

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TÜR LİFLER İÇEREN ATIK SERAMİK TOZU
ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ayşen Tahire KILIÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Programı

Danışman
Prof. Dr. Mücteba UYSAL

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TÜR LİFLER İÇEREN ATIK SERAMİK TOZU
ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ayşen Tahire KILIÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 24.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mücteba UYSAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mücteba UYSAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan CANPOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Anıl NİŞ, Üye
İstanbul Gelişim Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Mücteba UYSAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Farklı Tür Lifler İçeren Atık Seramik Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ayşen Tahire KILIÇ

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bana destek olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan danışman hocam **Prof. Dr. Mücteba Uysal’a**,

Yüksek lisans tez çalışmam ve tüm akademik hayatım boyunca maddi manevi her daim yanımda olan anneme, babama ve kardeşime teşekkür ederim.

Ayşen Tahire KILIÇ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1 GİRİŞ	1
1.1 Genel Bakış	1
2 GEOPOLİMERLER	10
2.1 Geopolimer.....	10
2.2 Geopolimer Kimyası	11
2.3 Geopolimer Tarihi.....	17
2.4 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler	18
2.4.1 Agregat	18
2.4.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu	20
2.4.3 Atık Seramik Tozu	23
2.4.4 Alkali Aktivatörler	27
3 MALZEMELER VE YÖNTEMLER	32
3.1 Giriş.....	32
3.2 Malzemeler.....	32
3.2.1 Atık Seramik Tozu	32
3.2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	33
3.2.3 Agregat	34
3.2.4 Kimyasal Aktivatörler	35
3.2.5 Akışkanlaştırıcı Katkı	39

3.2.6	Lifler	39
3.3	Deneysel Çalışmalar	42
3.3.1	Basınç Dayanımı Deneyi	44
3.3.2	Eğilme Dayanımı Deneyi	45
3.3.3	Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi	46
3.3.4	Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Deneyleri	48
3.3.5	Böhme Aşınma Dayanımı Deneyi	49
3.3.6	Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	51
3.3.7	Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi	52
3.3.8	SEM ve EDS Analizi	54
3.3.9	XRD Analizi	54
3.4	Geopolimer Harçların Üretimi	54
3.4.1	Ön Deneme Çalışmaları	54
3.4.2	Polipropilen, Bazalt ve Poliamid Lif İçerikli Numunelerin Hazırlanışı	64
4	DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	70
4.1	Fiziksel Özellikler	70
4.1.1	Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı, Su Emme Oranı Sonuçları	70
4.2	Mekanik Özellikler	73
4.2.1	Basınç Dayanımı	73
4.2.2	Eğilme Dayanımı	75
4.2.3	Yarmada Çekme Dayanımı	79
4.2.4	Ultrasonik Geçiş Hızı	82
4.2.5	Aşınma Direnci	83
4.2.6	Yüksek Sıcaklık	84
4.3	Mikroyapı İncelemesi	92
4.3.1	SEM ve EDS Analizi	92
4.3.2	XRD Analizi	94

5 SONUÇ	97
KAYNAKÇA	98
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	113



SİMGELİSTESİ

f_r	Betonun Eğilme Dayanımı
f_c	Betonun Basınç Dayanımı
B	Doygun kuru yüzey halde tespit edilen ağırlığı
σ	Eğilme dayanımı
A	Kuru haldeki tespit edilen ağırlığı
L	Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
b	Prizma kesitinin eni
d	Prizma kesitinin yüksekliği
P	Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet
C	Su içinde tespit edilen ağırlığı

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
BZ	Bazalt
CH	Kalsiyum Hidrat
CSH	Kalsiyum Silikat Hidrat
Eşd	Eşdeğer
Gg	Gigagram
GBFS	Ground Blast Furnace Slag
GPÇ	Geleneksel Portland Çimentosu
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
KS	Kalsiyum Silikat
M	Molarite
Mt	Milyonton
NASH	Sodyum Alüminosilikat Hidrat
OPC	Geleneksel Portland Çimentosu
ÖGYFC	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
PA	Poliamid
PÇ	Portland Çimentosu
PP	Polipropilen
SEM	Scanning Electron Microscopy
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
SH	Sodyum Hidroksit
SS	Sodyum Silikat
ST	Seramik Tozu
UGH	Ultrases Geçiş Hızı
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
XRD	X-ray Powder Diffraction
WCP	Waste Ceramic Powder

CO_2	Karbondioksit
SiO_2	Silisyum Dioksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
SiO_2	Silikon Dioksit
Al_2O_3	Alüminyum Dioksit
Fe_2O_3	Demir Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
MgO	Magnezyum Oksit
SO_3	Kükürt Trioksit
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021.....	2
Şekil 1.2	Çimento üretimi kaynaklı CO ₂ emisyon miktarı	5
Şekil 1.3	Çimento üretim aşamaları	7
Şekil 1.4	Çimento üretim aşamaları	7
Şekil 2.1	Geopolimer betonun bileşenleri	10
Şekil 2.2	Geopolimerizasyon reaksiyon denklemi şematik diyagramı	12
Şekil 2.3	Geopolimerizasyon oluşum akış diyagramı	13
Şekil 2.4	Geopolimerizasyon sürecinin şematik gösterimi	15
Şekil 2.5	Geopolimerizasyon sürecinin şematik gösterimi	15
Şekil 2.6	Geopolimer yapısının şematik modeli.....	17
Şekil 3.1	Atık seramik tozuna ait görsel.....	33
Şekil 3.2	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna ait görsel	34
Şekil 3.3	Standart kuma ait görsel.....	35
Şekil 3.4	8, 10, 12 ve 14 M hazırlanan NaOH çözeltilerine ait görsel	38
Şekil 3.5	Polipropilen life ait görsel	40
Şekil 3.6	Bazalt life ait görsel.....	41
Şekil 3.7	Poliamid life ait görsel	42
Şekil 3.8	Üretilen 40×40×160 mm prizma ve 50×50×50 mm küp numuneler	43
Şekil 3.9	Üretilen 71×71×71 mm küp numunelere ait görsel.....	43
Şekil 3.10	Üretilen 100×200 mm silindir numunelere ait görsel	44
Şekil 3.11	Basınç dayanımı uygulaması.....	45

Şekil 3.12 Basınç dayanımı uygulaması.....	45
Şekil 3.13 Eğilme dayanımı uygulaması	47
Şekil 3.14 Yarmada çekme dayanımı deneyi	47
Şekil 3.15 Deney sonrası bazalt lif içerikli geopolimer harç numunesi	47
Şekil 3.16 Numunelerin etüv fırınındaki görüntüsü	48
Şekil 3.17 Numunelerin su havuzunda bekletilmesi	49
Şekil 3.18 Zımpara tozuna ait görsel	50
Şekil 3.19 Böhme aşınma dayanımı deneyi.....	50
Şekil 3.20 Böhme aşınma dayanımı deneyi.....	51
Şekil 3.21 Böhme aşınma dayanımı deneyi.....	51
Şekil 3.22 Ultrases geçiş hızı deneyi	52
Şekil 3.23 Ultrases geçiş hızı deneyi	52
Şekil 3.24 Yüksek sıcaklık fırını	53
Şekil 3.25 Fırına yerleştirilen numuneler	53
Şekil 3.26 Ön deneme karışımı mikser görüntüsü.....	55
Şekil 3.27 Ön deneme karışımı üretilen küp numuneler	56
Şekil 3.28 Etüv fırını görüntüsü	57
Şekil 3.29 8 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	60
Şekil 3.30 10 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	60
Şekil 3.31 12 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	61
Şekil 3.32 14 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	61
Şekil 3.33 8 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	62

Şekil 3.34 10 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	62
Şekil 3.35 12 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	63
Şekil 3.36 14 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları	63
Şekil 3.37 Poliamid lifli geopolimer harç numunesinin malzeme tartım aşaması	65
Şekil 3.38 Üç aşamada dökülen ve titreşim tablasında sıkıştırılan poliamid lif içerikli geopolimer harç numunesi.....	65
Şekil 3.39 Titreşim tablası üzerinde 3 aşamada dökümü yapılan numune örneği	66
Şekil 3.40 Farklı boyutlardaki geopolimer harç numuneleri	66
Şekil 3.41 Kalıptan çıkarılan numunelerden bazıları	66
Şekil 3.42 Priz alan numunelerin fırın poşeti ile etüv fırınındaki görüntüsü	66
Şekil 3.43 Nem kabiniinde bekleyen numunelerden bazıları	67
Şekil 3.44 Nem kabini görseli	68
Şekil 4.1 Üretilen geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları	71
Şekil 4.2 Üretilen geopolimer harçların boşluk oranları	71
Şekil 4.3 Üretilen geopolimer harçların su emme oranları.....	72
Şekil 4.4 Üretilen geopolimer harçların fiziksel özelliklerindeki artış oranları	72
Şekil 4.5 Su emme ve geçirimsizlik arasındaki korelasyon.....	73
Şekil 4.6 Üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları	74
Şekil 4.7 Üretilen geopolimer harçların 7. ve 28. günde basınç dayanımlarına ait artış oranları (%)	75
Şekil 4.8 Poliamid lifin köprüleme etkisine ait görseli	76
Şekil 4.9 Poliamid lif kullanılan geopolimer harç numunesine ait görsel.....	76
Şekil 4.10 Geopolimer harçların eğilme dayanımı	77
Şekil 4.11 Üretilen geopolimer harçların 7. ve 28. günde eğilme dayanımlarına ait artış oranları (%)	77

Şekil 4.12	Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon grafiği ..	78
Şekil 4.13	Polipropilen lif takviyeli numune örneği.....	70
Şekil 4.14	Geopolimer harçların yarmada çekme dayanımı sonuçları	80
Şekil 4.15	Üretilen geopolimer harçların 28. günde yarmada çekme dayanımlarına ait artış oranları (%)	81
Şekil 4.16	Yarmada çekme ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon	82
Şekil 4.17	Geopolimer harçların ultrasonik geçiş hızı	82
Şekil 4.18	Üretilen geopolimer harçların 7. ve 28. günde ultrasonik geçiş hızı değerlerine ait artış oranları (%)	83
Şekil 4.19	Geopolimer harç numunelerinin ağırlık kaybı sonuçları (%).....	84
Şekil 4.20	Yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce eğilme numuneleri	87
Şekil 4.21	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri	89
Şekil 4.22	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım kaybı oranları ..	89
Şekil 4.23	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	90
Şekil 4.24	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin eğilme dayanım kaybı oranları..	90
Şekil 4.25	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ultrasonik geçiş hızı değerleri ..	91
Şekil 4.26	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ağırlık kaybı oranları (%)	91
Şekil 4.27	Bazalt, poliamid ve polipropilen lifli numunelerin SEM görüntüleri	93
Şekil 4.28	Kontrol (a) ve bazalt lif takviyeli (b) numunelerin XRD'si.....	95
Şekil 4.29	Poliamid (c) ve polipropilen lif takviyeli numunelerin (d) XRD'si.....	96

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2021.....	2
Tablo 1.2 Çimento sektörünün CO ₂ emisyonuna katkısı	3
Tablo 1.3 Çimento sektörü emisyon miktarı.....	4
Tablo 1.4 Klinker üretimi ile açığa çıkan tahmini CO ₂ emisyonları.....	8
Tablo 1.5 Çimento üretimi için kullanılan klinker miktarı	8
Tablo 1.6 Çimento üretimi ile açığa çıkan tahmini CO ₂ emisyonları	8
Tablo 2.1 Si- birimlerinin sayısına göre farklılık gösteren geopolimer sistemler.	13
Tablo 2.2 Alkali aktivatör ve alüminosilikat kaynakları.....	14
Tablo 2.3 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu ..	21
Tablo 3.1 Atık seramik tozunun kimyasal bileşimi	33
Tablo 3.2 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.....	34
Tablo 3.3 Sodyum hidroksit kimyasal bileşimi.....	35
Tablo 3.4 Sodyum silikat kimyasal yapısı	35
Tablo 3.5 Potasyum hidroksit ve potasyum silikat kimyasal yapısı	36
Tablo 3.6 NaOH molarite hesabı	36
Tablo 3.7 NaOH molarite hesabı	37
Tablo 3.8 KOH molarite hesabı	37
Tablo 3.9 KOH molarite hesabı	38
Tablo 3.10 Akışkanlaştırıcı katkıya dair teknik özellikler	39
Tablo 3.11 Polipropilen lif özellikleri.....	39
Tablo 3.12 Bazalt lif özellikleri	40

Tablo 3.13 Poliamid lif özellikleri	41
Tablo 3.14 Harç karışım bilgileri	57
Tablo 3.15 Harç karışımlarına ait malzeme bilgileri	58
Tablo 3.16 Harç karışım bilgileri	58
Tablo 3.17 Harç karışımlarına ait malzeme bilgileri	59
Tablo 3.18 Üretimi yapılan on seriye ait malzeme bilgileri ve miktarları	68
Tablo 4.1 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı sonuçları.....	84



Farklı Tür Lifler İçeren Atık Seramik Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi

Ayşen Tahire KILIÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mücteba UYSAL

Bu araştırmada, bağlayıcı malzeme olarak atık seramik tozu (AST) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), dolgu malzemesi olarak ise standart kum kullanılarak bazalt, poliamid ve polipropilen lif takviyeli geopolimer harçlar üretilmiştir. Liflerin, bağlayıcı olarak atık seramik tozu- öğütülmüş yüksek fırın cürufu bazlı geopolimer harçlar üzerindeki etkisini araştırmak üzere mekanik, fiziksel ve mikroyapısal özelliklere yönelik deneyler yapılmıştır. Ön deney sonuçları, atık seramik tozunun %20 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile yer değiştirilmesinin, 10M sodyum hidroksit-sodyum silikat karışımı çözeltisinde ekonomik açıdan optimum karışımı sağlamasından dolayı bu karışımın araştırmada referans lif takviyesiz kontrol karışımı olarak kabul edilmesine neden olmuştur. Üretilen geopolimer harçlara lif eklenmesi sonucunda, her üç lif türü de AST-ÖGYFC bazlı geopolimer harcın basınç, eğilme ve yarmada çekme

dayanımını geliştirmiştir. Örneğin, maksimum basınç ve yarmada çekme dayanımı, poliamid lif takviyeli karışım için (sırasıyla 60,15 MPa ve 3,45 MPa) ile sonuçlanırken, maksimum eğilme dayanımı, 28. günde bazalt lif takviyeli karışım (12,98 MPa) ile sonuçlanmıştır. Bu dayanım gelişiminin kontrol karışımına göre daha fazla olması liflerin köprüleme etkisinden kaynaklanmaktadır. Lif takviyeli numunelerin tamamı referans lif takviyesiz numuneye göre aşınmaya karşı daha fazla direnç göstermiş olup, polipropilen lif takviyeli numunelerin maksimum direnç sağladığı görölmüştür. Fiziksel özellikler açısından AST-ÖGYFC bazlı geopolimer harçlara lif eklenmesi yoğunluk, boşluk oranı ve su emme açısından önemli bir etki göstermemiştir. Referans karışımla karşılaştırıldığında, sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm lif takviyeli numuneler yüksek sıcaklıklara karşı önemli derecede direnç göstermiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra tüm karışımlarda ağırlık kaybı gözlenmiştir. SEM analizi, liflerin liflerle güçlendirilmiş geopolimer harcın matrisine düzgün bir şekilde gömüldüğünü ortaya çıkarmıştır. AST-ÖYFC bazlı geopolimer harçların XRD analizinde kuvars pikler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, seramik tozu, cüruf, harç, lifler

ABSTRACT

Investigation of Mechanical and Durability Properties of Waste Ceramic Powder Based Geopolymer Mortars Containing Different Types of Fibers

Ayşen Tahire KILIÇ

Department of Civil Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Mücteba UYSAL

In this research, basalt, polyamide, and polypropylene fiber-reinforced geopolymer mortars were produced based on waste ceramic powder (WCP) and ground blast furnace slag (GBFS) by using rilm sand as filler. Experiments for mechanical, physical, and microstructural properties were carried out to investigate the impact of fibers on WCP-GBFS based geopolymer mortar. The results showed that 20% replacement of WCP with GBFS yielded the optimum and economical mixture at 10M sodium hydroxide solution and was considered as a reference unreinforced mixture in this research. In terms of adding fibers, all three types of fibers improved the compressive, flexural, and splitting tensile strength of the WCP-GBFS based geopolymer mortar. For instance, the maximum compressive and splitting tensile strength was shown by polyamide fiber-reinforced mixture (60.15 MPa and 3.45 MPa respectively) while the maximum flexural strength was shown by basalt fiber-reinforced mixture (12.98 MPa) at the age of 28 days. All reinforced samples

showed more resistance against abrasion as compared to the reference sample and maximum resistance was shown by polypropylene fiber-reinforced samples. Compared with the reference mixture, with an increase in temperature, all fiber-reinforced mixtures showed significant resistance against high temperatures. Weight loss was observed in all mixtures after exposure to high temperatures. SEM analysis revealed that fibers were properly embedded into the fiber-reinforced geopolymer mortar's matrix. Quartz peaks were detected in XRD analysis of WCP-GBFS based geopolymer mortars.

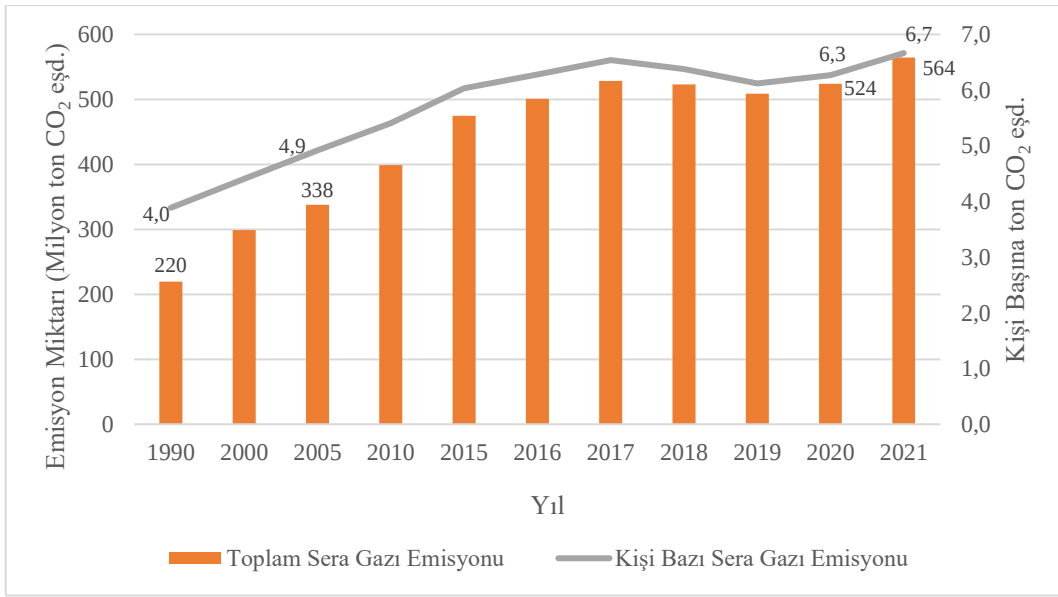
Keywords: Geopolymer, ceramic powder, slag, mortar, fibers



1.1 Genel Bakış

Geçmişten günümüze sanayi sektörünün gelişmesi ile birlikte fosil yakıtların kullanımlarının ve elektrik üretiminin artması, hava kirliliğinin etkilerinin daha fazla görülmesine sebep olmuştur. Kirleticiler sebebi ile oluşan gazların doğaya bilinçsizce salınması ile birlikte insan sağlığı tehlike altına girmekte, hayvan ve bitki tabiatları da bozulmaktadır. 1950’li yıllarda İngilterede yaklaşık olarak 6500 kişinin hava kirliliğinden dolayı yaşamını yitirmesi sonrası başta Avrupa Ülkeleri, tüm dünya hava kirliliğine engel olmak için mücadele etmeye başlamış ve konu ile ilgili teknik ve idari yaptırımlar gündemde önemli bir yer edinmiştir. Çevre bilincinin gelişim göstermesi, enerji tasarrufunun sağlanması, yasal yaptırımların artması, yanma teknolojilerinin iyileştirilmesi gibi diğer teknik gelişmelere de bağlı olarak hava kirliliği düzeylerinin başta Avrupa ülkeleri ve Amerika olmak üzere gelişmiş birçok ülkede büyük oranda kontrole alındığı, gelişmekte olan ülkelerde ise problemin çözümüne yönelik ciddi adımlar atılmakta olduğu görülmektedir (Akdemir, 2007). Sanayi sektöründen kaynaklanan florlu bileşikler, doğal sera gazları CO₂, H₂O, N₂O ve O₃, CH₄ atmosfere salınan gazlardan oluşmaktadır. Bunlardan insan yapımı olan CO₂ sera gazıdır. CO₂ atmosferin çok küçük bir kısmını kaplamaktadır. Bu gazın atmosferde kalma süresi 6 yıldır. TÜİK’in yayınladığı Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021 raporu incelendiğinde 2021 yılı toplam sera gazı emisyon değeri olan 564,4 milyon ton (Mt) bir önceki yıl 2020 toplam sera gazı emisyon değeri olan 524 milyon ton (Mt)’ a göre %7,7 artış göstermiştir. Kişi başı toplam sera gazı emisyon değeri 1990 yılında 4 ton CO₂ eşd., 2005 yılında 4,9 ton CO₂ eşd. ve 2021 yılında 6,7 ton CO₂ eşd. olarak hesaplanmıştır. Böylece 1990-2021 yılları arasında kişi başı CO₂ eşdeğer emisyonu %67,5 artış göstererek 4 tondan 6,7 tona yükselmiştir. 2021 yılında toplam sera gazı

emisyonları CO₂ eşd. sektör payları incelendiğinde emisyon değerlerinde en fazla payın %71,3 oranı ile enerji kaynaklı emisyonlardan kaynaklandığı görülmektedir. Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından kaynaklanan emisyon değerleri bu payda %13,3 oranı ile ikinci sırada, %12,8 oranı ile tarım sektörü üçüncü sırada ve %2,6 oranı ile atık sektörü dördüncü sırada yer almaktadır. Enerji sektörü kaynaklı emisyon değerlerine bakıldığında 2021 yılında 402,5 Mt CO₂ olan emisyon değeri, 1990 yılı emisyon değeri 139,5 Mt CO₂ 'a göre %188,4 artış göstermiştir. Bir önceki yıl 2020 yılı değeri olan 366,6 Mt CO₂ değerine göre ise %9,8 artış göstermiştir (TÜİK, 2023 ve Kara vd., 2018).



Şekil 1.1 Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonu, 1990-2021 (TÜİK, 2023)

Tablo 1.1 Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2021 (milyon ton CO₂ eşd.) (TÜİK, 2023)

Yıl	1990	2000	2010	2015	2020	2021	1990-2021 değişim (%)	2020-2021 değişim (%)
Toplam Emisyon	219,5	298,9	398,8	475,0	524,0	564,4	157,1	7,7
Enerji	139,5	216,0	287,9	342,0	366,6	402,5	188,4	9,8

Tablo 1.1 Sektörlere göre sera gazı emisyonları, 1990-2021 (Milyon ton CO₂ eşd.) (TÜİK, 2023) (devamı)

Yıl	1990	2000	2010	2015	2020	2021	1990- 2021 değişim (%)	2020- 2021 değişim (%)
Endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı	22,9	26,2	49,1	59,7	68,0	75,1	228,7	10,6
Tarım	46,1	42,3	44,4	56,1	73,2	72,1	56,5	-1,5
Atık	11,1	14,3	17,4	17,1	16,3	14,7	32,6	-9,9

Bağlayıcısı portland çimentosu olan beton, inşaat sektöründe en fazla kullanılan malzemedir. Portland çimentosunun (PÇ) üretim aşamalarından biri olan fosil yakıtın yanması ve kireçtaşı kalsinasyonu sebebi ile açığa çıkan CO₂, NO₂ ve SO₂ gibi zararlı gazlar ve farklı tozlar doğaya salınmaktadır. PÇ üretimi, çevrede oluşturduğu zararlı etkilerine ek olarak çelik ve alüminyumdan sonra ciddi seviyede enerji gerektiren aşamalar içermektedir (Antoni ve Hardjito, 2015).

TÜİK 2012 sera gazı emisyon envanterine göre 2012 yılında endüstriyel işlemlerden kaynaklı meydana gelen CO₂ emisyonunun %54,4'ü çimento sektörü kaynaklıdır (TÜİK, 2012:56).

