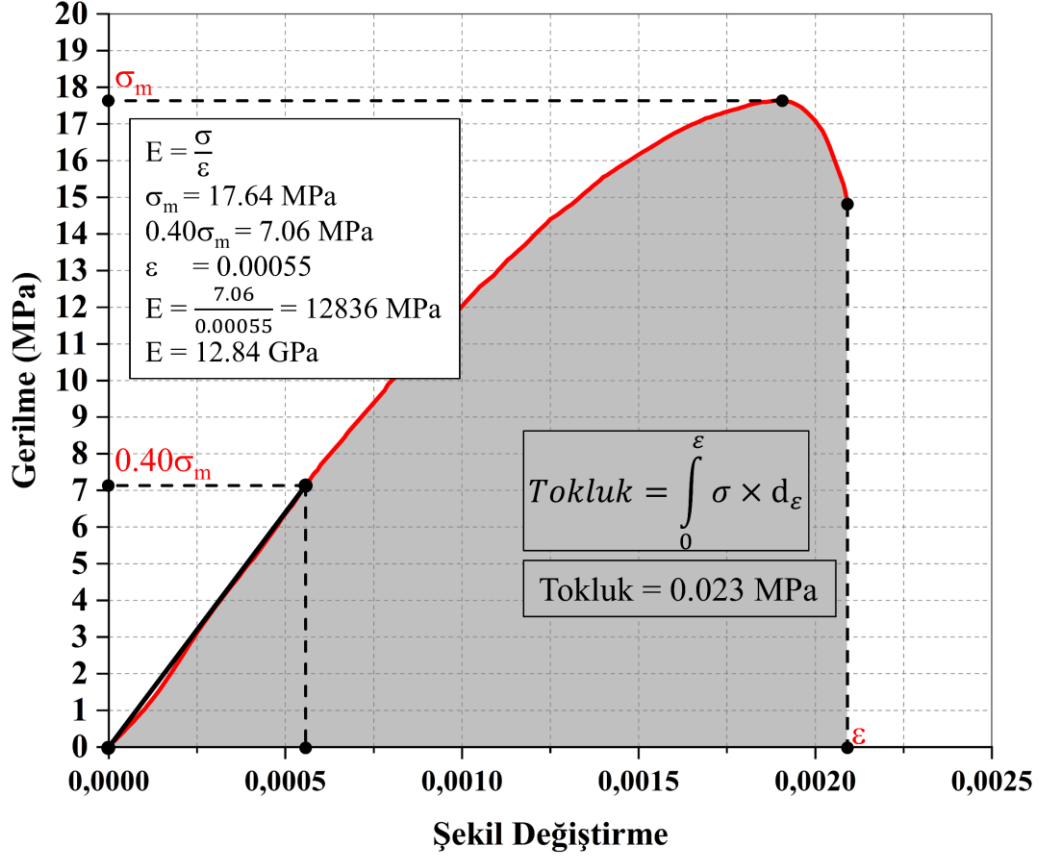
- Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Long-term Properties. *Concrete*. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/34322>
- Wang, M. R., Jia, D. C., He, P. G., & Zhou, Y. (2010). Influence of Calcination Temperature of Kaolin on the Structure and Properties of Final Geopolymer. *Materials Letters*, 64(22), 2551-2554. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.08.007>
- Wang, S.-D., & Scrivener, K. L. (1995). Hydration Products of Alkali Activated Slag Cement. *Cement and Concrete Research*, 25(3), 561-571. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00045-E](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00045-E)
- Wang, Y., Hu, S., & He, Z. (2021). Mechanical and Fracture Properties of Geopolymer Concrete with Basalt Fiber Using Digital Image Correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 112, 102909. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102909>
- Wang, Y., Hu, S., & Sun, X. (2022). Experimental Investigation on the Elastic Modulus and Fracture Properties of Basalt Fiber-Reinforced Fly Ash Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 338, 127570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127570>
- Welter, M., Schmücker, M., & MacKenzie, K. J. D. (2015). Evolution of the Fibre-Matrix Interactions in Basalt-Fibre-Reinforced Geopolymer-Matrix Composites After Heating. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 6(1), 17-24. <https://doi.org/10.4416/JCST2014-00034>
- 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>
- Wongsa, A., Zaetang, Y., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of Lightweight Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash as Aggregates. *Construction and Building Materials*, 111, 637-643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.135>
- Xie, T., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Behavior of Low-Calcium Fly and Bottom Ash-Based Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Ceramics International*, 41(4), 5945-5958. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.031>
- Xin, J., & Huang, C. (2013). Fire Risk Analysis of Residential Buildings Based on Scenario Clusters and its Application in Fire Risk Management. *Fire Safety Journal*, 62, 72-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.022>
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)

- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2002). Geopolymerisation of Multiple Minerals. *Minerals Engineering*, 15(12), 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00255-8)
- Yang, K.-H., & Song, J.-K. (2009). Workability Loss and Compressive Strength Development of Cementless Mortars Activated by Combination of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(3), 119-127. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:3\(119\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:3(119))
- Yang, K.-H., Song, J.-K., & Lee, J.-S. (2010). Properties of Alkali-Activated Mortar and Concrete Using Lightweight Aggregates. *Materials and Structures*, 43(3), 403-416. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9499-6>
- Yao, X., Yang, T., & Zhang, Z. (2016). Compressive Strength Development and Shrinkage of Alkali-Activated Fly Ash–Slag Blends Associated with Efflorescence. *Materials and Structures*, 49(7), 2907-2918. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0694-3>
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization Process of Alkali-Metakaolinite Characterized by Isothermal Calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.04.002>
- Yip, C. K., & van Deventer, J. S. J. (2003). Microanalysis of Calcium Silicate Hydrate Gel Formed within a Geopolymeric Binder. *Journal of Materials Science*, 38(18), 3851-3860. <https://doi.org/10.1023/A:1025904905176>
- Yliniemi, Paiva, Ferreira, Tiainen, & Illikainen. (2017). Development and Incorporation of Lightweight Waste-Based Geopolymer Aggregates in Mortar and Concrete. *Construction and Building Materials*, 131, 784-792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.017>
- Young, J. F., Mindess, S., Bentur, A., & Gray, R. J. (1998). *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. Prentice Hall.
- Youssf, O., Elchalakani, M., Hassanli, R., Roychand, R., Zhuge, Y., Gravina, R. J., & Mills, J. E. (2022). Mechanical Performance and Durability of Geopolymer Lightweight Rubber Concrete. *Journal of Building Engineering*, 45(October 2021), 103608. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103608>
- Zeng, Y., & Tang, A. (2021). Comparison of Effects of Basalt and Polyacrylonitrile Fibers on Toughness Behaviors of Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122572>
- Zhang, H., He, B., Chen, W., Ai, J., Zhu, X., & Jiang, Z. (2024). Investigating the Influence of Fibre Type and Content on the Toughness and Ductility of Geopolymer Mortar with Acoustic Emission Technology. *Cement and Concrete Composites*, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105434>
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L., & Wu, B. (2014). Development of Metakaolin–Fly Ash Based Geopolymers for Fire Resistance Applications.

Construction and Building Materials, 55, 38-45.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.040>

- Zhang, M., He, M., & Zhang, J. (2023). Mitigation of efflorescence for multi-componential geopolymer: Influence of steel slag, flue gas desulfurization gypsum and pre-curing periods. *Journal of Cleaner Production*, 403, 136835. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136835>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Ma, X., Reid, A., & Wang, H. (2018). Efflorescence and Subflorescence Induced Microstructural and Mechanical Evolution in Fly Ash-Based Geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 92, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.010>
- Zhao, M., Zhang, G., Htet, K. W., Kwon, M., Liu, C., Xu, Y., & Tao, M. (2019). Freeze-Thaw Durability of Red Mud Slurry-Class F Fly Ash-Based Geopolymer: Effect of Curing Conditions. *Construction and Building Materials*, 215, 381-390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.235>
- Zhao, Q., Nair, B., Rahimian, T., & Balaguru, P. (2007). Novel Geopolymer Based Composites with Enhanced Ductility. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3131-3137. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0527-4>

7. EKLER



Ek Şekil 1. PCHB'ye ait elastisite modülü ve tokluk hesabı

Ek Tablo 1. GHB'ye ait su/geopolimer katı oranı hesabı

Su/Geopolimer Katı Oranı Hesabı			
I. Karışım Miktarı (kg/m ³)		II. Sodyum Silikatın Kimyasal Bileşenleri (%)	
Metakaolin	100	SiO ₂	26,30
Yüksek Fırın Cürufu	300		
Sodyum Silikat Solüsyonu	206,67	Na ₂ O	8,40
Sodyum Hidroksit Solüsyonu	103,33		
Sodyum Hidroksit Solüsyonu Molaritesi	12M	H ₂ O	65,30
III. Molaritedeki NaOH pul yüzdesi (%)			
12M NaOH	36,09		