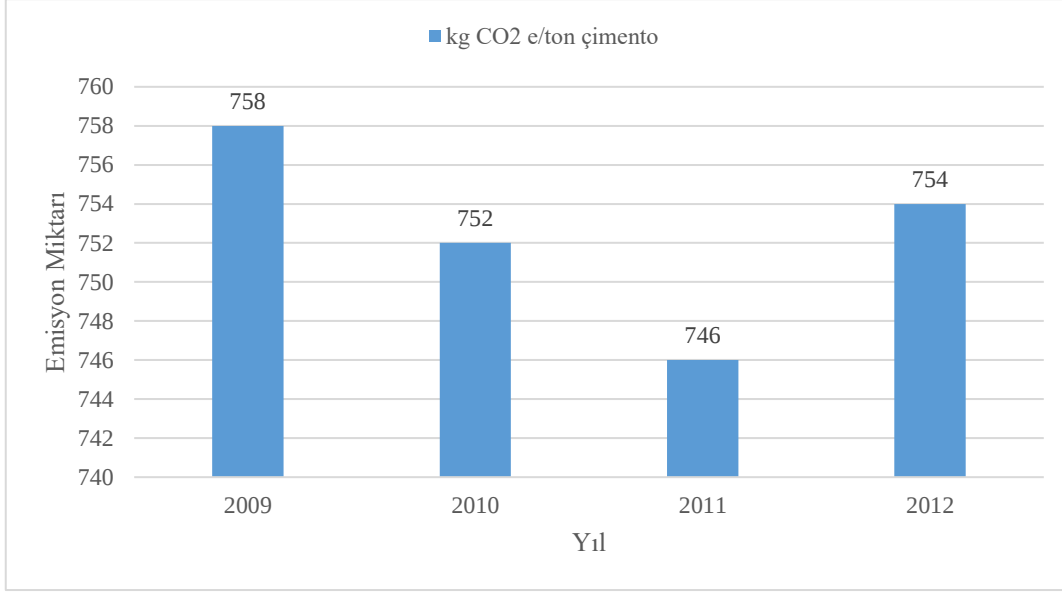
Tablo 1.2 Çimento sektörünün CO₂ emisyonuna katkısı (TÜİK, 2012:56)

Yıllar	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Yüzde %	71,9	76	81,9	81,4	59	56,6	54,4

Teknolojik olarak 1 ton çimento üretim sürecinde yaklaşık olarak 700-760 kg arasında CO₂ eşdeğeri emisyon meydana gelmektedir. Akçansa çimento firmasına ait sürdürülebilirlik raporu incelendiğinde 2013 yılına ait çimento üretimi kaynaklı ortalama olarak 759 kg/ton emisyon meydana geldiği raporlanmıştır (AKÇANSA, 2013:41). ÇİMSA çimento firması 2013 yılı sürdürülebilirlik raporuna bakıldığında ise çimento üretimi kaynaklı ortalama olarak 732 kg/ton emisyon meydana geldiği raporlanmıştır (ÇİMSA, 2013:30 ve BSTB).

Tablo 1.3 Çimento sektörü emisyon miktarı (BSTB, 2015:1 ve Konya Çimento, 2022)

Yıllar	Yıllık Çimento Üretim Miktarı (Milyon Ton)	1 Ton Çimento Ortalama Emisyon Miktarı	Yaklaşık Yıllık Toplam Emisyon Miktarı (Milyon Ton)
2000	35,95	0,74	26,60
2005	42,79	0,74	31,66
2010	62,73	0,74	46,40
2015	72,68	0,74	53,78
2017	80,55	0,74	59,60
2018	72,54	0,74	53,67
2019	56,97	0,74	42,15
2020	72,29	0,74	53,49
2021	78,94	0,74	58,41



Şekil 1.2 Çimento üretimi kaynaklı CO₂ emisyon miktarı (AKÇANSA, 2013:41)

Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının yayınladığı çimento sektör raporuna (2015-1) göre 2015 yılında toplam olarak 72,68 Mt çimento üretimi gerçekleşmiştir. Bu üretimden kaynaklanan yaklaşık olarak 53,78 milyon ton emisyon salınımı gerçekleştiği hesaplanmıştır (BTSSB, 2015:1).

Konya Çimento 2021 yılına ait faaliyet raporu incelendiğinde 2021 yılında toplam 78,94 milyon ton çimento üretimi gerçekleşmiş ve bu üretim sonucunda 53,49 milyon ton emisyon salınımı gerçekleşerek bir önceki yıla göre çimento üretimi, emisyon salınımı %9,19 artış göstermiştir (Konya Çimento, 2022).

Çimento üretim sürecini genel itibari ile 4 aşama oluşturmaktadır. Bu aşamaları üretim safhası olarak adlandırabiliriz.

1. Aşama Hammadde Hazırlama

Çimento, ana malzeme olarak kireçtaşı ve kil kullanılarak üretilmektedir. Kireçtaşı ve kilin malzeme boyutlarını küçültmek için patlama işlemi yapılmaktadır. Patlama işlemi yapıldıktan sonra boyutları küçültülen kalker ve kil kamyonlarla kırıcı ünitesine taşınmaktadır (UCBAD, 2018).

2. Aşama Farin Değirmeninde Hammadde Karışımı

Kırıcı ünitesinde kırılan malzemeler türlerine göre ayrılmaktadır. Alçıtaşı, tras, kalker boksit vb. gibi malzemeler çeşitlerine göre sınıflandırıldıktan sonra çimento

değirmenlerine gönderilmektedir. Kil, demir cevheri vb. gibi tehlike arz etmeyen atık malzemeler ise farin değirmenlerine aktarılmaktadır. Malzemeler toz haline farin değirmenlerinde getirilmektedir. Bu toz malzemeye farin adı verilmektedir. Çimentonun ana hammaddesi olan kaliteli bir klinker üretimi için farin ciddi derecede öneme sahiptir (UCBAD, 2018).

3. Aşama Döner Fırında Pişirme

Kil ve kalkerden oluşan klinker, döner fırınlarda pişirilerek üretilmektedir. Sıcaklık, meydana gelen reaksiyonlar sonrasında 1500-1600 C° 'ye kadar çıkmaktadır. Özellikle çimento üretim sürecinin bu aşamasında kil ile kalsine edilen kalkerin fazlaca sera gazı emisyonu oluşturduğu bilinmektedir (Hienola vd, 2017). Fırın içerisinde yakılan malzemelerin erimesi ile malzemeler birbirleriyle temas ederek klinker parçacıklarını oluşturmaktadır. Oluşan klinker parçacıkları daha sonra soğutma ünitesine konularak hava vasıtası ile soğutulmaktadır. Soğuyan klinker parçacıkları istenilen dereceye eriştikten sonra klinker silosunda depolanmaktadır (UCBAD,2018).

4. Aşama Çimento Değirmeninde Öğütme

Klinker, alçıtaşı ve kalkerin roller presle bir ön öğütme işlemi gerçekleştirildikten sonra klinker, alçıtaşı ve kalker bilyalı değirmenlere gönderilir. Çimento üretimindeki son aşama, bilyalı değirmenler içerisinde bulunan metal toplar vasıtası ile klinker parçalarını ve alçıyı ezip toz haline dönüştüren bilyalı çimento değirmenidir. Silolarda depolanan çimento iki kısma ayrılmaktadır. Bunlar dökme çimento ve paketlemedir. Paketlenen çimentolar satışa sunulmak üzere 50 kg'lık torbalarda saklanmaktadır. Silolardan tankerlere yüklenen dökme çimento ise inşaat alanına sevk edilmektedir (UCBAD,2018).

Çimento üretim sürecine bakıldığında 1., 2. ve 4. aşamalar yüksek miktarda elektrik tüketiminin meydana geldiği aşamalardır. Klinker üretimi olan 3. aşamada ise kömür, fuel-oil, doğal gaz vb. gibi yakıtların kullanılmasından dolayı, üretim sürecindeki toplam enerji tüketiminin yaklaşık olarak %70-80'inin gerçekleştiği aşama olmaktadır (Worrell vd., 2001:306).

Konya’da bulunan bir çimento fabrikasına ait klinker üretim miktarı tablosu Tablo 1.5’ te ve klinker üretimi sonucunda oluşan çimento üretimi kaynaklı tahmini CO₂ Emisyonları ton/Gg olarak verilmiştir (UCBAD, 2018).

Tablo 1.4 Klinker üretimi ile açığa çıkan tahmini CO₂ emisyonları

Klinker Türü	Üretilen Klinker Kütlesi (ton)	Klinker İçin Emisyon Faktörü (ton CO₂/ton klinker)	CO₂ Emisyonu (ton)	CO₂ Emisyonu (Gg)
Klinker	1.425.000	0,525	748.125	748,125

Tablo 1.5 Çimento üretimi için kullanılan klinker miktarı

Üretilen Çimento Türü	Çimento Üretimi (ton)	Çimentoda Klinker Fraksiyonu	Üretilen Çimento Türünde Klinker Kütlesi (ton)
Portland	2.397.600	0,78	1.870.128

Tablo 1.6 Çimento üretimi ile açığa çıkan tahmini CO₂ emisyonları

Üretilen Çimento Türünde Klinker Kütlesi (ton)	1.870.128
Klinker Tüketim (ton)	1.459.099
Klinker İhracatı (ton)	8.798
Klinker Kütlesi (ton)	419.827
Klinker İçin Emisyon Faktörü (ton CO₂/ton klinker)	0,525
CO₂ Emisyonu (ton)	220.409,175
CO₂ Emisyonu (Gg)	220,409

Çimento fabrikası verilerine dayanarak, klinker üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonunun 748.125 ton CO₂ olduğu hesaplanmıştır. Çimento üretiminde ise açığa çıkan 220.409,175 ton CO₂ emisyonu hesaplanmıştır.

Klinker üretimi sırasında doğrudan kalsinasyon aşamasında açığa çıkan CO₂ emisyonu, çimentonun üretimi sırasında açığa çıkan emisyonların %50'sinden sorumludur. Geriye kalan %50'lik payı oluşturan emisyonların birçoğu, kalsinasyon için gerekli olan fosil yakıtların yakılması ve buna ilaveten hafriyat aşaması yani ham maddenin elde edilmesi, paketlenmesi ve öğütülmesi işlemlerinden meydana gelmektedir. İklim değişikliğinin tehlikeli etkilerini en aza indirmek dolayısı ile CO₂ emisyonlarının azaltılması amacıyla küresel anlamda ortak bir gayret gösterilmesi gereklidir (Hienola vd., 2017).

Çimento firmalarının yayınladığı CO₂ emisyon raporları incelendiğinde çimento üretim sürecinde ciddi miktarda açığa çıkan CO₂ emisyonunu düşürmek için çimentolu betona alternatif çimentosuz beton olan geopolimer beton üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Çimentosuz beton olan geopolimer beton portland çimentolu betona kıyasla, betonun karbonunu ve gömülü enerjiyi ciddi oranda azaltmasına ek olarak, uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi endüstri sektörü yan ürünlerinden faydalananarak inşaat sektöründe sürdürülebilirliğin artırılmasında önemli oranda pay sahibidir. Fakat geopolimer betonun çevre dostu-yeşil beton olarak adlandırılmasından önce geopolimer beton ile ilişkili olan diğer önemli çevresel faktörlerin de detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Örnek verilecek olursa, her gün üretimi gerçekleştirilen büyük miktardaki beton atıklarıyla mücadele etmek, son 30 yılda yapılan araştırmaların en önemli konusunu oluşturmuştur. Dünya genelinde ortaya çıkan toplam atık miktarına bakıldığında atık miktarının büyük bir kısmının yalnızca beton üretimi kaynaklı olduğu görülmekte olup bazı ülkelerde ortaya çıkan toplam atık miktarının yaklaşık olarak %40'ını, beton üretimi kaynaklı atıklar tek başına oluşturmaktadır (Coelho ve Brito,2012; Oikonomou, 2005).

Turner ve Collins 2013 yılında yaptıkları çalışma sayesinde, normal dayanımlı betonlar için alkali aktivatörü sodyum silikat olan geopolimer betonun üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonunun, bağlayıcısı portland çimentosu olan beton üretiminde açığa çıkan CO₂ emisyonuna göre %9 daha az olduğunu göstermiştir (Turner ve Collins, 2013).

2 GEOPOLİMERLER

2.1 Geopolimer

Geopolimer beton, bileşenlerinden en az birisinin atık malzeme olarak kabul edilen ürünlerin kullanımı ile üretilen veya üretim aşamasında çevreye zarar vermeyen çimentosuz beton olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda yüksek performans ve uzun süreli kullanım ömrüne sahiptir. Farklı bir şekilde ifade etmek gerekirse geopolimer beton çevre dostu bir malzeme olup, sürdürülebilirlik aşamasında: çevresel, sosyal ve ekonomik etkileri de olan bir malzemedir (Suhendro, 2014).

Geopolimerler, kireç ve normal portland çimentosundan sonra üçüncü nesil çimento olarak kabul edilmektedir. Geopolimer genellikle "inorganik polimerler", "alkali ile aktive edilmiş çimentolar", "geocementler", "alkali- bağlı seramikler", "hidroseramik" şeklinde farklı isimler ile isimlendirilir. Bu farklı isimlendirmelere rağmen, bu terimlerin hepsi benzer kimyasal maddelerden açığa çıkan malzemeleri tanımlamaktadır (Singh vd., 2015).

Geopolimer betonun bileşenlerini bağlayıcı bir malzeme, aktivatör malzemeleri, agregalar ve betonun kullanım türüne göre gerekli duyulan katkı malzemeleri oluşturur. Geopolimer betonu oluşturan bileşenleri ve en fazla kullanılan bazı malzeme türleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Chowdhury vd., 2020).

Geopolimer Beton				
Çimentolu Malzeme (Uçucu Kül, YFC , Metakaolin , Silis Dumanı)	Alkali Aktivatör (NaOH, KOH,Na ₂ SiO ₃)	Kaba Agregalar	İnce Agregalar	Katkılar Geciktiriciler (BaCL ₂ .2H ₂ O) Süperplastikleştiriciler (Sülfonlanmış Melanin Formaldehit)

Şekil 2.1 Geopolimer betonun bileşenleri (Chowdhury vd, 2020)

Yüksek miktarda alümino-silikat içeren malzemelerin inorganik polimer karışım oluşturulması şartıyla alkali aktivatörler ile tepkimesi sonucunda meydana gelen malzemeler geopolimer bağlayıcılardır. Alümino silikat kaynağı olarak erişilebilir olmaları ve düşük maliyetleri nedeni ile YFC, uçucu kül (UK), silis dumanı vb. gibi endüstriyel atıklar çokça kullanılmaktadır. Geopolimer bağlayıcılar içeriğinde farklı endüstriyel atıkların kullanılması ile birlikte PÇ'ye göre çevreye salınan CO₂ emisyon miktarını yaklaşık olarak %80 oranında azaltabilmektedir. (Castel ve Foster 2014). Ayrıca yüksek basınç ve eğilme dayanımı, düşük büzülme, yüksek asit direnci vb. gibi yüksek düzeyde gösterdiği mekanik özellikler sebebi ile avantajlar sağlamaktadır. Alkali çözeltiler (Na,K) betonda kullanıldığında betona zarar vermesine rağmen, ilk olarak 1940'ta hidratasyon ürünlerinin işlemlerini kolaylaştırılmasının keşfedilmesi sebebi ile geçmişten bu yana araştırılmaya değer bir malzeme olarak görülmüştür (Al Muhit vd., 2013). Fakat geçtiğimiz yıllarda konu ile ilgili çalışmaların artış göstermesi, geopolimer adı verilen ve polimerizasyon süreci ile meydana gelen bu malzeme, silis tozları veya silika alüminat, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. gibi malzemeler ile konsantre alkalın çözeltilerinin (KOH, NaOH) kimyasal reaksiyona girmesi ile ortaya çıkan yeni nesil bağlayıcı olarak tanımlanabilmektedir (Fleuryvd, 2017).

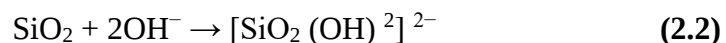
Geopolimer üretiminde, açığa çıkan CO₂ emisyon değerinin düşük olması ve enerji tüketiminin düşük olması sebebi ile ana sürdürülebilirlik kriterlerine uygun bir şekilde üretim gerçekleştirilmektedir. Geopolimer bu sebeple bazı uygulamalar için geleneksel portland çimentosu (GPC) yerine tercih edilerek alternatif bir bağlayıcı konumuna gelmiştir. Geopolimerlerin alkali çözünür alüminyum silikattan yapılmış ve üç boyutlu Si-O-Al çerçeveye sahip inorganik bir malzeme olması inşaat malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Liew vd., 2017).

2.2 Geopolimer Kimyası

Geopolimer, fırınlanan kil içerisinde bulunan alüminatlar ile silikatların oksijen atomunun elektronlarını paylaşması sonucunda kovalent bağlı bileşik oluşturması kimyasal reaksiyonuna dayanmaktadır. Silikat (SiO₂) minarelleri oldukça kararlı bileşikler olmasına rağmen alkali aktifleştiriciler, silikat (SiO₂) monomerlerinin ağ yapısındaki bağları zayıflatarak tepkimenin ileri safhalarında geopolimerin ana bileşiği olan Si-O-Al ürünlerinin oluşumunu sağlamaktadır (Zeybek, 2009).

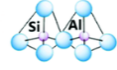
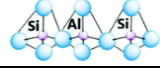
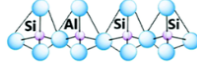
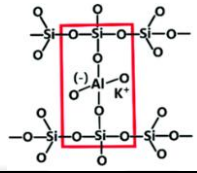
$$\begin{array}{ccc}
 n(\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2\text{O}_2) + 2n\text{SiO}_2 + 4n\text{H}_2\text{O} & \xrightarrow{\text{NaOH, KOH}} & n(\text{OH})_3\text{-Si-O-Al}^{(-)}\text{-O-Si-(OH)}_3 \\
 & & | \\
 & & (\text{OH})_2 \\
 \\
 n(\text{OH})_3\text{-Si-O-Al}^{(-)}\text{-O-Si-(OH)}_3 & \xrightarrow{\text{NaOH, KOH}} & (\text{Na, K})^{(+)}\text{-(Si-O-Al}^{(-)}\text{-O-Si-O-)} + 4n\text{H}_2\text{O} \\
 | & & | \quad | \quad | \\
 (\text{OH})_2 & & \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \\
 & & | \quad | \quad |
 \end{array}$$

Geopolimer oluşumu sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyon incelendiğinde, alkali hidroksit bileşiği (KOH, NaOH vb.) ve alümina silikat (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) bileşiğinin biraraya gelmesi ile alüminyum-silikon hidrolizi oluşmakta (Denklem 2.1) ve sonucunda da çözünme (Denklem 2.2) meydana geldiği görülmektedir (Çınar vd., 2022).

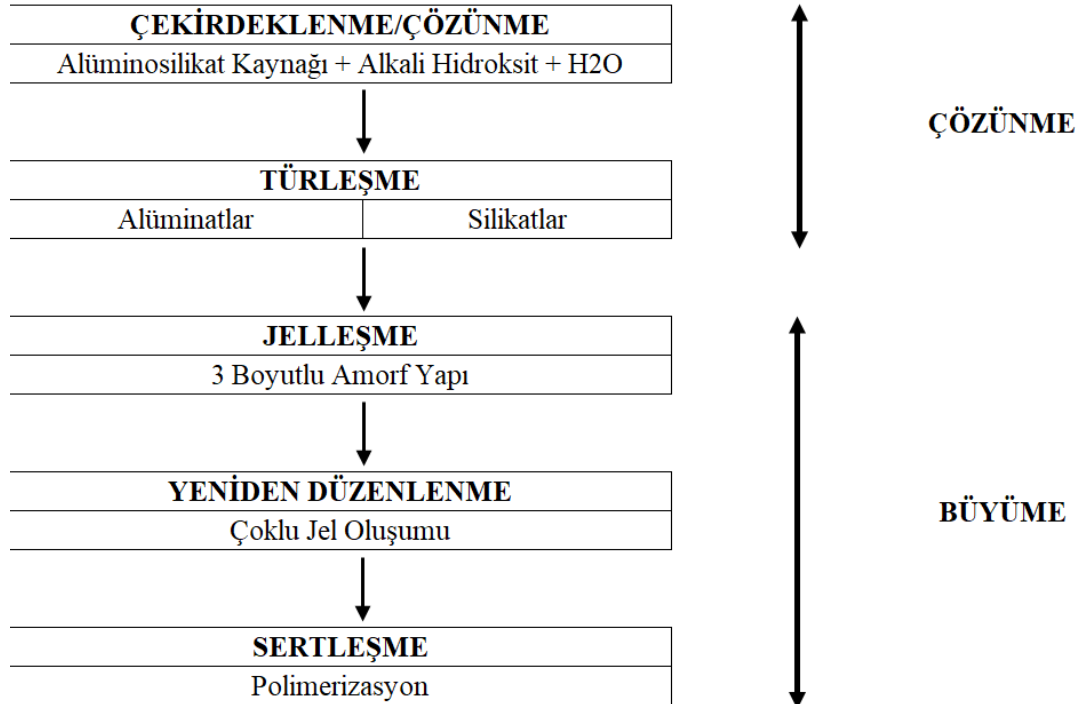


Geopolimer yapısı genellikle Si/Al molar oranına dayanmakta olup kimyasal yapılarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Yun-Ming vd. 2016).

Tablo 2.1 Siloksi Si - birimlerinin sayısına göre farklılık gösteren geopolimer sistemler (Yun-Ming vd. 2016).

Si/Al	1	Poli (sialat)	
Si/Al	2	Poli (sialat-silokso)	
Si/Al	3	Poli (sialat disilokso)	
Si/Al	>3	Sialat bağlantısı	

Geopolimer reaksiyon mekanizması net bir şekilde anlaşılmamakla birlikte (Swanepoel vd. 2002) geopolimerizasyon reaksiyonundaki aşamalar çözünme/çekirdeklenme, yeniden düzenlenme (çoklu jel oluşumu) veya organize olma, yoğunlaşma ve polimerizasyon şeklinde sıralanabilmektedir. Geopolimerizasyon oluşum akış diyagramı Şekil 2.3'te özetlenmiştir.



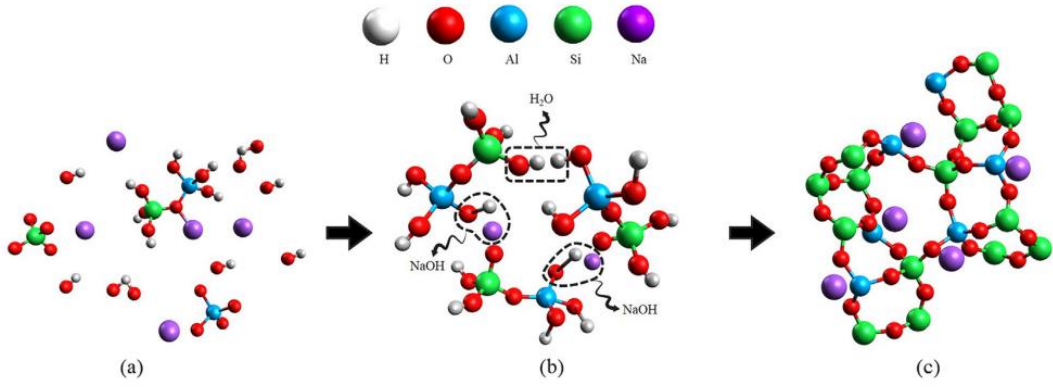
Şekil 2.3 Geopolimerizasyon oluşum akış diyagramı

Alüminosilikat kaynağı malzemelerde (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) bulunan alümina ilk önce alkalın aktivatörleri (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit vb.) tarafından indüklenerek alüminosilikat jelini oluşturur. Oluşum için gerekli olan bu iki bileşen grubuna ait bazı malzemeler Tablo 2.2’ de verilmiştir.

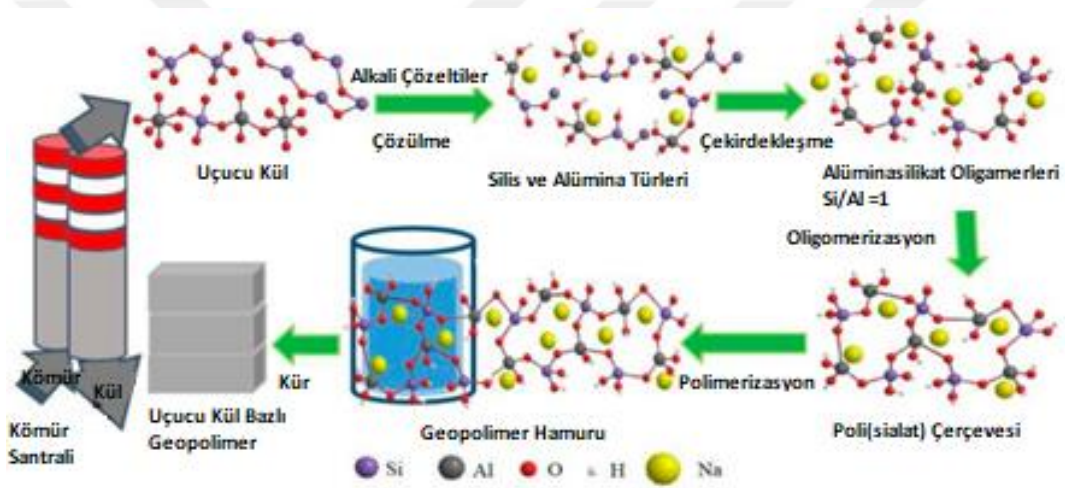
Tablo 2.2 Alkali aktivatör ve alüminosilikat kaynakları (Singh & Middendorf, 2020; Amran, vd., 2020)

Alüminosilikat Kaynağı	Alkali Aktivatörler
Uçucu Kül	Sodyum Hidroksit (NaOH)
Yüksek Fırın Cürufu	Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)
Metakaolin	Potasyum Hidroksit (KOH)
Palm Yağı Külü	Potasyum Silikat (K_2SiO_3)
Pirinç Çeltiği Külü	Kalsiyum Hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
Silis Dumanı	

Alkali alüminosilikat reaksiyonu yapısının 3 boyutlu ve amorf olması, yeniden düzenlenen jel oluşumunu başlatır. Çözünme ve yeniden düzenlenme birden fazla oligomer formu oluşturmaktadır. Oligomerlerin bağlanması ile büyük polimer zincirleri oluşmaktadır. Oligomerlerin bağlanması sırasında bir oksijen atomunu OH grupları ile paylaşarak suyu serbest bırakmaktadır. Geopolimerizasyon sürecinin gösterildiği şemalar Şekil 2.4 ve 2.5’te bulunmaktadır.



Şekil 2.4 Geopolimerizasyon sürecinin şematik gösterimi: (a) alüminosilikatın yeniden düzenlenmesi, (b) oligomerlerin yoğunlaşması sonucu jel oluşumu ve (c) polimerizasyon (Singh & Middendorf, 2020; Amran, vd.,2020)



Şekil 2.5 Geopolimerizasyon sürecinin şematik gösterimi (Singh, 2018)

Geopolimer oluşum süreçlerinden olan sertleşme sürecine girildiğinde ise bu süreci etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Alkali çözeltinin bileşimi, malzeme kombinasyonları vb. gibi karışım faktörlerinin yanı sıra kür sıcaklığının da etkisi önemli faktörler arasındadır. Kür sıcaklığının artması beton priz süresinde kısaltmaya sebep olmaktadır (Abdulkareem vd., 2014).

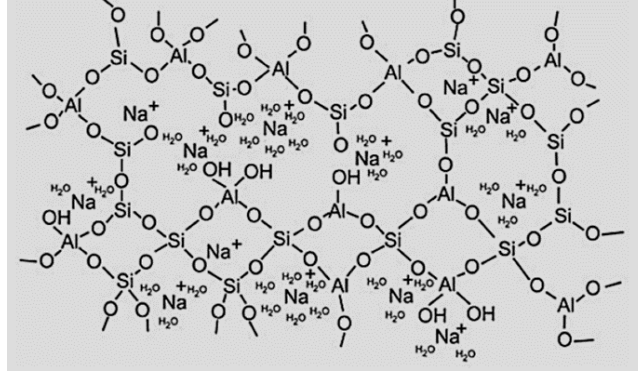
Yapılan çalışmada kür sıcaklığı ile polimerizasyon süresi arasında ters ilişki olduğu gösterilmiştir. Kür sıcaklığının artması polimerizasyon süresini azalttığı ve betonun 3-4 saatlik kürlenmesi ile dayanımının %70'ine ulaştığı tespit edilmiştir (Duan vd., 2017a).

Genellikle geopolimerizasyon reaksiyonu, kürleme süresinin ve kürleme sıcaklığının (90 °C'ye kadar) artması ile artmaktadır. Alkali konsantrasyonlarının

yüksek olması geopolimerizasyonu arttırmaktadır. Kullanılan alkalilerin türü, süreci etkileyen farklı bir parametre olmaktadır. H_2O/Na_2O , su/geopolimer, Na_2O/SiO_2 oranlarının artmasıyla, basınç dayanımında düşüşler meydana gelmektedir. Bu durum, gerçekleşen geopolimerizasyonun az olduğu bilgisini içermektedir. Geopolimerizasyon sürecine etki eden faktörlerden birkaçı aşağıda sıralanmaktadır (Singh, 2018);

- Alüminosilikat içeren hammaddenin türleri
- Katı halde bulunan hammaddelerin yüzey alanı
- Hammadede bulunan camsı faz içeriği
- Alüminyum ve reaktif silikon miktarları
- Uçucu küldeki demir, kalsiyum ve inert partiküllerin varlığı
- Kütleme sıcaklığı ve basıncı
- Kütleme süresi
- Kütleme türü (geleneksel ısıtma veya mikrodalga ısıtma)
- Alkalinin türü ve konsantrasyonu
- Alkali sıvı / hammadde oranı
- H_2O / Na_2O molar oranı
- Su / geopolimer katı oranı

Geopolimerizasyon işlemi sırasında, alümino-silikat esaslı malzemeler ile alkali polisialatları arasında geliştirilen kimyasal reaksiyon, Si-O-Al-O- bağından oluşan 3-D polimerik zincirli ve halka-benzeri yapının gelişmesine sebep olur (Duxson vd.,2007; Divya ve Rubina, 2007). Alüminosilikatlar, alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) açısından zengin olup yer kabuğunda bol miktarda bulunmaktadır. Alüminosilikatlar, bağlayıcı sistemde Al^{+3} ve Si^4 iyonlarının önemli bir kaynağı olarak geopolimer oluşumuna ciddi katkıları bulunmaktadır (Yun-Ming vd., 2016).



Şekil 2.6 Geopolimer yapısının şematik modeli (Barbosa vd. ve Rowels vd.)

Geopolimer kimyasal yapı örneklerine bakıldığında büyük bir çoğunluğu organik polimer sistemlerine benzer boyutsal yapılara sahip ve şekil itibari ile biçimsizdir. Geopolimer üretiminde kullanılan yüksek fırın cürufu kalsiyum açısından oldukça zengin olup çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan ürün olan C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) jelinin oluşmasındaki rolü oldukça fazladır. Geopolimerler, üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan SiO_2 içeriği zengin toz bağlayıcı, kullanılan aktivatörün çeşidi ve işleme koşullarına da bağlı olarak kimyasallara karşı daha fazla dayanma gücü göstermektedir. Geopolimerler, 1000 ile 1200 °C arasındaki sıcaklık değerlerine karşı, iç yapılarına herhangi bir zarar vermeden yüksek sıcaklık değerlerine dayanmakta, alkali olarak düşük değerler sergilemekte, ve genleşme, sülfat direnci ve korozyon direncine karşı yüksek dayanıklılık sergilemektedir (Erdoğan, 2014).

Geopolimerde SiO_2 oranı fazla miktarda bulunan endüstriyel veya farklı atıkların kullanılmasının, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırması, inşaat maliyetlerini azaltması, açığa çıkan CO_2 emisyonlarını azaltması ve doğaya salınan kirleticileri kolay bir şekilde ortadan kaldırması vb. gibi çevresel avantajlarının olması yönüyle oldukça fazla faydası bulunmaktadır (Al Muhit vd., 2013; Thomas, 2018).

2.3 Geopolimer Tarihi

1940'ta geopolimer tarihi açısından oldukça önemli bir makalesi yayınlanan Shi vd. (2011) yapısal uygulama öncüleri üzerine detaylı araştırmalar gerçekleştirmiştir. Sonucunda, cürufun alkali aktivasyonu ile üretilen betonun, normal portland çimentosu (GPC) ile üretilen betona göre daha yüksek mekanik özelliklere ve daha

düşük su geçirgenliğine sahip olabileceğini göstermiştir. Glukhovsky (1994) 1950'li yıllarda portland çimento betonuna alternatif bir beton bulmak için eski uygarlık yapılarında kullanılan beton içeriğini araştırmaya başlamıştır. Araştırma sonucunda, eski yapılarda kullanılan çimento türlerinin yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasının nedeninin genellikle çimento içeriğindeki düşük kalsiyum içeriği ve yüksek alkali, Al ve Si içeriğinden kaynaklanabileceğini fark etmiştir. Alkali içeriğine sahip endüstriyel atıklardan elde edilen çözeltilerle farklı cüruf formlarını bir araya getiren "toprak çimentosu" adlı bir bağlayıcı geliştirmiştir. Bu tarih itibari ile alkali aktif malzemelerle ilgili araştırmalar çeşitlenmiş ve konu ile ilgili farklı gelişmeler ön plana çıkmıştır. Glukhovsky'nin icadı 1960'larda birçok farklı uygulamalara öncülük etmiştir.

Joseph Davidovits 1970'lerin sonlarına doğru, bir alüminosilikat tozunun bir alkali çözelti ile reaksiyona girmesiyle malzemeler geliştirmiştir (Davidovits 1982; 1991). Reaksiyon sonucu oluşan bu malzemeye "Geopolimer" adını vererek bu ürünün patentini almış ve "Pirament, Geopolisem ve Geopolimit" gibi yeni ticari ürünler geliştirmiştir (Davidovits 1994). Mühendisliğe farklı konulardaki faydaları nedeniyle, alkali ile aktif hale getirilen sistemler üzerine yapılan çalışmalar, 1980'lerden bu yana dünya genelinde artmaya başlamıştır. 1980'i takip eden yıllarda tüm dünyada konu ile ilgili çeşitli etkinlikler ve konferanslar düzenlenmiştir (Krivenko 1994).

2.4 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Bu bölüm, geopolimer üretiminde kullanılan malzemelerden olan agrega, atık seramik tozu (AST), granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), NaOH-sodyum hidroksit (SH), KOH-potasyum hidroksit, Na₂SiO₃-sodyum silikat (SS) ve K₂O₃Si-potasyum silikat (KS) malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgiler içermektedir.

2.4.1 Agrega

Beton üretiminde kullanılan ana malzemeleri; çimento, su, ince ve kaba agrega karışımı olarak sıralayabiliriz. Agrega beton hacminin yaklaşık olarak %70 ini oluşturmakta olup küresel ölçekte agrega tüketimine bakıldığında yılda 8-12 milyon ton doğal agrega tüketildiği saptanmıştır (Devi ve Gnanavel, 2014).

Üretimde kullanılan agrega, kaba ve ince agrega olarak sınıflandırılmaktadır. Kaba agrega parçacık boyutu 4,75 mm veya daha fazlası, ince agrega ise parçacık boyutu 4,75 mm'den daha az olarak tanımlanmıştır (Dash vd, 2016). İnce ve kaba agrega yerine çeşitli atık malzemelerin kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Çakıl, kum, kırmataş v.b gibi agregalar genellikle bağlayıcı bir malzeme ve su ile birleşerek beton üretimi için kullanılmaktadır. Agregalar betonun hacimsel olarak yaklaşık %60-80 ini kaplamaktadır. Betonda hacimsel olarak ciddi bir yer kaplayan agregaların bu sebeple betonda kullanılmadan önce bütün özelliklerinin iyi tayin edilmesi gerekmektedir. Agregalar, beton dayanım ve durabilitesi açısından oldukça önem arz ettiğinden betonda kullanılan agregaların sağlam ve dayanıklı olması, su içerisinde yumuşayıp dağılmaması gerektirmektedir. Ek olarak betonarmede kullanılması nedeniyle su kaynaklı donatı çeliğine zarar verecek bir durum oluşmamasına dikkat edilmelidir (Deli, 2007).

Tenn vd. (2015) agrega içeriğinin geopolimer bağlayıcı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda agregaların reaksiyona dâhil edilmesinin malzemelerin özelliklerini değiştirdiği sonucuna varmıştır. Bu durum bağlayıcılar ve agregalar arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşmuştur. Agregalar ile bağlayıcı arasında oluşan boşluklar ve agregaların pürüzlülüğü gibi aderansı etkileyen çeşitli nedenlerle (Jahromi, 2009); ara yüzeydeki kimyasal bileşim (Bagampadde vd., 2006), etkilenmiştir.

Literatürde, geopolimer üretiminde çeşitli agrega türlerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Rovnanik ve Safrankova' a (Rovnanik ve Safrankova, 2016) ait olan bu çalışmalardan biri içeriğinde seramik kırıntısı tipi agrega bulunan geopolimerlerin termal davranışının incelenmesi üzerinedir. Çalışma sonucunda geopolimerde kullanılan seramik kırıntısı tipi agreganın termal performans açısından potif yönde etkili olduğu fakat mekanik performans açısından negatif yönde etkili olduğu görülmüştür.

Mermerdaş vd. nehir kumu, kırılmış kireçtaşı vb. gibi farklı türdeki agregaların geopolimer harçlar üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada nehir kumu ile ürettikleri geopolimer harçlarda daha yüksek akışkanlık gözlemlenmişler ancak kırma kireçtaşı ile ürettikleri geopolimer harçlarda ise yüksek basınç dayanımı ve yüksek yarmada çekme dayanımı elde edildiğini göstermişlerdir.

Mohseni vd., yoğunluğu düşük olan ve skorya kayasından elde ettikleri agregâ ile agregâ olarak doğal kumun kullanılması ile üretilen geopolimer harçların özelliklerini inceledikleri çalışmada, skorya agregâsına %20 oranında doğal kum ikamesinin yapılması ile üretilen geopolimer harçların düşük seviyede dayanıklılık özellikleri gösterdiği sonucuna ulaşmıştır.

Ekmen vd. ise, geopolimer harçların taze haldeki ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerine yaptıkları çalışmalarda geopolimer üretiminde agregâ seçimi olarak %35 oranında doğal kum yerine pomza agregâsı kullanıldığında pomza agregâsı ile matris fazı arasında karmaşık bir etkileşim olduğunu göstermişlerdir.

Li vd. geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerine yaptıkları bir çalışmada agregâ olarak standart ve çeşitli tane büyüklüklerine sahip nehir kumu kullanılan geopolimer harçta agregâ tane boyutunun geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin oldukça büyük bir öneme sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

2.4.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Cüruflar, kalsiyum-magnezyum, alümino-silikat camdan oluşan pik demir üretiminin sonucunda oluşan atık bir üründür. Cürufların yapıları, özellikleri ve kimyasal bileşimleri, hammaddelere ve endüstriyel sürece göre değişmektedir (Bakharev, 2000). Cüruflar içerisinde en sık kullanılanı yüksek fırın cürufu olmaktadır. ASTM standardı kapsamında, yüksek fırın cürufu esas olarak demir ile erimiş bir durumda yüksek dereceli bir fırın içinde üretilen kalsiyum silikatlar ve kalsiyum aluminosilikatlardan oluşan metalik olmayan bir atık üründür (ASTM C989-99, 2003). Öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), camsı bir malzeme olan granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC) üretimi için eritilen yüksek fırın cürufunun söndürölerek toz haline getirilmesi sonucunda elde edilmektedir (Aygörmez, 2018).

Yüksek fırın cürufu yüksek sıcaklıkta üretilen çelik üretim tesisinin yan ürünü olup üretimde meydana gelen parçalar öğütölerek betonda ince veya kaba agregâ olarak kullanılabilir. YFC agregâsının agregâ standart değerlerine göre farklılıkları vardır. Kırma ve korozyon değerleri standartta belirtilen değerlere göre daha fazladır. Su emilimi, kırılmış granit emiliminden oldukça fazladır. Cüruf agregâsının özellikleri, beton üretiminde kullanılmadan önce iyi tayin edilmelidir (Devi ve Gnanavel, 2014).

Granüle yüksek fırın cürufunun özgül yüzey alanı 400-600 m²/kg, birim hacim ağırlığı ise 1200 kg/m³ ila 1300 kg/m³ arasında özgül ağırlığı ise 2,7 ile 2,9 g/cm³ değişmekte olup özgül ağırlık geleneksel portland çimentosuna göre daha düşüktür. Granüle yüksek fırın cürufu geleneksel bir betonda bulunan Portland çimentosu içeriğini %35 - %70 oranında değiştirebilmektedir (Amran vd., 2020). Tablo 2.3'te granüle yüksek fırın cürufuna ait kimyasal kompozisyon gösterilmektedir.

Tablo 2.3 Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu
(Amran vd., 2020)

Oksitler	ASTM C989 tarafından belirlenmiş miktarlar (%)
Silikon Dioksit, SiO ₂	40,0
Alüminyum Oksit, Al ₂ O ₃	13,5
Kalsiyum Oksit, CaO	39,2
Magnezyum Oksit, MgO	3,6
Demir Oksit, Fe ₂ O ₃	1,8
Kükürt Trioksit, SO ₃	4
Sülfat, S	1,0-1,9
Kızdırma Kaybı	0,0

Geleneksel çimento ile mineral katkıların kimyasal kompozisyonları kıyaslandığında en fazla benzerliği cüruf ile göstermektedir. Granüle yüksek fırın cürufu betonda oluşan boşlukların küçültülmesi, betonun uzun vadeli dayanımının artırılması, sülfat ve alkali silika reaksiyonlarına karşı göstereceği direncinin artırılması ve hidratasyon işlemi sırasında su ihtiyacının, geçirgenliğin ve ısı

oluşumunun azaltılması için kullanılabilir. 27°C’de yapılan reaksiyonun cüruf aktivasyonu kaynaklı oluşan C-S-H jelinin çözünmesi ve çökeltmesi katkısı ile reaksiyonun cüruf tarafından kontrol edildiği tespit edilmiştir. Ancak yüksek fırın cürufunun geopolimere olan etkileri eklendiği hacme göre (%5 - %50) farklılık göstermektedir. Cüruf ilavesinin artması ile tüm kütleme işlemlerinde ultrasonik darbe hızının, asit direncinin ve geopolimerin basınç dayanımının arttırabileceği belirlenmiştir (Amran vd., 2020a).

Geopolimerizasyon sürecinde yaygın olarak kullanılan hammadde sınıflarını; kalsine killeri, cüruflar ve kömür uçucu külleri oluşturmaktadır (Duxson ve Provis, 2008). Farklı bir deyişle jeolojik kökeninin kaya formunda olması sebebi ile kaolin kili ve volkanik küller birincil, endüstriyel atık veya alt ürünlerden olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ise ikincil geopolimerin hammadde kaynaklarını oluşturmaktadırlar (Hwang ve Huynh, 2015). Geopolimer sentezinde büyük bir çoğunlukla kullanılan kalsine killerden metakaolin, yapı itibarıyla bir plakayı andıran parçacıklardan oluşması sebebiyle beton üretimi aşamasında yüksek su ihtiyacı ve yüksek poroziteye sebep olduklarından kullanımları çok uygun değildir. Geopolimer sentezi için cüruf ve uçucu kül geopolimer beton üretiminde daha elverişli bir tercih olmaktadır (Duxson ve Provis, 2008).

Kömür yakıtlı elektrik santralleri tarafından üretilen fazla miktardaki uçucu kül, geopolimer üretiminde verimli bir şekilde kullanılarak beton üretiminden kaynaklanan karbon ayak izi en aza indirilebilir. Dünyada sıklıkla bulunan diğer bir atık madde ise granüle yüksek fırın cürudur (GFYC). GFYC metalürji endüstrisinin yan ürünüdür. Beton üretiminde GFYC’nin çimentoya ikame bağlayıcı olarak kullanılması açığa çıkan CO₂ emisyonunun ciddi oranda azaltılmasını sağlamaktadır (Bakharev vd., 2001).

Uçucu kül kullanılarak üretilen bir geopolimerde yüksek fırın cürufu ilavesi yapılarak geopolimerizasyonda uçucu kül kaynaklı dezavantajlar ortadan kalkmaktadır (Shi, 2004). İçeriğinde uçucu kül bulunan geopolimerler yüksek fırın cürufu gibi kalsiyum bakımından oldukça zengin olan malzemeler ile üretildiklerinde geopolimerlerin priz süresinde iyileştirmeler sağlabilmektedir. Aynı zamanda basınç dayanımında da iyileştirmeler meydana getirilebilir (Xu vd., 2014). Uçucu kül ve cürufun birlikte kullanılması ile iki farklı jel meydana gelmektedir. Bu jeller N-A-S-H ve C-A-S-H jelleridir (Bernal vd., 2013).

El-Didamony vd., Ati vd. geopolimer ile ilgili yaptığı çalışmalarında çimento yerine yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerlerin çimento-çimento yüksek fırın cürufu ile oluşturulan harçlardan daha fazla dayanım ve dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Cheng ve Chiu (2003) granüle yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerde yangın dayanım testi yaptıkları çalışmada, kalınlığı 10 mm olan geopolimer panel 1100 °C sıcaklığa maruz bırakılmış ve panelin arka tarafına 35 dakika sonunda 350 °C'den daha az bir sıcaklık geçişi olduğu dolayısı ile yangın dayanımının oldukça iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Oh vd. (2010) alkali ile aktive edilmiş, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu içeren 80°C'de reaksiyonu gerçekleştirilen geopolimerin dayanımını ve kristal fazın gelişimini incelemişlerdir. Sonuçlara bakıldığında, granüle yüksek fırın cürufu kullanılan ve NaOH ile aktivasyonu gerçekleştirilen serilerde yüksek dayanım gelişimi sağlanmıştır. Sodyum silikat ile aktivasyonu gerçekleştirilen ve granüle yüksek fırın cürufu ile üretilen serilerde düşük dayanım (2-3 MPa) elde edilmiş olup uçucu kül kullanılarak üretilen serilerde dayanım ise 30 MPa mertebelerine ulaşmıştır.

Yalghuz (2020) metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, genişletilmiş perlit ve ham perlit malzemelerini kullanarak, alkali çözelti olarak ise sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum metasilikat malzemelerini kullanarak geopolimerler üretmiştir. Ürettiği geopolimerlerin dayanımlarını incelemiştir. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı ile üretilen geopolimerlerde jel oluşumunun diğer karışımlara oranla oldukça iyi olması sebebi ile dayanımların diğer karışımlara nazaran daha yüksek olduğu saptanmıştır.

2.4.3 Atık Seramik Tozu

Seramik, inorganik malzemelerin biraraya getirilmesi ile oluşturulan karışımların farklı metotlarla şekil verilmesinin ardından, sırlanarak ya da sırlanmadan sertleşip dayanım kazanmasına kadar geçen pişirilme sürecidir. Pişirilme, şekil verilen seramiğin sıcaklığa maruz kalması ile dayanım kazanması şeklinde de tanımlanabilmektedir. Seramiğin kullanıma hazır olması için tuğla, kiremit ve yer karolarında olduğu gibi yüksek sıcaklıkta pişirilmesi gerekmektedir. Bazı

durumlarda seramiğin bir kez pişirilmesi yeterli görülmemekte ve seramiğe sırlama işlemi yapılmaktadır (Kalinçimen vd., 2015).

Sırlı seramik atıkları, seramik endüstrisinde üretim yanlılığı sonucunda oluşan ve kullanım tekrarı olmayan malzemeler olmaktadır. Bu malzemeler yapay puzolan sınıfında bulunmaktadır. Puzolanların yalnız başına kullanılması sonucunda bağlayıcı özelliği bulunmamaktadır. Puzolanlar, çimento ve su ile karıştırıldığında malzemeye bağlayıcılık özelliği kazandırmaktadır. Puzolanların içeriğinde kolloidal şekilde yüksek miktarda silis ve alümin bulunmaktadır. Al_2O_3 ve SiO_2 malzemeye puzolonik özellik kazandıran bir diğer faktördür. Al_2O_3 ve SiO_2 , puzolan içeriğinde bulunan reaktif kimyasal bileşenler amorf veya camsı ve zeolitik halde bulunmaktadır. Alümin ve silisin kristal fazda iken reaktif özellikleri bulunmamaktadır. CaO puzolanlarda az miktarda bulunmasına rağmen SiO_2 ve Al_2O_3 puzolonlarda fazla miktarda bulunmaktadır (Jambor, 1963; Altın vd., 2014).