Ek Tablo 1'in devamı. GHB'ye ait su/geopolimer katı oranı hesabı

IV. Kütlece Su/Geopolimer Katı Oranı Hesabı							
Karışım Kodu	NaOH Molaritesi	NaOH Solüsyonu		Sodyum Silikat Solüsyonu		Metakaolin (kg)	Yüksek Fırın Cürufu (kg)
		Katı (kg)	Su (kg)	Katı (kg)	Su (kg)		
GHB	12M	37,29	66,04	71,71	134,96	100	300
Toplam							
Katı (kg)		Su (kg)		Su/Katı			
509		201		0,40			

Ek Tablo 2. GHB'ye ait molar oran hesabı

Molar Oran Hesabı					
I. Karışım Miktarı (kg/m³)		II. Metakaolinin Kimyasal Bileşenleri (%)		III. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Bileşenleri (%)	
Metakaolin	100	SiO ₂	54,50	SiO ₂	32,50
Yüksek Fırın Cürufu	300			Al ₂ O ₃	14,40
Sodyum Silikat Solüsyonu	206,67	Al ₂ O ₃	42,50		
Sodyum Hidroksit Solüsyonu	103,33			Na ₂ O	0,34
Sodyum Hidroksit Solüsyonu Molaritesi	12M				
IV. Sodyum Silikatın Kimyasal Bileşenleri (%)		V. Molaritedeki NaOH pul yüzdesi (%)		VI. Bazı Bileşiklerin Molekül Ağırlıkları (gr/mol)	
SiO ₂	26,30	12M NaOH	36,09	SiO ₂	60,09
				Al ₂ O ₃	101,96
Na ₂ O	8,40			Na ₂ O	61,98
H ₂ O	65,30			H ₂ O	18,00
				NaOH	39,99

Ek Tablo 2'nin devamı. GHB'ye ait molar oran hesabı

VII. Geopolimer Bileşenlerinin Mol ve Molar Oran Hesabı						
Karışım Kodu	NaOH Molaritesi	Metakaolin		Yüksek Fırın Cürufu		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O
GHB	12M	906,97	416,83	1622,57	423,70	16,65
Sodyum Silikat Solüsyonu			NaOH Solüsyonu			
SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	Pul		Su	
			Na ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	
904,55	280,10	7497,53	466,28	466,11	3668,89	
Metreküpteki Toplam Mol Miktarı				Molar Oran		
Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	H ₂ O	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	H ₂ O/Na ₂ O
763,03	3434,09	840,53	11632,53	0,91	4,09	15,25
Metakaolin için SiO₂ mol hesabı: 100x54.50/100 = 54.50 kg = 54500 gr n = m/M formülünden, n = 54500/60.09 = 906.97				Metakaolin için Al₂O₃ mol hesabı: 100x42.50/100 = 42.50 kg = 42500 gr n = m/M formülünden, n = 42500/101.96 = 416.83		
NaOH solüsyonu pul için Na₂O mol hesabı: 2NaOH → Na₂O + H₂O 103.33x36.09/100 = 37.29 kg NaOH 37.29x0.775 = 28.90 kg = 28900 gr Na₂O n = m/M formülünden, n = 28900/61.98 = 466.28				NaOH solüsyonu pul için H₂O mol hesabı: 2NaOH → Na₂O + H₂O 103.33x36.09/100 = 37.29 kg NaOH 37.29x0.225 = 8.39 kg = 8390 gr H₂O n = m/M formülünden, n = 8390/18 = 466.11		

ÖZGEÇMİŞ

Sümeyye KARAHÜSEYİN, İlköğretimi Gazi İlköğretim Okulu'nda, ortaöğretimi Giresun Mimar Sinan Anadolu Lisesi'nde okul ikincisi olarak tamamladı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında Avrasya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2019 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. İngilizce bilmektedir.

Karahüseyin, S., & Erdoğan, Ş. (2023). Evaluation of Ground Rhyolite and Metakaolin in View of Preventing Delayed Ettringite Formation in the Long Term. *International Journal of Civil Engineering*, 21(2), 251-264.