Sanayi katma değeri açısından seramik sektörü; ülkemizin önde gelen ve Türk ekonomisine oldukça katkı sağlayan sektörlerinden biridir. Seramik sektörü alt sektörlerine bakıldığında; seramik sağlık gereçleri, seramik kaplama malzemeleri, seramik sofa ve mutfak eşyaları, porselen sofa ve mutfak eşyaları, refrakter harç ve tuğlalar vb. gibi seramik hammaddelerinden meydana gelen ve inşaat sektörü için ciddi miktarda katma değeri bulunan önemli bir sanayi dalı olmaktadır. Seramik sektörüne bakıldığında, Türkiye'nin en köklü ve en hızlı gelişen sektörleri arasındadır. Sektörün, gün geçtikçe ürünlerini geliştirmekte olduğu ve ürünlerinin çeşitliliğini artırmakta olduğu bilinmektedir (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Seramik Sektörü Raporu, 2020). Günlük seramik üretimine bakıldığında inşaat endüstrisinde duvarlarda ve zeminlerde kullanılan inşaat seramiklerinin %30 oranına sahip olduğu görülmektedir. Oluşturulan bu malzemelerin geri dönüşümü için çalışmalar yapılmakta fakat henüz %100 geri dönüşümü söz konusu değildir (Subaşı vd., 2017).

Dünya genelinde seramik üretiminden kaynaklı seramik atığı, malzeme kaynağının kaybını temsil etmekte olan atık depolama alanlarında depolanmaktadır. İnşaat sektöründe beton üretimi için gerekli olan malzemelerden olan çimento ve agrega temin etme konusunda oldukça fazla doğal kaynağın tüketildiği bilinmektedir (Penteado vd 2016; Hwang vd., 2019). Bu tüketimin azaltılması için beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak çimento veya agrega yerine atık depolama

alanlarındaki seramik tozu kullanılabilir (Huseien vd., 2018 ; Hwang vd., 2019; Hafez vd., 2017). Böylelikle ST, YFC vb. atık malzemelerin beton üretiminde yeniden kullanılması ile beton, çevre dostu bir malzemeye dönüşmekte, atık istifini azalmakta ve içinde bulundurduğu enerjiyi kullanmaktadır (El-Dieb. ve Kanaan, 2018).

Seramik sağlık gereçleri (vitrifiye), mutfaklarda ve banyolarda kullanılmakta olan lavabo, klozet, pisuar, rezervuar vb. gibi ürünlerinden oluşmaktadır. Genel bir şekilde ifade etmek gerekirse; hammadde olarak kil, kaolen, feldspat ve kuvars kullanılarak hazırlanan karışımların, alçıdan yapılmış olan kalıplara, hazırlanan çamur karışımları dökümlerinin sonucunda oluşan şekillerin; ilk etapta kurutulması ikinci etapta parlaklığını sağlayan sırlar ile kaplanması ve son etapta yüksek sıcaklığa sahip endüstriyel fırınlarda pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ürünler olmaktadır. (Kunduracı vd., 2019; Açıkbaş & Göçmez 2017) Seramik sağlık gereçlerinin üretim sektöründe senede 32000 ton üretim ile Türkiye, Avrupa'nın en fazla üreten ülkesi konumunda bulunmaktadır. Üretilen seramik sağlık gereçleri sırasında ve kalite kontrol aşamasının ardından meydana gelen atıklar ve çevreye olan zararlı etkileri göz önüne alındığında bu atıkların aktif bir şekilde geri dönüştürülmesi oldukça fazla önem teşkil etmektedir. Seramik üretimi yapan firmalar üretim sırasında meydana gelen yaş atığın büyük bir kısmını kullanabilmekte olmasına rağmen sinterlenmiş ürünün değerlendirilmesi, üretimden kaynaklanan kısıtlamalar nedeniyle mümkün olamamaktadır. Bu durum üretim kaynaklı oluşan atıkların çeşitli alanlarda verimli bir şekilde kullanılmasını mecbur kılmaktadır (Açıkbaş ve Göçmez, 2017).

Seramik atıkların değerlendirilmesi konusunda yapılan çalışmaların birçoğu beton üretiminde seramik atıklarının agrega olarak kullanımının araştırılması üzerine yapılmıştır. Literatür taraması yapıldığında seramiğin beton üretiminde çimento gibi bağlayıcı olarak kullanımı ile ilgili çalışmaların oldukça az olduğu görülmüştür (Puertas vd., 2006).

AST bazlı geopolimer kompozitlerin özelliklerini diğer alüminosilikat malzemelerle değerlendirmek için yapılan çalışmalardan bazıları,

AST daha yüksek oranda silika ve alümina içeriğine sahip olduğundan, puzolanik reaktivite (Kannan vd., Huseien vd.,) sergiler ve bu da onu geopolimer üretimi için uygun bir temel malzeme haline getirir.

Pacheco-Torgal ve Jalali, seramiğin puzolanik özelliğinin, seramik atık tozu kullanılarak yapılan betonun dayanıklılığını arttırdığını bulmuşlardır.

Hüseyin vd. AST üzerine yaptıkları çalışmada AST içeriğinin yüksek, basınç dayanımının düşük olduğunu ancak uçucu kül ve GYFC ile üretilen çoklu karışımli geopolimer harçlarda bunun işlenebilirlik ve mekanik özelliklerinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Uysal vd. kırmızı çamur-metakaolin bazlı geopolimer harçta dolgu malzemesi olarak AST içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımında da artış olduğunu bulmuşlardır.

Erol, atık seramik tozunun farklı oranlarda kullanımı (%0, %5, %10 ve %15), SH molaritesinin farklı oranlarda kullanımı (8 M ve 16 M) ve uçucu kül/cüruf bazlı alkali ile aktifleştirilen geopolimer harç (AAH) numunelerinin mekanik ve dayanıklılık performansına etkisini incelediği çalışmada harç içeriklerinde kullanılan SH molarite ve atık seramik tozu ikame oranı artışı fiziksel özellikler bakımından incelendiğinde bu durum numunelerin priz süresini azaltmış ve yüksek akışkanlık göstermesine sebep olmuş fakat yoğunluk artışı sebebi ile boşluk oranının ve su emme oranının azaldığını belirtmiştir. Harç içeriklerinde kullanılan atık seramik tozunun ve SH molaritesi artışının basınç, eğilme ve ultrasonik darbe hızı sonuçlarında iyileşmeye sebep olmuştur. Atık seramik tozunun %0'dan %15'e çıkarılması ve SH molaritesinin 8M 'den 16 M'ye çıkarılması ortalama basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UGH değerlerinin artışına sebep olmuştur. Aynı zamanda zaman geçtikçe geopolimerizasyon devam ettiği için çalışmada basınç dayanımı değerleri 7. gün'den 28. gün'e %27, 28. günden 56. güne %23 artış gösterdiği belirtilmiştir.

Kasehchi vd. yaptıkları çalışmada geopolimerizasyon işleminin etkili bir şekilde gerçekleşebilmesi için önemli miktarda alkali kullanımı ile birlikte (NaOH çözeltisi gibi aktivatör) geopolimer temel malzemesi olarak AST gibi amorf fazlı alümina ve silikanın da temininin oldukça gerekli olduğunu göstermiştir.

Tanyıldızı yaptığı çalışmada %0 ,%10, %20 ve %30 olarak farklı oranlarda ikame edilen atık seramik tozunun betona kapilerite açısından etkilerini incelemiştir. Kapiler su absorpsiyonunun, referans beton numunesi sonucu incelendiğinde %10'a kadar atık seramik tozu ikamesi ile azaldığı, %20 ve %30 olan diğer atık seramik tozu ikame oranlarındaki numunelerde ise arttığı tespit edilmiştir. Böylelikle betonda bulunan kılcal gözeneklerin azaltılması, beton mikro yapı yoğunluğunun ve geçirimsizliğinin artırılması ve suyun beton içinde serbest hareketini kısıtlanması için ilgili karışımda atık seramik tozu ikamesinin %10 seviyesine kadar yer değiştirilmesinin daha uygun bir dolgu özelliği gösterebileceği belirtilmiştir.

Chokkalingam vd., atık seramik tozu ve yüksek fırın cürufunun geopolimer betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkisini incelediği çalışmada geopolimer betonda sadece atık seramik tozunun kullanılmasının beton özelliklerini bozduğunu belirtmiştir. Fakat hazırlanan 16 karışım sonuçları değerlendirildiğinde en iyi sonucun %60 atık seramik tozu ve %40 yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışım olduğu belirtilmiştir. Deneysel bulgular sonucunda geopolimerde atık seramik tozunun kullanılabilirliğini göstermiştir.

Shoaei vd., atık seramik tozu ile hazırlanan geopolimer harçların kür sıcaklığı ve alkali çözelti: bağlayıcı oranı ile ilgili yaptıkları çalışmada daha yüksek s:b oranının taze harcın akışkanlığını arttığını gözlemlemiştir. Optimum karışımın S:B oranı 0,6 ve kür sıcaklığı 90 °C olduğunda elde edildiği sonucuna ulaşmıştır. SEM analizi sonucunda optimal karışımın minimum gözeneklere sahip yoğun bir matrise sahip olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

2.4.4 Alkali Aktivatörler

Alüminat ve silikat içeren ürünler farklı alkali içeriğine sahip ürünlerle reaksiyon gerçekleştirebilmektedir. Yapılan son yıllardaki çalışmalara bakıldığında yüksek fırın cürufu, metakaolin, silis dumanı, uçucu kül, kaolinitik kil, kırmızı çamur, zeolit, kaolin vb. gibi ısıtılma maruz kalmamış ürünlerin kullanılması üzerinde durulduğu görülmüştür. Alkaliler ile aktive edilmiş ürünlerin dayanımını ve dayanıklılığını ürün içeriğinde kullanılan alümino-silikat ürünlerinin kimyasal yapısı belirlemektedir (Kaya, 2016).

Mekanik açıdan dayanımı yüksek bir çimentolu malzeme üretimindeki aşamalardan biri olan geopolimerizasyon reaksiyonunun en önemli adımı, puzolanik

malzemenin aktivasyon safhasıdır. Aktivatörler sayesinde, hazırlanan çözeltideki silis ve alüminli türlerin çökmesi ve kristalize oluşumu gerçekleştirilir. OH^- , kimyasal reaksiyon için bir katalizör görevi görmekte olup metal katyon, yapısal bir eleman elde etmeye ve tetrahedral alüminyum sayesinde taşınan negatif çerçeveyi dengelemeyi sağlar (Rangan, 2008).

NaOH , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , cam suyu, K_2CO_3 , KOH , K_2SO_4 ve çimento klinkeri yaygın aktivatörler arasında (Khale ve Chaudhary, 2007) bulunurken, sıklıkla kullanılan alkali aktivatörler, sodyum hidroksitleri yada potasyum hidroksitleri (NaOH , KOH) ve sodyum cam suyu ($\text{nSiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) yada potasyum cam suyu ($\text{nSiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımlarıdır (Sumajouw vd., 2007).

Geopolimer üretiminde günümüzde en sık kullanılan alkali aktivatörleri, NaOH ve NaSi_2O_3 ya da KOH ve KSi_2O_3 karışımlarından meydana gelen çözeltiler oluşturmaktadır. Alkali çözeltilerin geopolimer üretiminde kullanımının gayesi, yapıdaki alümin ve silika ürünlerini aktif hale getirmektir. Ortamdaki silikat miktarı arttıkça reaksiyon miktarı da artış göstermektedir. Bu nedenle geopolimer üretiminde silikat içerikli NaSi_2O_3 veya KSi_2O_3 aktivatörlerinin kullanımı, aktivasyonu arttırmakta ve ekonomi yönünden avantaj sağlamaktadır. Geopolimer üretiminde, NaOH yada KOH gibi içeriğinde silikat bulunmayan aktivatörlerin tek başına kullanılması durumunda OH^- iyonların miktarında azalma meydana gelip Si^{4+} ve Al^{3+} iyonları bağlayıcı malzemeden tümüyle ayrılmaktadır. Alkalilerdeki azalma sebebi ile yapıdaki polimerizasyon tamamlanamamaktadır. Sonuç olarak bağlayıcı ürünlerden reaksiyona girmeyen ürünler oluştuğu için bu durum dayanımda azalmaya sebep olur (Çelik, 2019 ve Yip vd., 2008).

Alkali sıvı sistemi için Na_2CO_3 (sodyum karbonat), NaOH (sodyum hidroksit), Na_2SO_4 (sodyum sülfat) gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır (Amran vd., 2020). Alkali sıvının cinsi ve konsantrasyonu geopolimerizasyon sürecini kontrol etmektedir. Geopolimer reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için gerekli olan alkalilerin aktivasyon potansiyelleri aşağıda belirtildiği gibi sıralanabilmektedir (Singh ve Middendorf, 2020) :

Na_2SiO_3 (sodyum silikat) > NaOH (sodyum hidroksit) > $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ (sodyum hidroksit ve sodyum karbonat) > KOH (potasyum hidroksit)

2.4.4.1 Sodyum Hidroksit

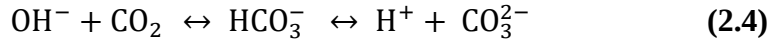
Eski adı "kostik soda" olarak tanımlanan sodyum hidroksit, sodyum karbonattan ortaya çıkmıştır. Sodyum hidroksit, gerek laboratuvarlarda gerekse endüstriyel ortamlarda günümüzün en çok kullanılan kimyasal maddelerinden biridir. Sodyum hidroksit, laboratuvarlarda asidik gazlardan biri olan CO₂'i yakalamak için kullanılır. Endüstriyel ortamlarda ise yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinerileri gibi birçok farklı kimyasal maddenin yapımında kullanılmaktadır. (wikipedia, 2024)

Saf sodyum hidroksit, katı halde ve beyaz renktedir. Su moleküllerini bir arada tutan bir yapıya sahiptir. Bu özelliği sebebiyle havadan, havada bulunan nemden veya ıslak bir yüzeyde bulunan su ile kolaylıkla reaksiyona girmektedir.

Güçlü bir baz olan sodyum hidroksit su bulunan ortamda tamamen ayrışarak OH iyonunu serbest bırakır (Denklem 2.3) (wikipedia,2024).



Havada bulunan karbondioksitin, su bulunan ortamda çözülmesi ve sodyum hidroksit ile reaksiyona girmesi sonucunda karbonatlar meydana gelir (Denklem 2.4).



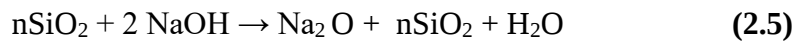
Geopolimer üretiminde NaOH sıklıkla kullanılan bir alkali aktivatördür. Geopolimerde kullanılan NaOH çözeltisinin yoğunluğu ve molaritesi, geopolimerin özellikle mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektedir. NaOH ilavesinin fazla miktarda kullanımı kimyasal çözünmeyi hızlandırmakta olup aynı zamanda bağlayıcı oluşurken etrenjit ve CH yapısını olumsuz yönde etkilemektedir. NaOH oranının yüksek olması, erken reaksiyonun ilk aşamalarında yüksek dayanıma sebebiyet vermesine rağmen çözelti içerisinde bulunan fazla OH iyonları sebebiyle çözeltide istenmeyen bir morfolojiye ve son ürünlerin düzensiz bir yapıda olmasına sebep olur. Geopolimerin NaOH ile aktive edildiğinde kristal yapısının daha fazla geliştiği, sülfat ve asitli ortamlara karşı daha fazla dirençli olduğu saptanmıştır. Aynı zamanda aktivatör seçiminde NaOH kullanılması, hidrasyon aktivitesi sebebiyle geopolimer ana ürünü olan C-S-H ürününün oluşumunu doğrudan etkiler. Çözeltideki NaOH oranı arttıkça ısı üretimi de artmakta olup aralarında doğrusal

bir ilişki bulunmaktadır. Bu durumun aksine çözeltideki NaOH oranı arttıkça maksimum hidratasyon ısısı zamanı azalmaktadır. Böylelikle aralarında ters bir ilişki bulunmaktadır (Peterman ve Hammons, 2010).

Yapılan bir çalışmada, silikon ve/veya alüminyum içeriğine sahip farklı türdeki mineraller ve camlar üzerinde NaOH aktivatörü etkisi incelenmiş olup iki aşamada özetlenmiştir: ilk adımda silikat, alüminat ve kireç salınımı gözlemlenmiş, ikinci adımda ise NaOH çözeltisinin yenilenmesinin yanı sıra hidratasyon sonucu kalsiyum silikatların ve alüminatların oluşumu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, alkali ile aktive edilen alümino-silikat bağlayıcısının sertleşme düzeneğinin, NaOH var olduğunda Si ya da Al'nin çözünmesini içerdiği ve yeniden NaOH üretilmesi ile kalsiyum silikat ya da alüminat olarak oluştuğu belirlenmiştir (Davidovits ve Sawyer, 1985).

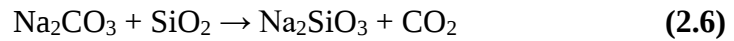
2.4.4.2 Sodyum Silikat

$n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ genel formülüne sahip kimyasal bileşiklerin genel adına sodyum silikat denmektedir. Serinin en çok bilinmekte olan üyesi Na_2SiO_3 formülüne sahip sodyum metasilikat'tır. Sodyum silikat, su camı ya da sıvı cam olarak da bilinmekte olup sulu çözelti içersinde ya da bir katı içersinde kullanılabilir. Doğal bileşimleri renksiz, saydam ya da beyaz renkte olmasına rağmen ticari örneklerinde demir içeren yabancı maddelerin bulunması sebebiyle, çoğunlukla yeşilimsi ya da mavi renktedir.



Bu bileşiklerin kullanım alanları çimento sektörü, tekstil sektörü, otomobil sektörü ve diğer farklı alanlardır (wikipedia, 2024).

Sodyum karbonat ve silisyum dioksit'in eriyerek reaksiyona girmesi sonucunda sodyum silikat ve karbon dioksit bileşikleri oluşmaktadır;



Ticari olarak birçok derecede sodyum silikat solüsyonları mevcuttur. Alkali solüsyon farklı konsantrasyonlarda (8-16 mol arası) 24 saat öncesinden hazırlanarak kullanılabilir. Alkali aktivatörler katı veya sıvı bir şekilde kullanılabilir (Sing & Middendorf, 2020).

2.4.4.3 Potasyum Hidroksit

Potasyum hidroksit (KOH) veya potasyum hidrat, kimyasal bir bileşiktir. Potasyum hidroksit akkor derecede uçucu, 360 °C'de eriyen, suda ısı açığa çıkararak çözünen, rengi beyaz ve katı halde bulunan bir maddedir. Alkalik bazlar sınıfında bulunan potasyum hidroksidin kullanım alanları çeşitlilik göstermektedir. Tarım sektöründe sıkça kullanımı sağlanmaktadır. Asidik toprakların pH derecesini dengeleyebilmekte ve aynı zamanda tarım ilaçlarının yapımında da kullanılabilir. Buna ek olarak tıpta ve endüstriyel kimya alanlarında da kullanılmaktadırlar. Potasyum hidroksitin özellikle endüstriyel kimyada oldukça geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Birçok temizlik ürünü üretiminde, geri dönüşüm sektöründe ve ilaç sektöründe bazı hayvanlarda kullanılan ilaçların üretiminde potasyum hidroksitten yararlanılmaktadır. Potasyum hidroksit bir CO₂ tutucu olduğundan bitkisel deneylerde de kullanımı sağlanmaktadır (wikipedia, 2024)



Geopolimer üretiminde KOH bileşiği kullanılarak yüksek basınç dayanımlı ve düşük seviyede boşluğa sahip ürünler ortaya çıkarılabilir. K⁺ iyonu diğer aktivatör iyonları ile kıyaslandığında daha basit bir yapıya sahip olup çözeltideki polimerizasyon iyonizasyonu diğer aktivatörler iyonlarına kıyasla çok daha iyidir. Ayrıca sonuç ürününde oluşan matrisin yapısı daha doygun bir yapıya sahip olup daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahiptir. Bunun yanı sıra çözeltide bulunan KOH miktarı ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında 10 M' den fazla olan KOH konantrasyonlarının basınç dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. KOH ve NaOH' u kıyasladığımızda KOH yüksek alkaliniteye sahip olduğundan iyi bir çözülme sağlamak için mantıklı olsa da, NaOH aslında daha fazla kapasiteye sahip silikat ve alüminat monomerleri oluşturur (Petersman ve Hammons, 2010).

3.1 Giriş

Bu çalışma, farklı tür ve oranlarda sentetik liflerin geopolimer harçlar üzerindeki etkisinin araştırılması için yapılmıştır. Geopolimer harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak ~%80 oranında atık seramik tozu ve ~%20 oranında granüle yüksek fırın cürufu karışımı kullanılmıştır. Alkali aktivasyonun gerçekleşebilmesi için 10M sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözelti karışımı kullanılmıştır. Sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı ağırlıkça 1/2 olarak belirlenmiştir. Agrega olarak standart kum kullanılmıştır. İstenilen kıvamı elde edebilmek amacıyla bağlayıcının ağırlıkça ~%1,5 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında farklı tür ve oranlarda lifler kullanılarak üretilen geopolimer harç üretimlerinin dayanım, kalıcılık ve mikroyapısal özellikleri hakkında araştırmalar yapılmıştır. Bu bölümde, geopolimer harç üretiminde kullanılan malzemelerin ve materyallerin özellikleri, numunelerin hazırlanma yöntemi ve yapılan deneysel çalışmalar detaylandırılarak anlatılmıştır.

3.2 Malzemeler

3.2.1 Atık Seramik Tozu

Çalışma kapsamında üretilen tüm karışımlarda, birincil bağlayıcı malzeme olarak Manisa'da faaliyet gösteren yerel bir seramik fabrikasından temin edilen atık seramik tozu kullanılmıştır. Temin edilen atık seramik tozuna ait görsel Şekil 3.1'de, kimyasal bileşim tablosu Tablo 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Atık seramik tozuna ait görsel

Tablo 3.1 Atık seramik tozunun kimyasal bileşimi

Ana Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
Atık Seramik Tozu	63,44	20,21	6,39	0,67	3,14	0,97	3,97	0,96

3.2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada ikincil bağlayıcı malzeme olarak Oyak Çimento' dan temin edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 2,90 g/cm³'tür. Temin edilen granüle yüksek fırın cürufuna ait görsel Şekil 3.2'de, kimyasal bileşim tablosu ise Tablo 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna ait görsel

Tablo 3.2 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi

Ana Oksitler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
ÖGYFC	40,56	12,82	1,12	35,56	5,88	0,78	0,67	0,19	0,76

3.2.3 Agrega

Tüm karışımlarda dolgu malzemesi olarak Limak Çimento Sanayi firmasından TS EN 196-1 standartlarına uygun ve özgül ağırlığı 2,64 g/cm³ olan standart kum temin edilip kullanılmıştır. Temin edilen agregaya ait görsel Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Standart kuma ait görsel

3.2.4 Kimyasal Aktivatörler

Çalışmada ön deneyler de dahil olmak üzere alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_2), potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat ($\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$) kullanılmıştır. As Kimya Sanayi ve Tic. Firmasından tedarik edilen katı haldeki NaOH ve KOH ile ayrı ayrı 8, 10, 12 ve 14 M'lik çözeltiler hazırlandıktan sonra 24 saat kullanıma hazır hale gelene kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit ve potasyum silikat özellikleri Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te gösterilmiştir. Farklı molaritelerde (8-10-12-14 Mol) hazırlanan NaOH çözeltilerine ait görsel Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Sodyum hidroksit kimyasal bileşimi

NaOH (g/kg)	Na_2CO_3 (g/kg)	SO_4	Cl	Al	Fe	NaOH (g/kg)
> 990	< 4	< 0,01	< 0,01	< 0,002	< 0,002	> 990

Tablo 3.4 Sodyum silikat kimyasal yapısı

Na_2O (%)	SiO_2 (%)	Fe (%)	Özgöl Ağırlık (g/ml)	Ağır Metal Oranı (pb) %

Tablo 3.4 Sodyum silikat kimyasal yapısı (devamı)

9,68	26,12	<0,005	1,367	<0,005
------	-------	--------	-------	--------

Tablo 3.5 Potasyum hidroksit ve potasyum silikat kimyasal yapısı

	K ₂ O (%)	H ₂ O (%)	SiO ₂ (%)
K ₂ SiO ₃	12,7	60,3	27,0
KOH (g/kg)	12,9	87,1	-

NaOH molarite (m) hesabı (3.1)' deki eşitlikten faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$m = n / v \quad (3.1)$$

Eşitlikte bulunan m, çözeltinin molaritesini, n çözünen maddenin mol sayısını ve v verilen çözeltinin litre cinsinden hacmini ifade etmektedir.

Örnek olarak hacmi 1 litre olan NaOH çözeltisinin molarite hesabı Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

NaOH moleküler ağırlığı (1 mol): 40 gram

Mol sayısı = kütle (gram) / molekül ağırlığı (gram)

Tablo 3.6 NaOH molarite hesabı

Mol Sayısı	Molekül Ağırlığı (gram)	Kütle (gram)
8	40	320
10	40	400
12	40	480

Tablo 3.6 NaOH molarite hesabı (devamı)

14	40	560
----	----	-----

Hacim = 1 litre

$m = n / v$ (1 kg çözücü)

Tablo 3.7 NaOH molarite hesabı

Molarite (m)	Mol	Hacim (litre)
8	8	1
10	10	1
12	12	1
14	14	1

KOH molarite (m) hesabı eşitlik (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m = n / v \quad (3.2)$$

KOH'nin moleküler ağırlığı (1 mol): 56 gram

Mol sayısı = kütle (gram) / molekül ağırlığı (gram)

Tablo 3.8 KOH molarite hesabı

Mol Sayısı	Molekül Ağırlığı (gram)	Kütle (gram)
8	56	448
10	56	560
12	56	672

Tablo 3.8 KOH molarite hesabı (devamı)

14	56	784
----	----	-----

Hacim = 1 litre

$m = n / v$ (1 kg çözücü)

Tablo 3.9 KOH molarite hesabı

Molarite (m)	Mol	Hacim (litre)
8	8	1
10	10	1
12	12	1
14	14	1



Şekil 3.4 8, 10, 12 ve 14 M hazırlanan NaOH çözeltilerine ait görsel

3.2.5 Akışkanlaştırıcı Katkı

Çalışma kapsamında, BASF firmasından temin edilen polikarboksilik eter esaslı ve yüksek oranda su azaltıcı olarak kullanılan yeni nesil süperakışkanlaştırıcı MasterGlenium 51 beton katkısı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler Tablo 3.10’da gösterilmiştir.

Tablo 3.10 Akışkanlaştırıcı katkıya dair teknik özellikler (BASF, 2020)

Malzeme Yapısı	Polikarboksilik eter esaslı	Malzeme Yapısı
Görünüm	Kahverengi-sıvı	Görünüm
Özgül Ağırlık (20C°)	1.082-1.142 kg/lt	Özgül Ağırlık (20C°)
pH değeri	6-7	pH değeri
Alkali İçeriği (%)	≥ 3,00 (ağırlıkça)	Alkali İçeriği (%)

3.2.6 Lifler

Çalışmada, lif kullanımının geopolimer harçlar üzerindeki basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, aşınma direnci, yüksek sıcaklık, boşluk oranı ve su emme özelliklerine etkilerinin incelenmesi üzerine polipropilen, bazalt ve poliamid olmak üzere 3 ayrı lif kullanılmıştır.

3.2.6.1 Polipropilen Lif

Çalışma kapsamında geopolimer harca ağırlıkça %0,4, %0,6 ve %0,8 oranlarında polipropilen lif eklenmiştir. Çalışmada kullanılan polipropilen life ait teknik özellikler Tablo 3. 11’de ve life ait görsel Şekil 3.5’ te gösterilmiştir.

Tablo 3.11 Polipropilen lif özellikleri

Lifler	Polipropilen
Özgül Ağırlık	0,91

Tablo 3.11 Polipropilen lif özellikleri (devamı)

Uzunluk (mm)	12
Çap (µm)	75
Nominal Çekme Dayanımı (MPa)	750
En/Boy Oranı	160



Şekil 3.5 Polipropilen life ait görsel

3.2.6.2 Bazalt Lif

Çalışma kapsamında geopolimer harca ağırlıkça %0,4, %0,6 ve %0,8 oranlarında bazalt lif eklenmiştir. Çalışmada kullanılan bazalt life ait teknik özellikler Tablo 3.12’de ve life ait görsel Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Tablo 3.12 Bazalt lif özellikleri

Lifler	Bazalt
Özgül Ağırlık	2,73
Uzunluk (mm)	12

Tablo 3.12 Bazalt lif özellikleri (devamı)

Çap (μm)	20
Nominal Çekme Dayanımı (MPa)	4100
En/Boy Oranı	600



Şekil 3.6 Bazalt life ait görsel

3.2.6.3 Poliamid Lif

Çalışma kapsamında geopolimer harca ağırlıkça %0,4, %0,6 ve %0,8 oranlarında poliamid lif eklenmiştir. Çalışmada kullanılan poliamid life ait teknik özellikler Tablo 3.13'te ve life ait görsel Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.13 Poliamid lif özellikleri

Lifler	Poliamid
Özgül Ağırlık	1,14
Uzunluk (mm)	10

Tablo 3.13 Poliamid lif özellikleri (devamı)

Çap (μm)	55
Nominal Çekme Dayanımı (MPa)	900
En/Boy Oranı	181



Şekil 3.7 Poliamid life ait görsel

3.3 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmaların tamamı Yıldız Teknik Üniversitesinde bulunan Yapı Malzemeleri Laboratuvar'ında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere 50x50x50 mm boyutlarında küp (Şekil 3.8) ve 71x71x71 mm boyutlarında küp numuneler (Şekil 3.9), 40x40x160 mm boyutlarında prizma numuneler (Şekil 3.8) ve 100x200 mm boyutlarında silindir numuneler (Şekil 3.10) üretilmiştir. Üretilen geopolimer numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM C642 standartına göre su emme, birim hacim ağırlık ve boşluk oranları hesapları yapılmıştır. Numunelerin dayanım performansını belirlemek amacıyla basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı testleri uygulanmıştır. Basınç dayanımı testi ASTM C109, eğilme dayanımı testi ASTM C348, yarmada çekme dayanımı testi ASTM C496 ve ultrases geçiş hızı testleri ise ASTM C597

standart prosedürleri takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kalıcılık özelliklerini belirleyebilmek amacıyla numunelere, yüksek sıcaklık ve aşındırma testleri yapılmıştır. Numunelerin mikroyapılarını incelemek amacıyla geopolimer harç numunelerine, X-Işını kırınım yöntemi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.8 Üretilen 40x40x160 mm prizma ve 50x50x50 mm küp numunelere ait görsel



Şekil 3.9 Üretilen 71x71x71 mm küp numunelere ait görsel



Şekil 3.10 Üretilen 100x200 mm silindir numunelere ait görsel

3.3.1 Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı testleri 50x50x50 mm boyutlarındaki küp ve 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numuneler ile yapılmıştır. Basınç dayanımı testleri küp numunelere 7. gün ve 28. gün olmak üzere iki ayrı günde uygulanmıştır. Basınç dayanımı testi küp numunelere direkt olarak uygulanmış, prizma numunelere ise eğilme dayanımı testi sonrasında 2 bloğa ayrılan numunelere uygulanmıştır (Şekil 3.12). Numuneler makineye, pürüzsüz yüzeyleri makinenin kuvvet uyguladığı yüzeye denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Her seri için üçer adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin ortalama basınç dayanımı, basınç dayanımı sonuçlarını raporlamak üzere hesaplanmıştır. Basınç dayanımı, eşitlik (3.3)'den faydalanarak numuneye uygulanan nihai yük ile numune kesit alanı arasındaki oran kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma: P/A \quad (3.3)$$

σ : Basınç dayanımı, (N/mm²),

P: Prizmanın kırıldığı anda, prizmanın ortasına uygulanan kuvvet (N)

A: Kesit alanı



Şekil 3.11 Basınç dayanımı uygulaması



Şekil 3.12 Basınç dayanımı uygulaması

3.3.2 Eğilme Dayanımı

Üretilen geopolimer harçların dayanım performansını belirlemek için yapılan eğilme dayanımı deneyi $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki prizma numunelere uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testleri prizma numunelere 7. gün ve 28. gün olmak üzere iki ayrı günde uygulanmıştır. Numuneler makineye pürüzsüz yüzeyleri denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Deney yapılan aparatın iki mesnet arası mesafesi 100

mm'dir. Deney sırasında kuvvet, numunelerin orta noktasına uygulanmıştır. Numunelere, malzeme test makinesi üzerinde tek noktalı yükleme yapılarak eğilme dayanımı sonuçları hesaplanmıştır. Her seri için üçer adet numune üretilmiştir. Numunelerin ortalama eğilme dayanımı, eğilme dayanımı sonuçlarını raporlayabilmek için hesaplanmıştır.

Eğilme dayanımı, eşitlik (3.4)'ten faydalanarak bulunmaktadır.

$$\sigma = 3PL / 2bd^2 \quad (3.4)$$

σ : Eğilme dayanımı, (N/mm²)

b: Prizma kesitinin eni (mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dir.



Şekil 3.13 Eğilme dayanımı uygulaması

3.3.3 Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme dayanımı deneyinde, üretilen geopolimer harç numunelerinin yarmada çekme dayanımı sonuçlarını belirlemek amacıyla 100x200 mm boyutlarına sahip silindir numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.14). Yarmada çekme dayanımı testi, numunelere 28. günde uygulanmıştır. Gerçekleştirilen test sayesinde numunelerde dolaylı olarak çekme gerilmeleri oluşturularak eksen boyunca yarıma

oluşması beklenmiştir. Deney boyunca basınç cihazı tablalarının geopolimer numunelere göre dikey bir konumda tutulması sağlanmıştır. Herbir seri için üçer adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin ortalama yarmada çekme dayanımları ile yarmada çekme dayanımı sonuçları bulunmuştur.



Şekil 3.14 Yarmada çekme dayanımı deneyi



Şekil 3.15 Deney sonrası eksen boyunca yarıma gözlenen bazalt lif içerikli geopolimer harç numunesi

3.3.4 Boşluk Oranı, Su Emme, Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

40×40×160 mm prizma numunelere fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi amacı ile birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme oranı deneyleri yapılmıştır. Numunelerin etüv kurusu ağırlığının tespit edilmesi için etüv sıcaklığı 105 °C olan etüv sıcaklığında 48 saat boyunca kurutulmuştur (Şekil 3.16). Ardından 20 °C sıcaklıktaki su banyosunda (Şekil 3.17) 48 saat süreyle bekletilip bir bez yardımı ile numunelerin yüzeyi silinip doymun kuru yüzey ağırlığı tartılmıştır. Son aşamada numunelerin, Arşimed terazisi yardımı ile su içerisindeki ağırlıkları tartılmıştır. Birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme oranı deneylerinin sonuçları (3.5), (3.6) ve (3.7) eşitliklerinden faydalananarak hesaplanmıştır.

$$\text{Birim hacim ağırlık (g/cm}^3\text{)} = A / (A-C) \quad (3.5)$$

$$\text{Boşluk oranı (\%)} = [(B-A) / (B-C)] \times 100 \quad (3.6)$$

$$\text{Ağırlıkça su emme oranı (\%)} = [(B-A) / (A)] \times 100 \quad (3.7)$$

A= Kuru haldeki tespit edilen ağırlığı

B=Doygun kuru yüzey halde tespit edilen ağırlığı

C= Su içinde tespit edilen ağırlığı



Şekil 3.16 Numunelerin etüv fırınındaki görüntüsü



Şekil 3.17 Numunlerin su havuzunda bekletilmesi

3.3.5 Böhme Aşınma Dayanımı Deneyi

71x71x71 mm boyutundaki küp numunelere 28. günde Böhme aşınma dayanımı deneyi yapılmıştır. Numune dakikada 30 ± 1 devir dönen ve yaklaşık olarak 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş ve aşındırma işlemini gerçekleştiren döner bir disk üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.15). Deneylerde sürtünme şeridi üzerine $20 \text{ gr} \pm 0,5 \text{ gr}$ zımpara tozu (korundum) serpilmiş olup (Şekil 3.18) numunelere, $294 \pm 3 \text{ N}$ çelik manivela aracılığıyla yüklenmiştir (Şekil 3.19). Disk 22 devir sonunda otomatik olarak durmakta olup zımpara tozu ve numune atıkları disk üzerinden temizlenmiştir. Ardından $20 \text{ gr} \pm 0,5 \text{ gr}$ zımpara tozu yeniden sürtünme şeridi üzerine dökülüp numune düşey eksen etrafında 90° döndürülmüştür. Bu deney her numune için 22 devirden meydana gelmekte olup numuneye 16 defa uygulanmıştır. Deney numunesinin iyice temizlenmesinin ardından numune boyutları 0,01 mm hassasiyetteki kumpas ile ölçülmüş (Şekil 3.21) ve numune hassas terazide tartılmıştır.



Şekil 3.18 Zımpara tozuna ait görsel



Şekil 3.19 Böhme aşınma dayanımı deneyi



Şekil 3.20 Böhme aşınma dayanımı deneyi



Şekil 3.21 Böhme aşınma deneyi

3.3.6 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Geopolimer harç numunelerine ultrases geçiş hızı testleri yapılarak ultrases dalgalarının numunelerdeki geçiş süresi tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyleri 71×71×71 mm boyutlarındaki küp numunelere 7. ve 28. günde uygulanmış ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklığın, üretilen harç numuneler üzerindeki etkisinin tespiti amacıyla 50×50×50 mm boyutlarındaki basınç numunelerine yüksek sıcaklık deneyi sonrasında uygulanmıştır. Her bir numune

için 2 ayrı okuma değeri yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak sonuçlar raporlanmıştır. Deney gerçekleştirilmeden önce cihaza, ölçümdeki cihaz başlıkları arasındaki mesafe girilmiş ve numunelerin yüzeylerine ultrason jeli uygulanmıştır. Deneyler, cihaz başlıklarının dik ve iyi bir şekilde temas etmesine dikkat edilerek uygulanmıştır. Ultrases geçiş hızı değerleri m/sn cinsinden hesaplanmıştır. Ölçümlerde kullanılan cihaza ait görsel şekil 3.23'te gösterilmiştir.



şekil 3.22 Ultrases geçiş hızı deneyi



şekil 3.23 Ultrases geçiş hızı deneyi

3.3.7 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisi deneyi ile üretilen geopolimer harç serilerinin yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı performansı incelenmiştir. Deney tüm numunelere 28. günden sonra uygulanmıştır. Deney öncesinde numuneler, etüv fırınında 24 saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık fırını dakikada 5°C sıcaklık artışını sağlayacak şekilde programlanmıştır. Numuneler 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Programlanan sıcaklığa ulaşan numuneler yaklaşık 1 saat hedeflenen sıcaklıkta bekletilmiştir. Numunelerde termal çok sebebi ile herhangi bir patlama, kırılma vb. gibi etkiler oluşmaması için numunelerin sıcaklığı, oda sıcaklığına gelene kadar yüksek

sıcaklık fırını içerisinde bekletilmiştir. Sıcaklığı oda sıcaklığı değerine düşen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinden önceki ve sonraki durumlarda oluşan değişimini belirlemek amacıyla basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve numune ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı testleri uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık testi için kullanılan cihaza ait görsel Şekil 3.24’te gösterilmektedir.



Şekil 3.24 Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 3.25 Fırına yerleştirilen numuneler

3.3.8 SEM ve EDS Analizleri

SEM ve EDS analizleri, üretilen geopolimer numunelerinin ana bileşenlerini ve parçacık boyutlarını belirlemek amacıyla uygulanan taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımı spektroskopisi testleri Yıldız Teknik Üniversitesinde bulunan Merkezi Araştırma Laboratuvarı ilgili personelleri tarafından yapılmıştır.

3.3.9 XRD Analizleri

Yıldız Teknik Üniversitesinde bulunan ve Merkezi Araştırma Laboratuvarı ilgili personelleri tarafından, üretilen geopolimer numunelere X-Işını kırınım yöntemi ile mikro analizler gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinin yapılması sayesinde, toz haline getirilen numune parçalarındaki mineral fazların dağılımı incelenmiştir.

3.4 Geopolimer Harçların Üretilmesi

Atık seramik tozu ile üretilen geopolimer harç numunelerinde farklı tür ve oranlardaki liflerin fiziksel, mekanik ve mikroyapısal olarak numunelere etkisinin incelenebilmesi için, ilk aşamada optimum karışımı belirleyebilmek amacıyla ön deneme çalışmaları yapılmıştır.

3.4.1 Ön Deneme Çalışmaları

Ön deneme çalışmaları kapsamında farklı oranlarda atık seramik tozu ve yüksek fırın cürufu içeren geopolimer harçların 4 ayrı kür sıcaklığı (20, 60, 80 ve 100 °C) iki ayrı aktivatör sodyum hidroksit-sodyum silikat ($\text{NaOH}-\text{Na}_2\text{SiO}_2$) ve potasyum hidroksit-potasyum silikat ($\text{KOH}-\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$) ve 4 ayrı molaritede (8, 10, 12 ve 14 Mol) mekanik deney sonuçları incelenmiştir.

Çalışmada harçlar, standart kum, atık seramik tozu, granüle yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, potasyum silikat ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Harç karışımlarının ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 2,5, aktivatör/bağlayıcı oranı 0,57 olacak şekilde hazırlanmıştır. Malzeme oranlarının belirlenmesi, konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar ve farklı oranlardaki deneme karışımlarının yapılması sonucunda olmuştur (Chokkalingam vd., Shoaie vd.). Karışımlarda, standart kum, %100, %80 ve %60 oranlarında atık seramik tozu, %0, %20 ve %40 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu, farklı molaritelerde (8-10-12-14 mol) sodyum hidroksit-

sodyum silikat, potasyum hidroksit-potasyum silikat ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Karışımlar hazırlanırken aşağıdaki çizelgede bulunan ilgili karışıma ait seramik tozu ve yüksek fırın cürufu, önceden hazırlanmış sodyum hidroksit (NaOH) - sodyum silikat (Na_2SiO_2), potasyum hidroksit (KOH) - potasyum silikat ($\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$) ve süper akışkanlaştırıcı aktivatör karışımı ile seyreltilerek eklenerek karışım mikser kullanılarak (Şekil 3.26) karıştırılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi, bağlayıcı malzeme/alkali aktivatör oranı 0,57 olacak şekilde karışıma eklenmiştir. Bağlayıcı/akışkanlaştırıcı 1:0,015 olacak şekilde eklenmiştir. Son olarak standart kumu, bağlayıcı malzeme/kum oranının 1:2,5 olduğu şekilde karışıma ilave edilmiştir. Karışım, 50×50×50 mm küp kalıplara üç aşamada döküldükten sonra titreşime maruz bırakılarak içerisindeki hava kabarcıklarının dışarı çıkması sağlanmıştır.

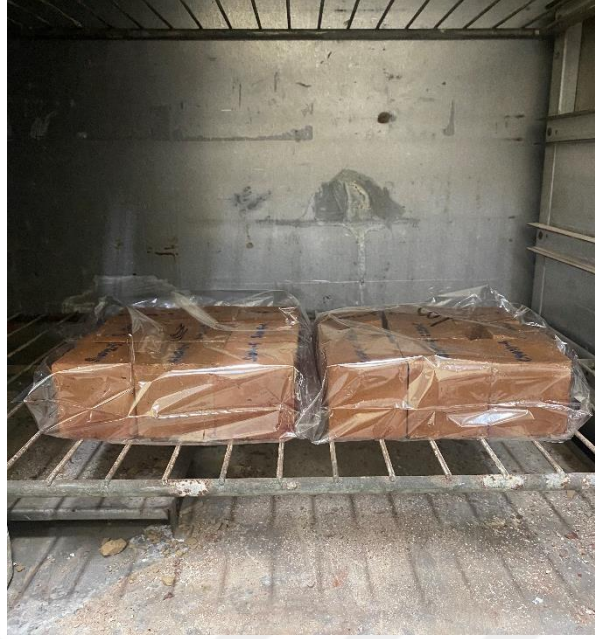


Şekil 3.26 Ön deneme karışımı mikser görüntüsü



Şekil 3.27 Ön deneme karışımı üretilen küp numuneler

Çalışmada farklı karışım oranları, farklı kür sıcaklıkları, farklı tür ve molaritedeki aktivatörlerin, üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkilerini tespit edebilmek amacıyla yapılmıştır. Karışımlar, ön çalışmanın ilk aşaması kapsamında üç ayrı karışım, potasyum hidroksit ve potasyum silikat aktivatörleri kullanılarak üretilirken, ön çalışmanın ikinci aşamasında üç ayrı karışım, sodyum silikat ve sodyum hidroksit aktivatörleri kullanılarak üretilmiştir. Karışımlarda 8, 10, 12 ve 14 molar olacak şekilde farklı oranlarda silikat içeriği kullanılmıştır. Üretilen numuneler 20, 60, 80 ve 100 °C olmak üzere 4 ayrı etüv sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Ön deneylerin birinci ve ikinci aşamalarında ayrı ayrı 48 seri üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.28 Etüv fırını görüntüsü

İlk aşamada üç farklı oranda atık seramik tozu ve cüruf içeren karışımların aktivatör olarak potasyum hidroksit ve potasyum silikat aktivatörü kullanılması ile 4 farklı kür sıcaklığı sıcaklığı (20, 60, 80 ve 100 °C) ve 4 ayrı molaritede (8, 10, 12 ve 14 Mol) basınç dayanımı sonuçları incelenmiştir.

Harç karışımlarının içeriği ve karışımlarda kullanılan malzeme miktarları sırasıyla Tablo 3.14 ve 3.15'te gösterilmektedir.

Tablo 3.14 Harç karışım bilgileri

Karışım No	Karışım İçeriği
KP-1	%100 Seramik Tozu + KOH + Potasyum Silikat + Standart Kum
KP-2	%80 Seramik Tozu + %20 Yüksek Fırın Cürufu + KOH + Potasyum Silikat + Standart Kum
KP-3	%60 Seramik Tozu + %40 Yüksek Fırın Cürufu + KOH + Potasyum Silikat + Standart Kum

Tablo 3.15 Harç karışımlarına ait malzeme bilgileri

Karışım No	KP-1 (g)	KP-2 (g)	KP-3 (g)
Seramik Tozu	600	480	360
Standart Kum	1500	1500	1500
Yüksek Fırın Cürufu	-	120	240
Potasyum Silikat	228	228	228
Potasyum Hidroksit	114	114	114
Su/ Bağlayıcı Oranı	0,57	0,57	0,57
Akışkanlaştırıcı	9	9	9

İkinci aşamada üç farklı oranda atık seramik tozu ve granüle yüksek fırın cürufu içeren karışımların, sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörlerinin kullanılması ile 4 farklı kür sıcaklığı sıcaklığı (20, 60, 80 ve 100°C) ve 4 ayrı molaritede (8, 10, 12 ve 14 Mol) basınç dayanımı sonuçları incelenmiştir.

Harç karışımlarının içeriği ve karışımlarda kullanılan malzeme miktarları sırasıyla Tablo 3.16 ve 3.17’de gösterilmektedir.

Tablo 3.16 Harç karışım bilgileri

Karışım No	Karışım İçeriği
KP-1	%100 Seramik Tozu + NaOH + Potasyum Silikat + Standart Kum
KP-2	%80 Seramik Tozu + %20 Yüksek Fırın Cürufu + NaOH + Potasyum Silikat + Standart Kum

Tablo 3.16 Harç karışım bilgileri (devamı)

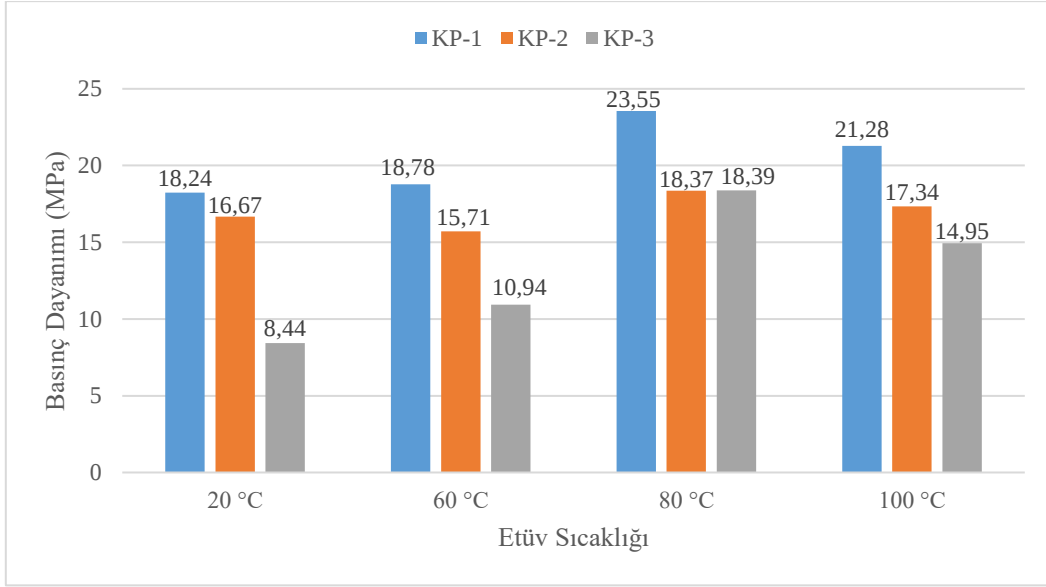
KP-3	%60 Seramik Tozu + %40 Yüksek Fırın Cürufu + NaOH + Potasyum Silikat + Standart Kum
------	--

Tablo 3.17 Harç karışımlarına ait malzeme bilgileri

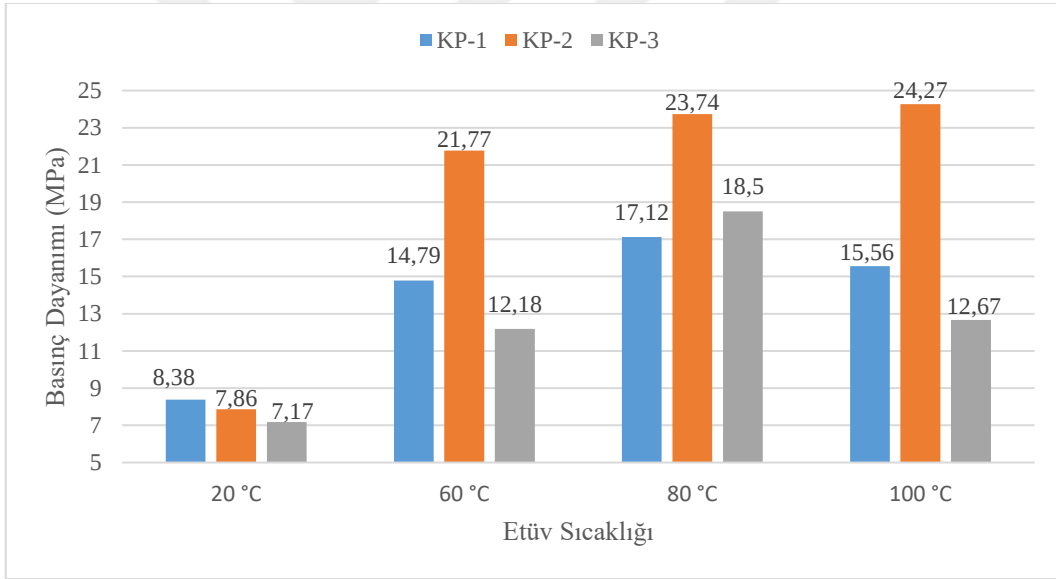
Karışım No	KP-1 (g)	KP-2 (g)	KP-3 (g)
Seramik Tozu	600	480	360
Standart Kum	1500	1500	1500
Yüksek Fırın Cürufu	-	120	240
Sodyum Silikat	228	228	228
Sodyum Hidroksit	114	114	114
Su/ Bağlayıcı Oranı	0,57	0,57	0,57
Akışkanlaştırıcı	9	9	9

Birinci ve ikinci aşamada üretilen tüm karışımlar 50×50×50 mm küp kalıplarda bir gün boyunca priz alana kadar oda koşullarında bekletilmiştir. Priz alan numuneler kalıptan çıkarılıp yanmaz fırın poşetine konularak farklı kür sıcaklıklarında (20, 60, 80 ve 100 °C) 1 gün boyunca bekletilmiştir. 1 gün sonra çıkarılan numuneler basınç deneyine tabi tutulacakları 7. gün olan kırım gününe kadar 20 ± 2 derece nem kabininde bekletilmiştir.

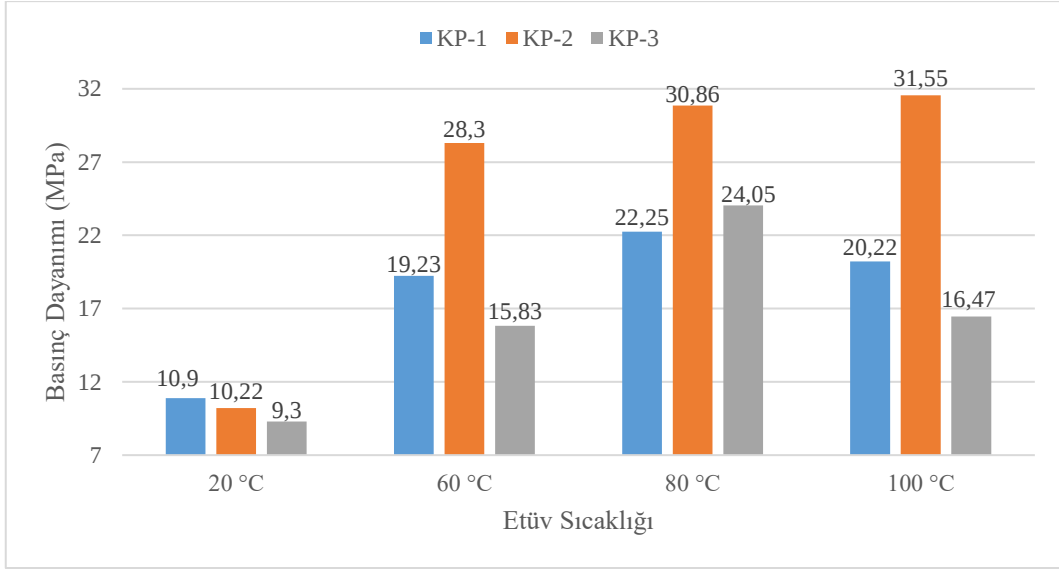
Ön deneylerin birinci aşamasına ait 7. gün basınç dayanımı sonuçları sırasıyla Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31 ve Şekil 3.32’de, ikinci aşamasına ait 7. gün basınç dayanımı sonuçları sırasıyla Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’da gösterilmektedir.



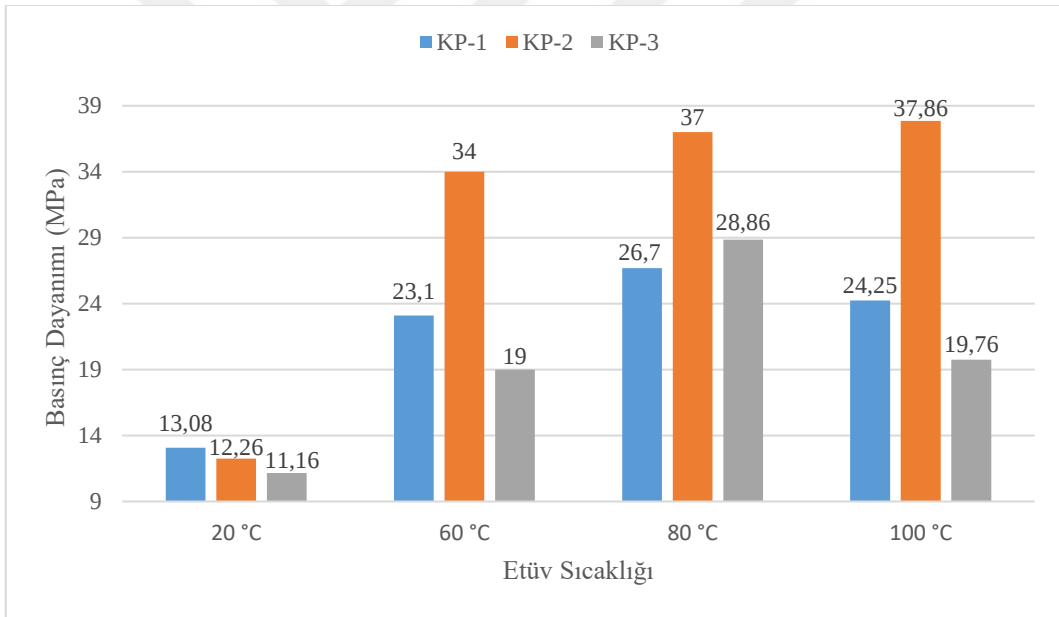
Şekil 3.29 8 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etiv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



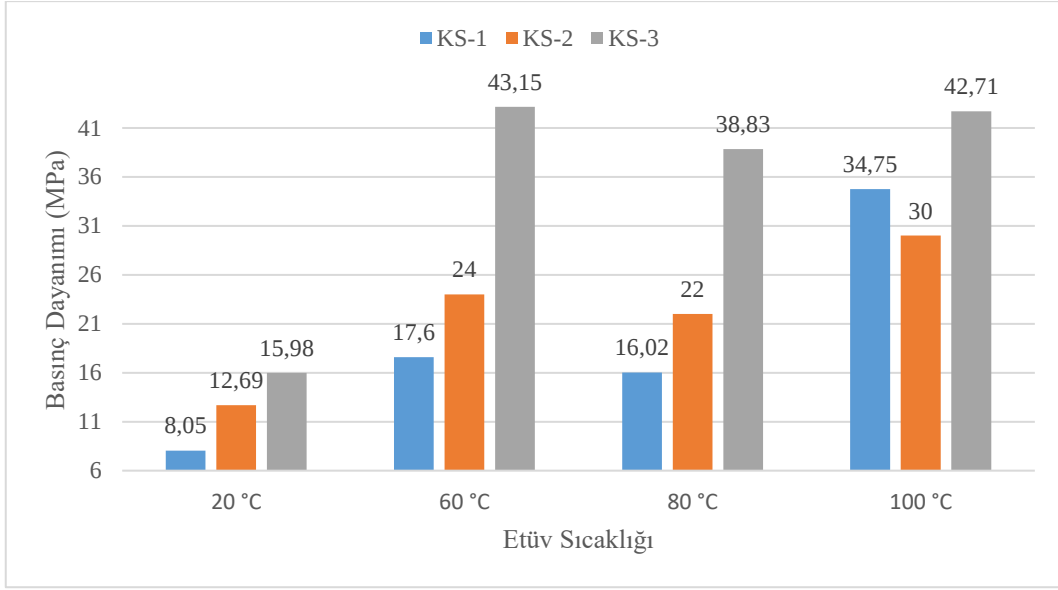
Şekil 3.30 10 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etiv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



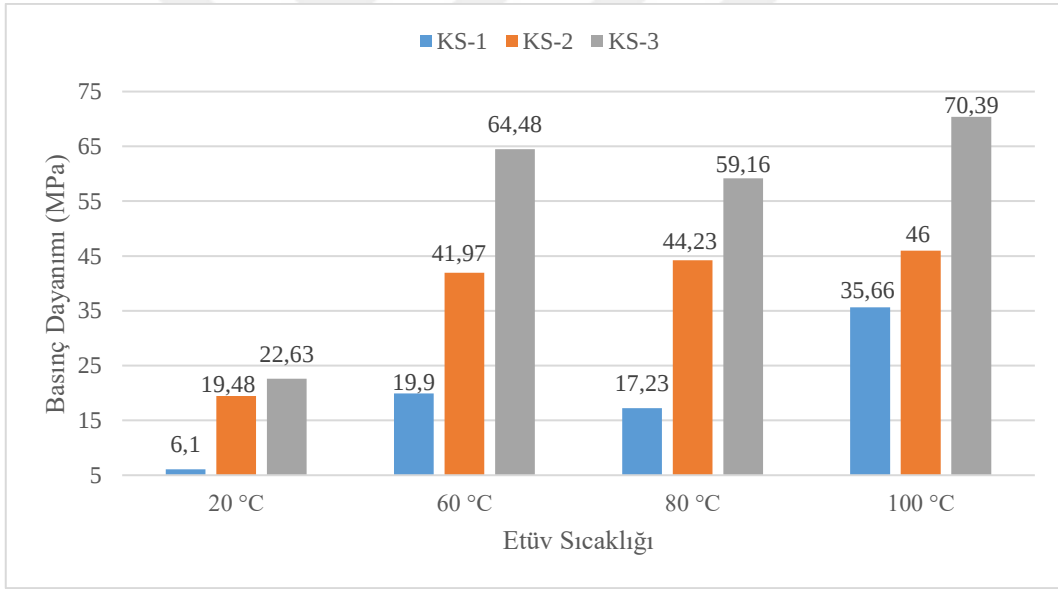
Şekil 3.31 12 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



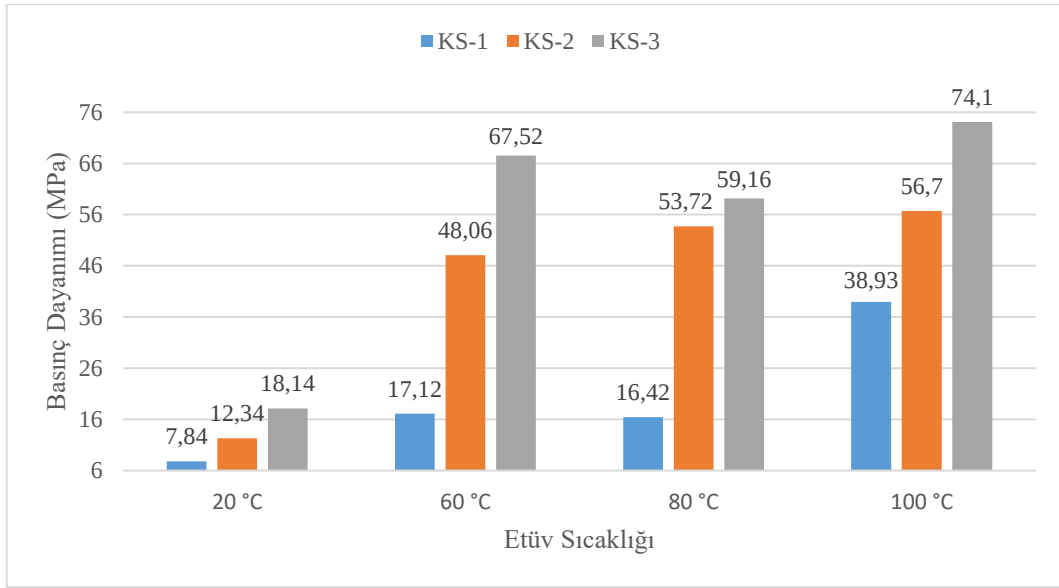
Şekil 3.32 14 Molar KP-1, KP-2 ve KP-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



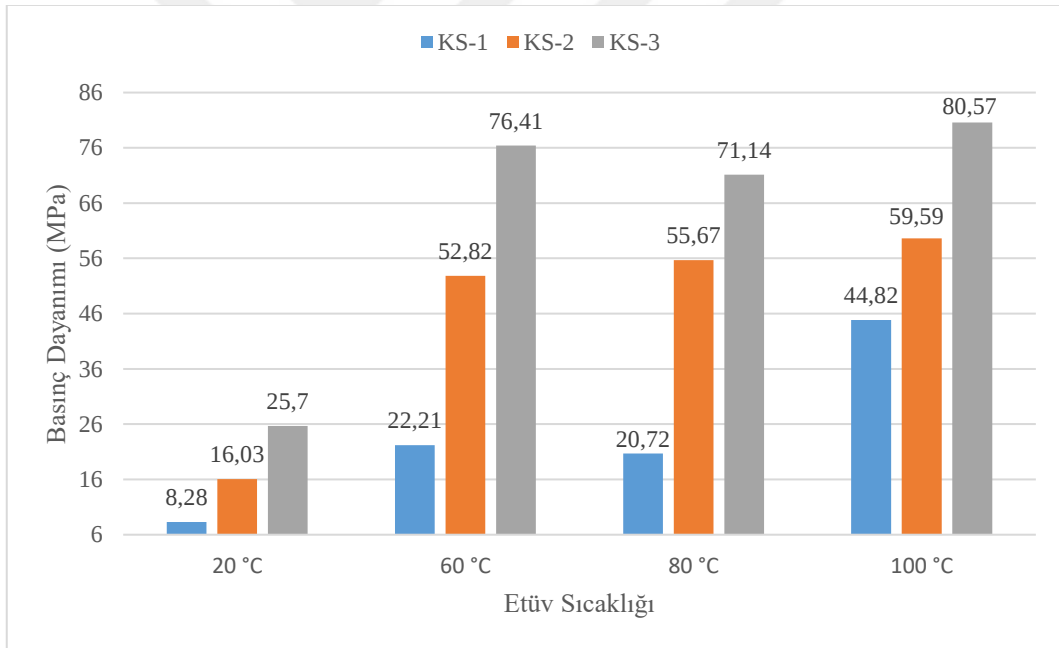
Şekil 3.33 8 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



Şekil 3.34 10 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etüv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



Şekil 3.35 12 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etiv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları



Şekil 3.36 14 Molar KS-1, KS-2 ve KS-3 geopolimer harcın farklı etiv sıcaklıkları sonrası 7. gün basınç dayanımı sonuçları

Ön deneyin birinci ve ikinci aşamasındaki deney sonuçları incelendiğinde, kimyasal aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltilisinin, potasyum silikat ve potasyum hidroksit çözeltilisine göre basınç dayanımlarında daha fazla artışa sebep olduğu ve kimyasal aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan karışımlarda granüle yüksek

fırın cürufu oranının artması ile basınç dayanımlarında da artış olduğu tespit edilmiştir. Karışımların basınç dayanımı sonuçlarındaki kür sıcaklığı etkisi incelendiğinde genellikle kür sıcaklığı artışının basınç dayanımlarında da artışa sebep olduğu, molarite etkisi incelendiğinde ise molarite değişikliğinin farklı karışımlarda farklı sonuçlar doğurduğu yönünde olmuştur.

Üretilen geopolimer harç karışımlarında en yüksek basınç dayanımı değeri olan 80,57 MPa, 100°C etüv sıcaklığına maruz kalan 14 Molar KS-3' e aittir. En yüksek basınç dayanımı değeri her ne kadar 100 °C etüv sıcaklığındaki 14 Molar KS-3' e ait olsa da bazı parametreler göz önüne alındığında kontrol karışımı için bu karışım seçilmemiştir. Genel olarak tüm karışımlara bakıldığında aktivatör olarak sodyum içerikli aktivatörün kullanılmasının tüm serilerde basınç dayanımını arttırdığı yönünde olmuştur. Sodyum hidroksit, sodyum silikat aktivatörleri kullanılarak üretilen üç karışım içerisinde yüksek fırın cürufunun kullanım oranının artması ile basınç dayanımlarında da artış olduğu görülmektedir. Yüksek fırın cürufunun karışımlardaki oranının artması maliyetin ve CO₂ emisyonunun artmasına sebep olacaktır. Bu durum dezeavantaj oluşturduğu için %80 atık seramik tozu %20 cüruf kullanılması daha sürdürülebilir bir seçenek olacağından KS-2 karışımının kullanılmasına karar verilmiştir. Etüv sıcaklığı olarak 100 °C etüv sıcaklığına ve aktivatör molaritesi olarak ise gerek basınç dayanım değerleri gerekse harç numunelerinin kıvamları göz önünde bulundurulduğunda, 10 mol ile devam edilerek kontrol karışımına karar verilmiştir.

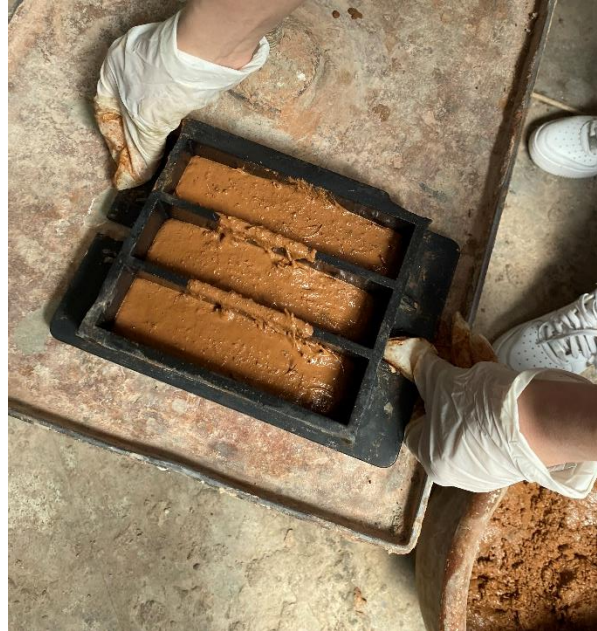
3.4.2 Polipropilen, Bazalt ve Poliamid Lif İçerikli Numunelerin Hazırlanışı

Karıştırma prosedürü sırasında, bağlayıcı olarak kullanılan atık seramik tozu ve granüle yüksek fırın cürufu, bir kaptan iyice karıştırıldıktan sonra alkalın aktivatör olarak daha önceden hazırlanan 10M SH ve SS karışımından oluşan çözeltiye, süper akışkanlaştırıcı eklenerek karışıma ilave edilip karışım 1,5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra dolgu malzemesi olarak kullanılan standart kum ilave edilerek 1,5 dakika daha karıştırılmıştır. Karışımın son aşamasında karışıma lifler ilave edilip tekrar 1,5 dakika karıştırılmıştır. Üretilen harçlar daha sonrasında tabii tutulacakları teste göre üç aşamada farklı kalıplara yerleştirilerek her bir aşamada boşlukların giderilmesi için titreştirilmiştir. Numuneler, oda sıcaklığında priz alana kadar bir gün saklanmıştır. Numuneler bir gün sonra kalıplardan çıkarıldıktan sonra geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak amacıyla 100 °C'de 24 saat fırında

kürlenmiştir. Kürlemenin ardından numuneler test tarihine kadar nem kabininde muhafaza edilmiştir. Kontrol karışımı dahil olmak üzere toplamda 10 adet geopolimer harç serisi üretilmiştir. Tablo 3.17'de farklı serilerde kullanılan tüm malzemelerin miktarları gösterilmektedir.



Şekil 3.37 Poliamid lifli geopolimer harç numunesinin malzeme tartım aşaması



Şekil 3.38 Üç aşamada dökülen ve titreşim tablasında sıkıştırılan poliamid lif içerikli geopolimer harç numunesi



Şekil 3.39 Titreşim tablası üzerinde 3 aşamada dökümü yapılan numune örneği



Şekil 3.40 Farklı boyutlardaki geopolimer harç numuneleri



Şekil 3.41 Kalıptan çıkarılan numunelerden bazıları



Şekil 3.42 Priz alan numunlerin fırın poşeti ile etüv fırınındaki görüntü örneği



Şekil 3.43 Nem kabininde bekleyen numunelerden bazıları



Şekil 3.44 Nem kabini görseli

Tablo 3.17 Üretimi yapılan on seriye ait malzeme bilgileri ve miktarları

		Bağlayıcı (600g)		Dolgu (1500g)	AA (g)		SA (g)	Lifler	
Karışımlar	Karışım No	AST (80%)	Cüruf (20%)	Kum	SH	SS	SA	Hacim %	Ağırlık (g)
Kontrol	K	480	120	1500	114	228	9	0	0
Bazalt Lif Katkılı	BZ0,4	480	120	1500	114	228	9	0,4	10,8
	BZ0,6	480	120	1500	114	228	9	0,6	16,2
	BZ0,8	480	120	1500	114	228	9	0,8	21,6

Tablo 3.17 Üretimi yapılan on seriye ait malzeme bilgileri ve miktarları (devamı)

Karışımlar	Karışım No	AST (80%)	Cüruf (20%)	Kum	SH	SS	SA	Hacim %	Ağırlık (g)
Poliamid Lif Katkılı	PA0,4	480	120	1500	114	228	9	0,4	4,56
	PA0,6	480	120	1500	114	228	9	0,6	6,84
	PA0,8	480	120	1500	114	228	9	0,8	9,12
Polipropilen Lif Katkılı	PP0,4	480	120	1500	114	228	9	0,4	3,64
	PP0,6	480	120	1500	114	228	9	0,6	5,46
	PP0,8	480	120	1500	114	228	9	0,8	7,28

DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

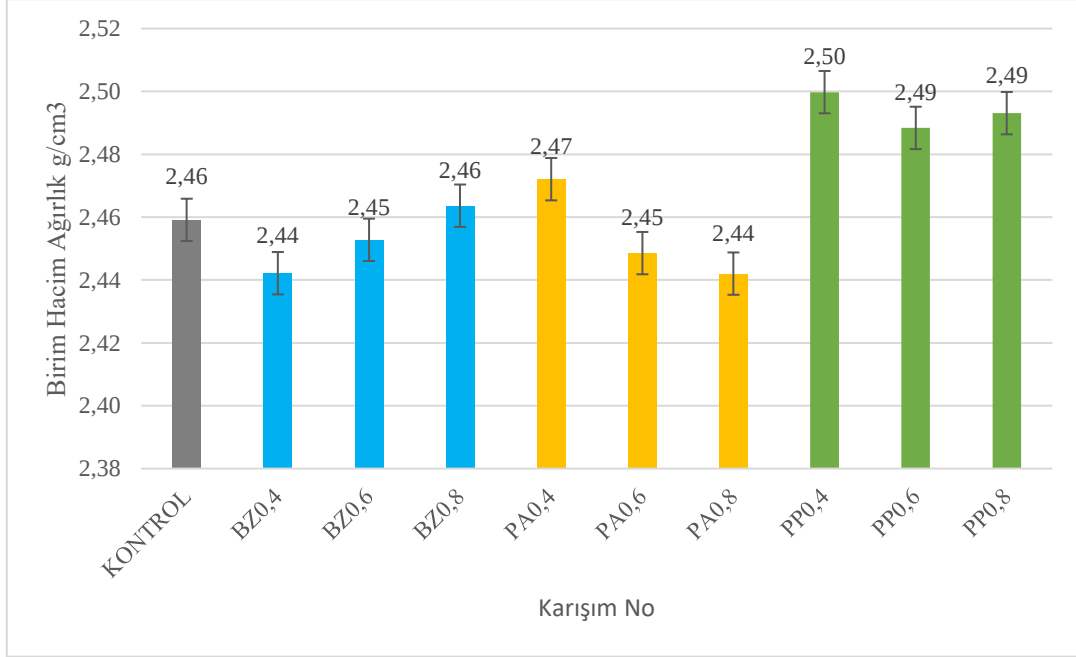
4.1 Fiziksel Özellikler

4.1.1 Birim Hacim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Oranı Sonuçları

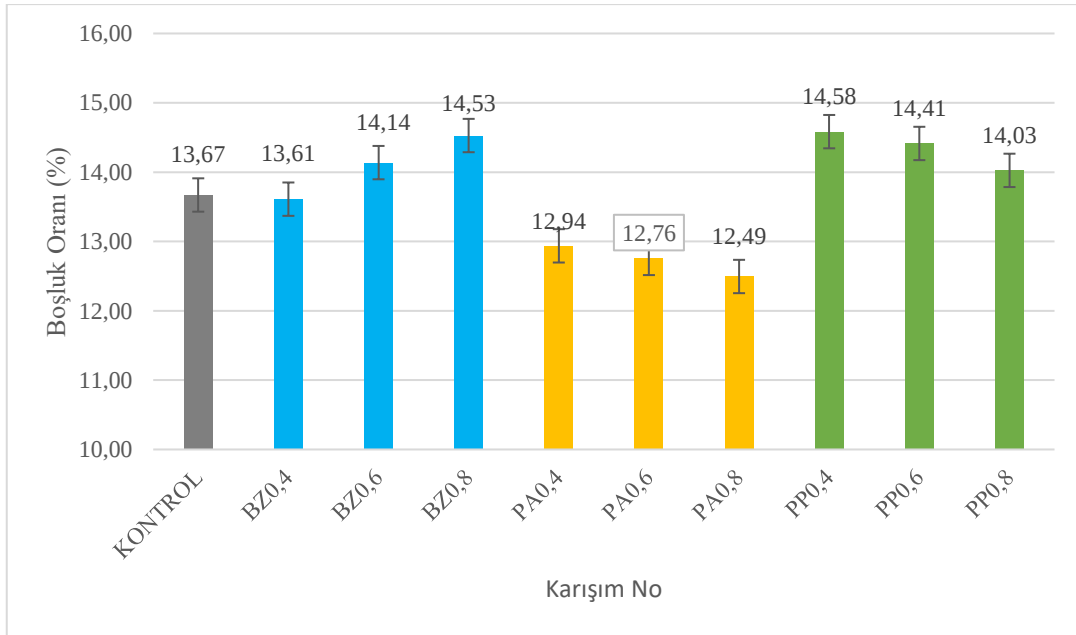
Birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme oranı sonuçları grafiksel olarak sırasıyla Şekil 4.1, 4.2, 4.3' te ve fiziksel özellikleri sonuçlarındaki artış oranları Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında, geopolimer harca BZ ve PA liflerinin eklenmesi, üretilen geopolimer harcın yoğunluğunu önemli ölçüde değiştirmemesine karşın PP liflerin eklenmesi, PP lif takviyeli geopolimer harçların yoğunluklarında %1,63' e kadar bir artışa neden olmuştur. Benzer bulgular Tumadhir, 2013 ve Ali vd., 2020 tarafından da rapor edilmiş olup, çalışmaları sonucunda geopolimer harçta kullanılan BZ liflerinin birim hacim ağırlık üzerinde çok az etkisi olduğu sonucuna ulaşmıştır. Nazir vd., 2023 yaptığı çalışmada PA lifler ile güçlendirilmiş geopolimer harçlarda PA liflerinin birim hacim ağırlık üzerinde fark edilmeyecek kadar az bir etkisinin olduğu sonucuna varmıştır.

AST-GYFC bazlı geopolimer harçlara lif eklenmesi, numunelerin boşluk oranı ve su emmesi üzerinde önemli bir etki göstermemiştir. BZ ve PP lifler ile üretilen geopolimer harç numuneleri kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında bu iki lif türü boşluk oranını sırasıyla %6,29'a ve %6,66'ya kadar arttırken su emmeyi sırasıyla %7,31'e ve %6,22'ye kadar arttırmıştır. PA liflerin, üretilen geopolimer harç numunesinin boşluk oranını ve su emmesini sırasıyla %8,63 ve %9,02'ye kadar azalttığı tespit edilmiştir. Bu bulgular Nazir vd., 2023 ve Kuranlı vd., 2022 tarafından yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Ayrıca su emme ve boşluk oranı değerleri arasında bir ilişki tespit edilmiştir. R^2 'nin (korelasyon faktörü) 0,8'den fazla olması, korelasyonun iyi bir düzeyde olduğunu

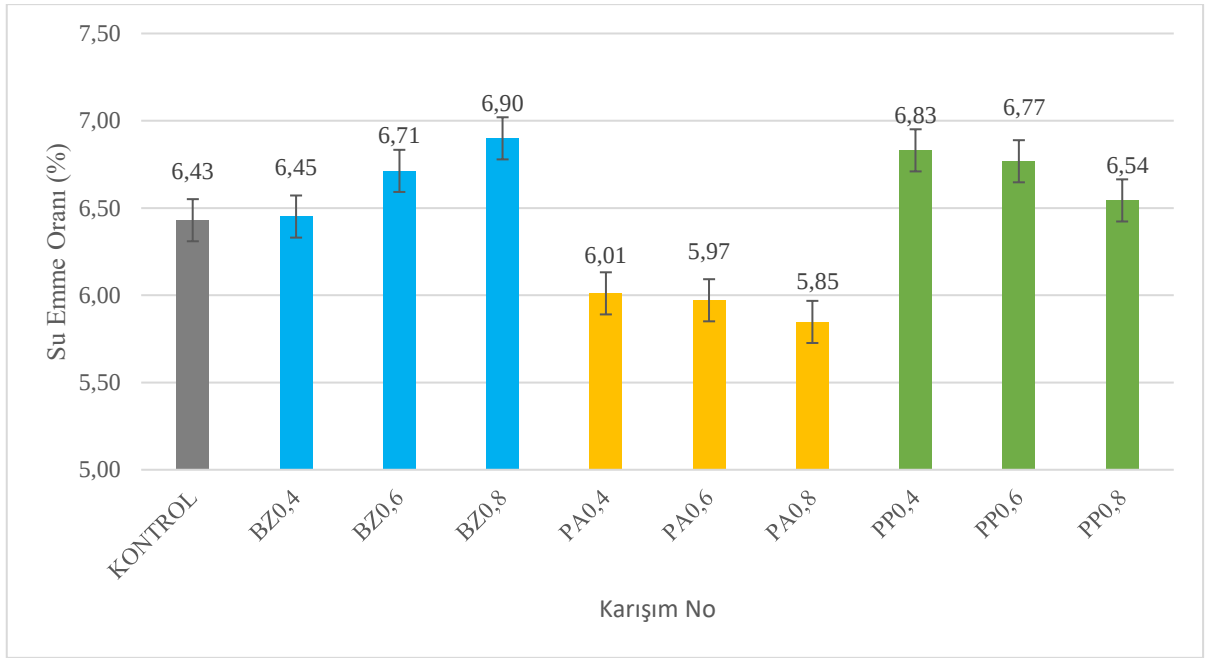
göstermektedir. Bu çalışmadaki boşluk oranı ve su emme korelasyon faktörü 0,9867 olarak hesaplanmış olup bu da iyi düzeyde bir korelasyona işaret etmekte ve araştırma bulgularının geçerliliğini ortaya koymaktadır. Üretilen geopolimer harçların su emme değerleri ile boşluk oranı değerleri arasındaki korelasyon grafiği Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



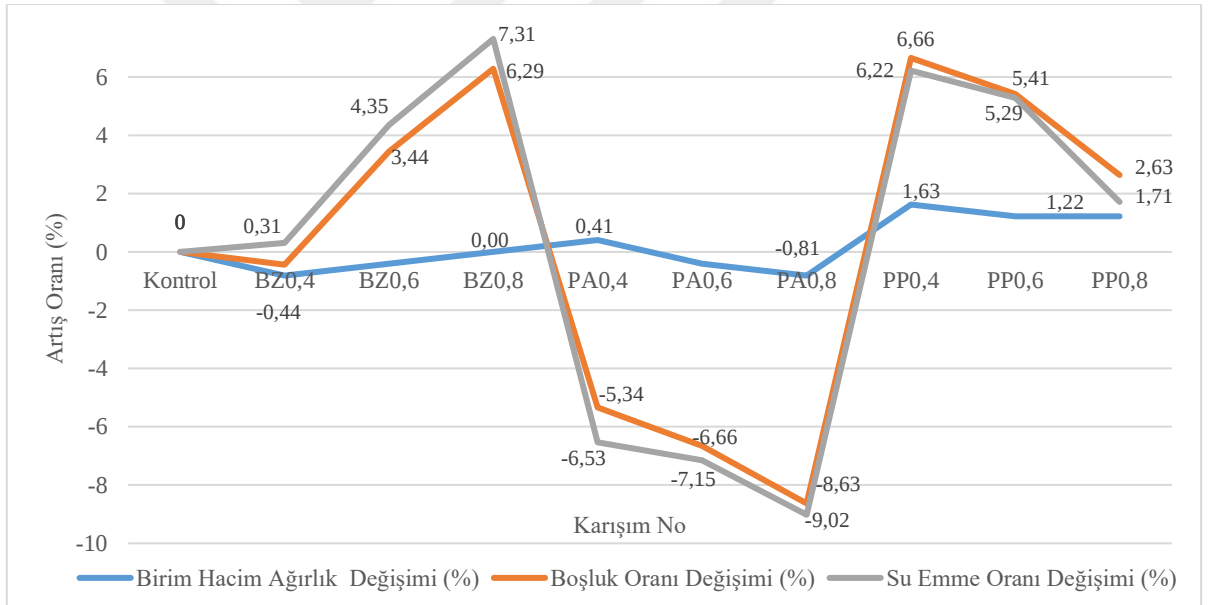
Şekil 4.1 Üretilen geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları



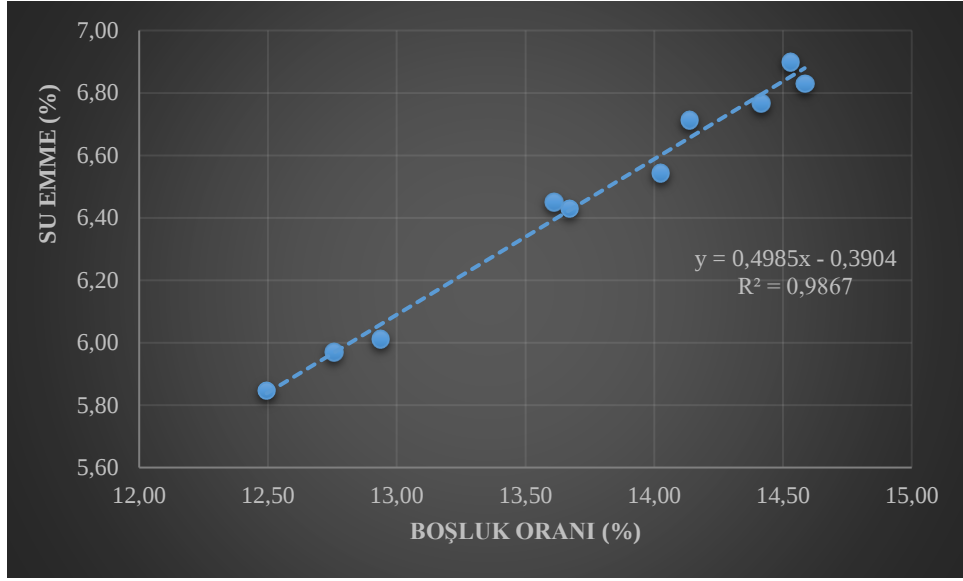
Şekil 4.2 Üretilen geopolimer harçların boşluk oranları



Şekil 4.3 Üretilen geopolimer harçların su emme oranı



Şekil 4.4 Üretilen geopolimer numunelerin fiziksel özelliklerindeki değişim oranları



Şekil 4.5 Su emme ve boşluk oranı arasındaki korelasyon

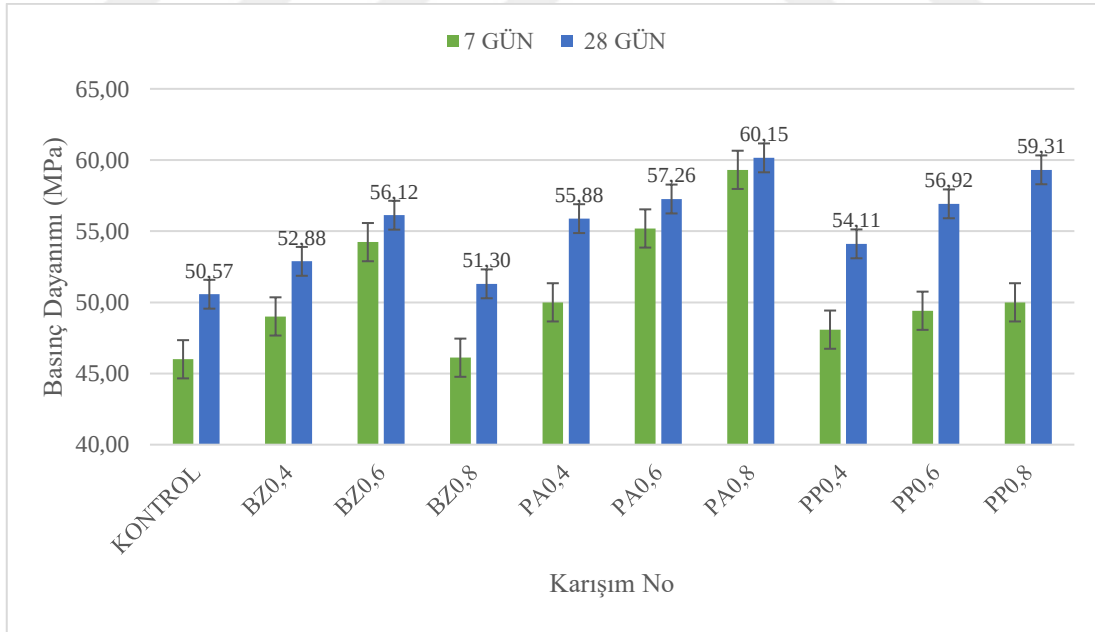
4.2 Mekanik Özellikler

4.2.1 Basınç Dayanımı

7. ve 28. gün sonundaki basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.5'te ve numelerin basınç dayanımı artış oranları (AO) Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Üretilen geopolimer numunelerinin yaşı 7. günden 28. güne çıktıkça, tüm numunelerin basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle, geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımının, yaş artışından olumlu etkilendiğinin vurgulanması önemli olup bu sonuçların daha önceki araştırmalarla uyumlu olduğu görülmüştür (Celik vd., 2018, Nazir vd., 2023, Ali vd., 2020). Atık seramik tozu-cüruf esaslı geopolimer harca lif eklendiğinde, lif ile güçlendirilmiş numunelerin tamamında kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımında bir iyileşme görülmüştür. Maksimum basınç dayanımı, PA lif ile güçlendirilmiş karışımda (60,15 MPa) 28. günde gözlenmiş olup kontrol karışımına (50,57 MPa) kıyasla %18,94'e kadar basınç dayanımında iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca BZ ve PP liflerin, numunelerin 28. gündeki basınç dayanımlarını sırasıyla %10,97 ve %17,28'e kadar arttırdığı görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu gelişmelerin nedeni, liflerin bağlanma dayanımı ve çatlak köprüleme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Kırılmanın başlangıcı ve devamı, bağlanma kuvveti ve lif köprüleme mekanizması tarafından kontrol edilebilir; bu da daha yüksek eksenel yüke neden olarak eksenel yönde kısılma sonucunda basınç dayanımını artırır (Gülşan vd.,2019, Niş vd., 2020). Şekil 4.22'deki SEM

mikrografları, ayrıca matris ve lifler arasında tatmin edici düzeyde bir bağ olduğunu göstermektedir. Ayrıca güçlü bir arayüz bağlantısının geliştiği de mikrograflarda görülmüştür. Ek olarak, SEM mikrograflarında gösterildiği gibi liflerin mikro çatlak oluşumunu durdurmak için kullanılabileceği gösterilmiştir. PA ve PP liflerinin geopolimer harç içerisindeki oranının artması ile basınç dayanımının da arttığı fakat BZ lif oranının %0,6'ya kadar arttırılması ile basınç dayanımında artış gözlemlendiği ve daha sonra azaldığı fark edilmiştir.

Bu çalışmada sonuçlar, lif içeriğiyle orantılı olmamakla birlikte nihai performans, liflerin oryantasyonu, dağılımı ve numuneler içerisindeki düzeninden büyük ölçüde etkilenebilmektedir. Bu durum farklı lif türleri için sonuçlarda bazı farklılıklara sebep olmuştur. Genel olarak, lifler ile güçlendirilen geopolimer harç numunelerinin, lifsiz geopolimer harç numunesinin basınç dayanımı sonuçları ile karşılaştırılarak daha kapsamlı bir çerçeve çizilmiştir. Aynı tür lif içeriğine sahip geopolimer harç numunelerinin kendi içerisinde farklı lif oranları kullanılarak üretilen harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması ile daha anlamlı bulgular ortaya çıkmıştır. Genel olarak tüm lif takviyeli seriler, mekanik performans açısından lif takviyesiz serilerden daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 4.6 Üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları

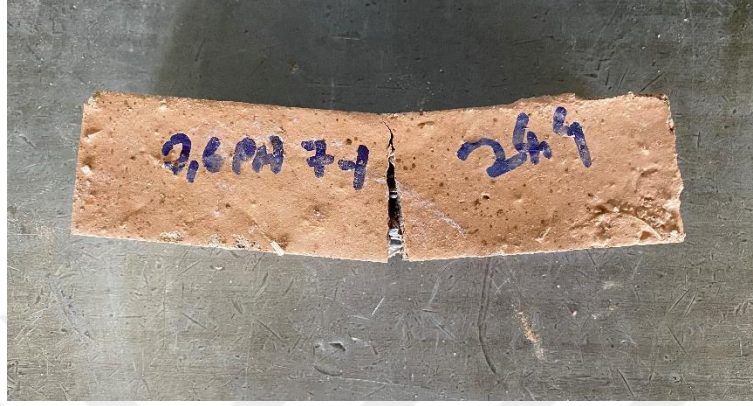


Şekil 4.7 Üretilen geopolimer harçların 7. gün ve 28. günde basınç dayanımlarına ait artış oranları (%)

4.2.2 Eğilme Dayanımı

7. ve 28. gündeki eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.10'da ve numelerin basınç dayanımı artış oranları (AO) ise Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Verilerden, AST-ÖGYFC bazlı geopolimer harcın eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında, geopolimer harçların tüm serilerinde 7. günden 28. güne yaş aldıkça eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Bu bulgu Celik vd.,2018, Nazir vd.,2023 ve Ali vd.,2020 tarafından yapılan önceki çalışmalarla da uyumludur. AST-GYFC esaslı geopolimer harca lif eklendiğinde, lif ile güçlendirilmiş geopolimer numunelerin tamamında eğilme dayanımında artış gözlenmiştir. Maksimum eğilme dayanımı, BZ lif takviyeli karışım (12,98 MPa) ile 28. günde sağlanmış olup kontrol karışımına (10,91 MPa) kıyasla %18,97'ye kadar dayanımın arttığı görülmüştür. Ayrıca, geopolimer harca PA ve PP liflerinin eklenmesi 28. günde eğilme dayanımını, kontrol karışımına göre sırasıyla %11,37 ve %9,07'ye kadar arttırmıştır. Liflerin eklenmesinden kaynaklanan eğilme dayanımındaki bu gelişmeler, Celik vd., 2018 ve Nazir vd., 2023 tarafından geopolimer kompozitler üzerinde yapılan önceki çalışmalarla uyumludur. Ayrıca, lif içeriğinin artmasıyla birlikte lifler, yük altında çatlak yüzeyinin genişlemesini azalttığından, kırılma yüzeyinden geçen daha fazla sayıda lif olması, lif takviyeli tüm karışımların eğilme dayanımında bir artışa sebep olduğu fark edilmiştir. Yükleme sırasında mikro

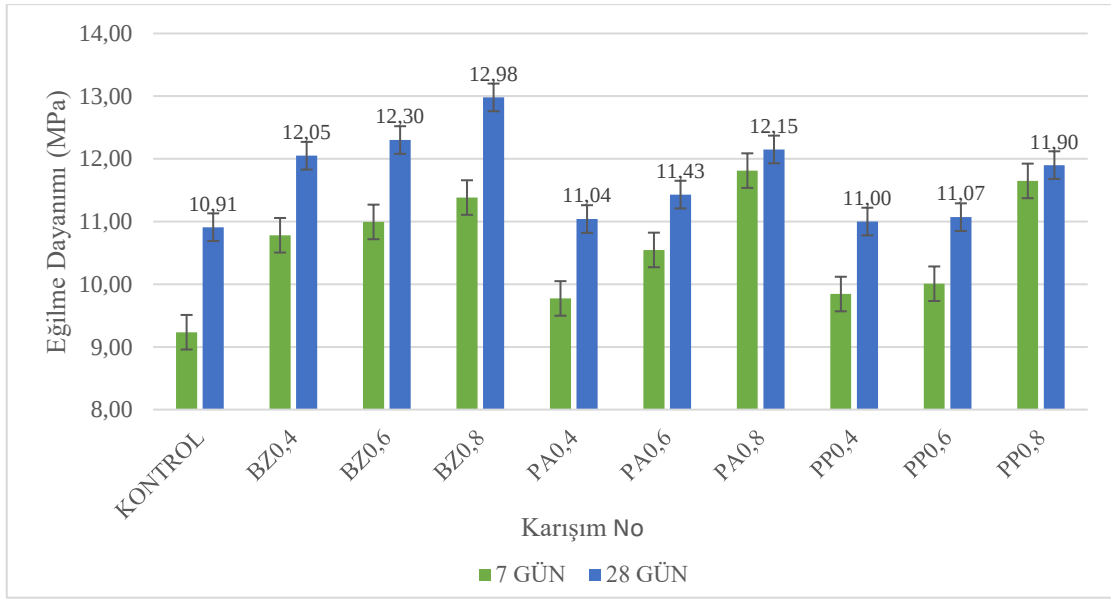
çatlaklar birleşerek daha büyük çatlaklar oluştururken, lifler çatlak yüzeyinin her iki yanını birbirine bağlayarak köprü görevi görmekte ve tepe gerilimini yükseltmektedir. Bu durum, yük taşıma kapasitesinde bir artışa ve eğilme dayanımında iyileşmeye neden olmuştur (Alberti vd., 2014 ve Aygörmez vd., 2020).



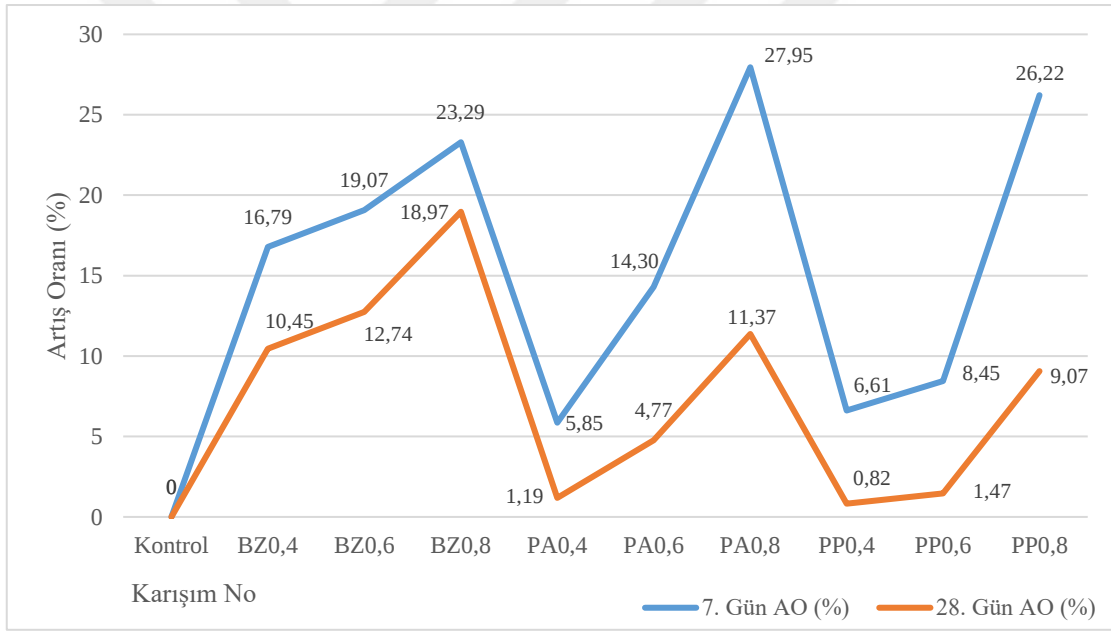
Şekil 4.8 Poliamid lif kullanılan geopolimer harç numunesinde lifin köprüleme etkisine ait görsel



Şekil 4.9 Poliamid lif kullanılan geopolimer harç numunesine ait görsel



Şekil 4.10 Geopolimer harçların eğilme dayanımı



Şekil 4.11 Üretilen geopolimer harçların 7. gün ve 28. günde eğilme dayanımlarına ait artış oranları (%)

4.2.2.1 Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki Korelasyon

GPÇ bazlı betonun eğilme dayanımı (f_r) ve basınç dayanımı (f_c) arasındaki ilişki çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Denklem (4.1) Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) standartlarına göre korelasyonu, denklem (4.2) ise Hint Standartı (IS) standartlarına, göre korelasyonu göstermektedir.

$$f_r = 0.62 f_c^{0.5} \quad (4.1)$$

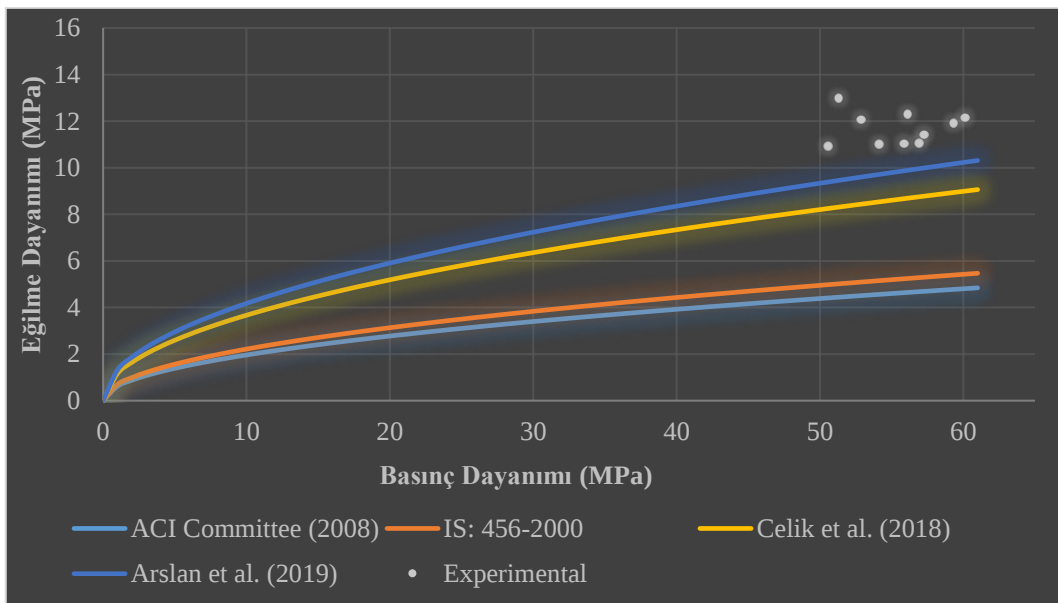
$$f_r = 0.7 f_c^{0.5} \quad (4.2)$$

Geopolimerlerde de çok sayıda çalışma bu korelasyonları geliştirmiştir. Bu çalışmalardaki geopolimer harçların eğilme dayanımı, GPC bazlı beton denklemleri, yani ACI ve IS tarafından sağlanan yaklaşık değerleri aşmıştır. Celik vd., 2018 ve Arslan vd., 2019 'e göre, (4.3) ve (4.4) numaralı denklemler, geopolimer harçların sırasıyla eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ampirik ilişkiyi göstermektedir.

$$f_r = 1.16 f_c^{0.5} \quad (4.3)$$

$$f_r = 1.32 f_c^{0.5} \quad (4.4)$$

GPC bazlı betonun bileşiminin ve sertleşmiş geopolimer betonun matrisinin birbirinden farklı olduğu bilinmektedir. Geopolimer ve GPC bazlı betonun özellikleri arasındaki farkları anlamak önem arz etmektedir. Bu bölümde, çalışmada elde edilen 28. gündeki eğilme dayanımı değerleri GPC tabanlı modellerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bu çalışmadaki geopolimer harcın eğilme dayanımının, GPC bazlı denklemler tarafından sağlanan yaklaşık değerlerden daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar denklem (4.3) ve denklem (4.4) ile uyumlu olmakla birlikte geopolimerlerin geleneksel GPC bazlı betona göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Mevcut korelasyon modelleri ile bu çalışmada elde edilen değerler arasındaki korelasyona ait grafik Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



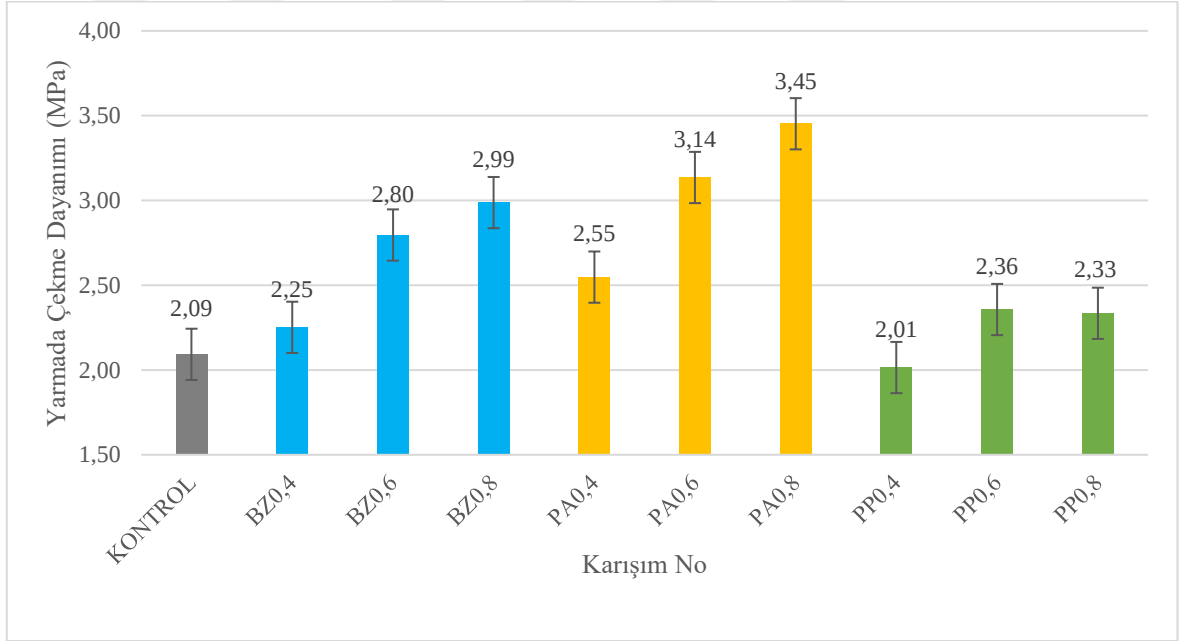
Şekil 4.12 Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon grafiği

4.2.3 Yarmada Çekme Dayanımı

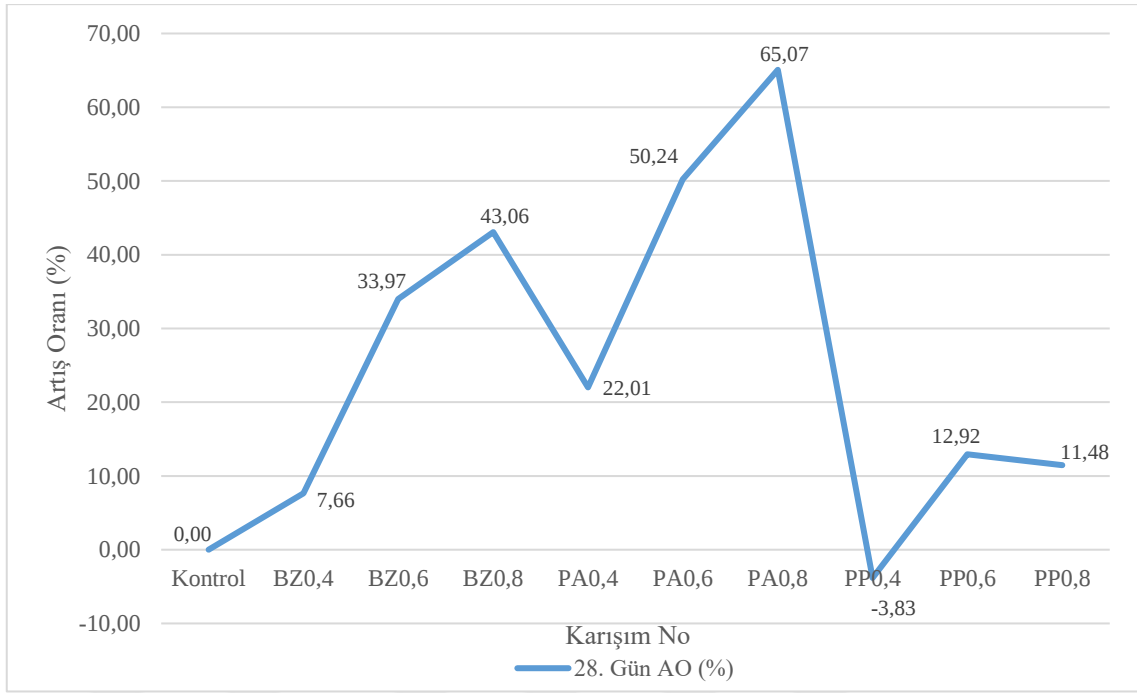
Çekme dayanımı, binalardaki çatlakların boyutu ve derinliği üzerinde büyük etkisi olan, betonun temel ve önemli özelliklerinden biridir. Beton, gevrek bir malzeme olmasından kaynaklı olarak çekme basıncı altında dayanıklı değildir. Sonuç olarak çekme basınçları betonun çekme dayanımından büyük olduğunda kırılmalar oluşmaya başlar. Bu durumda betonun çekme dayanımının belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışma kapsamında üretilen polipropilen lif takviyeli numune örneğine ait görsel Şekil 4.13'te, üretilen geopolimer harçların 28. günde yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.14'te ve artış oranları (AO) Şekil 4.15'te gösterilmektedir. Sonuçlara göre ve önceki araştırmalardan tahmin edildiği gibi, AST-ÖGYFC esaslı geopolimer harçlara lif eklenmesi, takviyesiz kontrol karışımına kıyasla çekme dayanımını önemli ölçüde arttırmıştır. Bu sonuçlar Nazir vd., 2023 ve Uysal vd., 2022 tarafından yapılan çalışmayla da uyumludur. Geopolimer harçlara eklenen lifler, harçların çatlaklara karşı dirençlerini büyük ölçüde arttırdığından ve mikroskobik düzeydeki mikro çatlakları geciktirdiğinden, bu durum yarmada çekme dayanımında iyileşmeye neden olmaktadır (Celik vd., 2018). Yükleme sırasında mikro çatlaklar genişleyerek daha büyük çatlakları oluştururken, lifler iki tarafı birleştirmek ve tepe yükünü artırmak için köprü görevi görmektedir. Bu araştırmada, geopolimer harcın yarmada çekme dayanımında kontrol karışımına kıyasla PA lifler ile %65,07'ye, BZ lifler ile %43,06'ya ve PP lifler ile %12,92'ye kadar iyileşme sağladığı görülmüştür. Ayrıca, BZ ve PA lif miktarlarının artmasıyla yarmada çekme dayanımında artış gözlemlendiği, ancak PP liflerin miktarındaki artışın, yarmada çekme dayanımında %0,6'ya kadar artış sağladığı, %0,8 seviyesinde ise bir miktar azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.13 Polipropilen lif takviyeli numune örneği



Şekil 4.14 Geopolimer harçların yarmada çekme dayanımı sonuçları



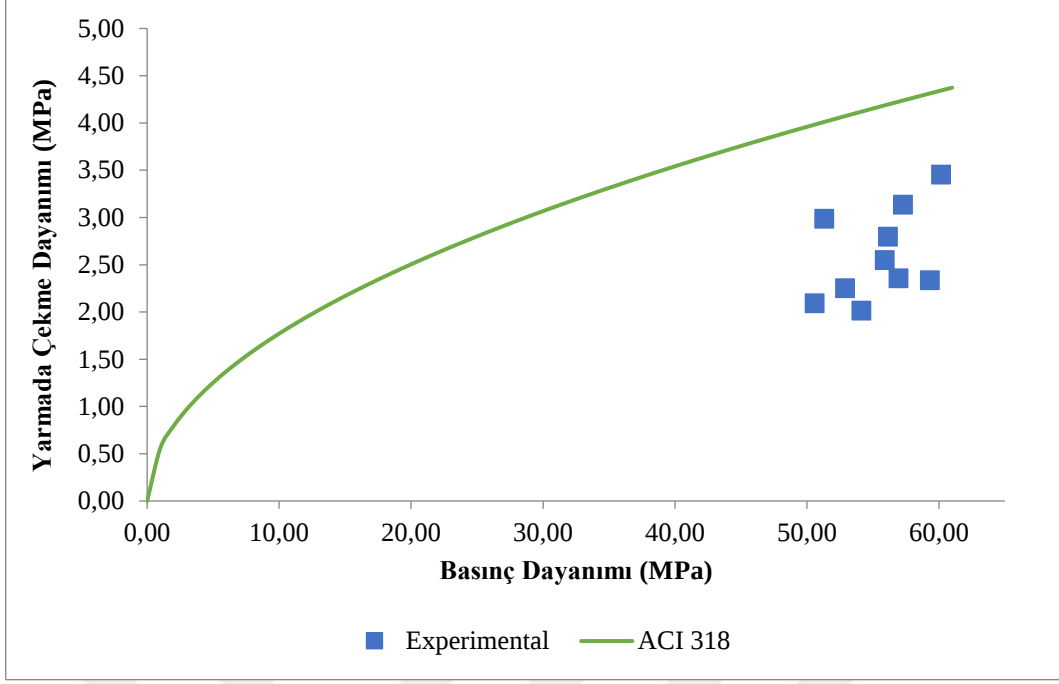
Şekil 4.15 Üretilen geopolimer harçların 28. günde yarmada çekme dayanımlarına ait artış oranları (%)

4.2.3.1 Yarmada Çekme Dayanımı ve Basınç Dayanımı Arasındaki Korelasyon

Çok sayıda araştırma, GPÇ bazlı betonda yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı arasında bir korelasyon kurmuştur. Matris oluşumu açısından sertleşmiş geopolimer beton, GPÇ bazlı betondan farklıdır. Bu çalışmada, AST-GYFC bazlı geopolimer harçların 28. gündeki yarmada çekme dayanımı değerleri, GPÇ bazlı betonun ampirik modeli yani ACI 318 bina kodu ile karşılaştırılmıştır. ACI'ya göre, yarmada çekme dayanımı (f_{ct}), betonun basınç dayanımı (f_c) denklem (4.5)'te gösterildiği gibi tahmin edilebilir.

$$f_{ct} = 0.56 f_c^{0.5} \quad (4.5)$$

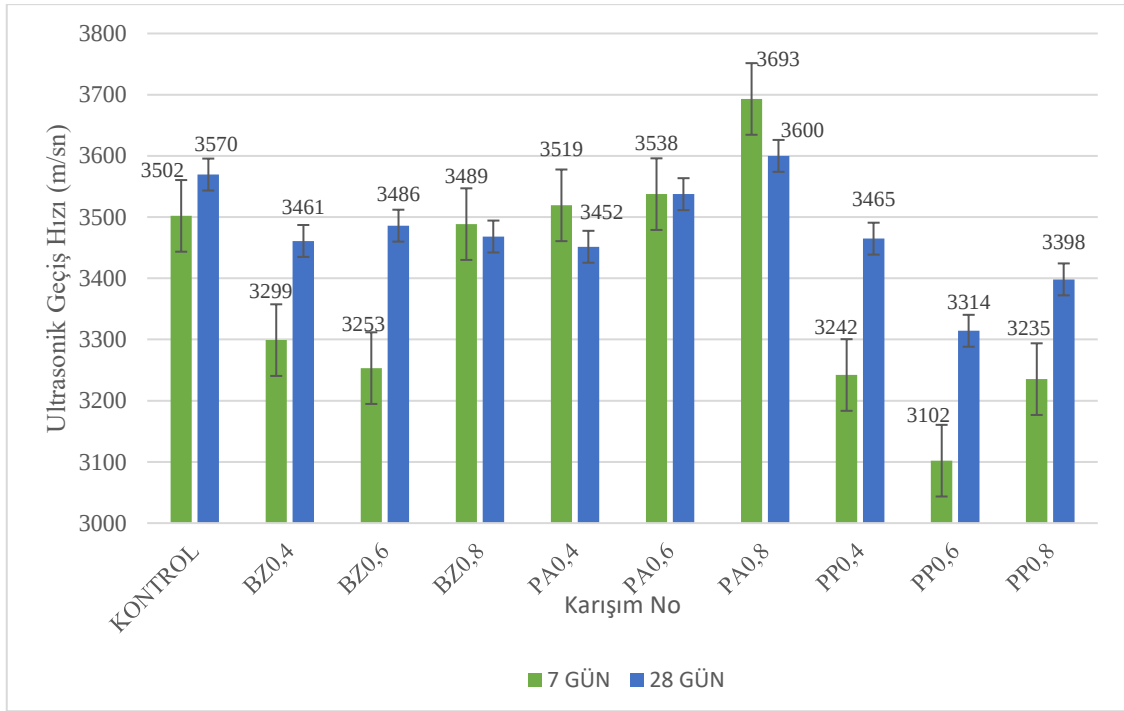
Şekil 4.16, yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki korelasyona ait grafiği göstermektedir. Grafikten, AST-ÖGYFC bazlı geopolimer harçların yarmada çekme dayanım değerlerinin denklem (4.5)'e göre tahmin edilen değerlerden daha düşük olduğunu göstermekte olup bu bulgular, Nazir vd., 2023 tarafından yapılan geopolimer harç üzerine yapılan önceki çalışma ile uyumludur.



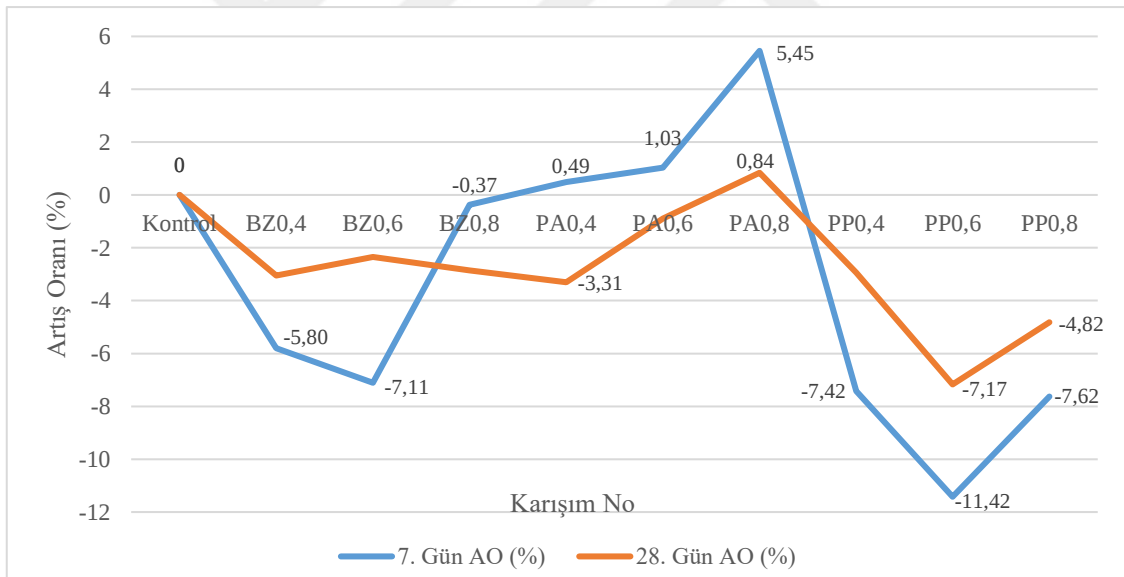
Şekil 4.16 Yarmada çekme dayanımı ve basınç dayanımı arasındaki korelasyon

4.2.4 Ultrasonik Geçiş Hızı

Geopolimer harç matrisinin homojenliğini değerlendirmek için tahribatsız UGH deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada üretilen geopolimer harçların 7. ve 28. gündeki UGH değerleri grafiksel olarak Şekil 4.17’de ve numelerin UGH değerleri artış oranları (AO) ise Şekil 4.18’de gösterilmektedir. 28. günde UGH testi verileri analiz edilerek, liflerin, harç numunelerinin dalga akışını etkilediği ve referans numuneye kıyasla lif takviyeli numunelerin UGH’sini azalttığı için matrisin homojenliğini ve kompaktlığını etkilediği görülmüştür. Bu bulgu, Celik vd., 2018 tarafından lif takviyeli geopolimer harçlar üzerinde yapılan önceki araştırmalarla uyumludur. UGH sonuçları mikroyapısal kusurlardan ve bozulmalardan etkilenmektedir. Lif takviyeli numunelerin UGH değerleri, kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında daha yüksek boşluk oranı değerleri ve düşük UGH değerleri göstermesi nedeniyle bu araştırmanın bulgusu bu ifadeyi desteklemektedir.



Şekil 4.17 Geopolimer harçların ultrasonik geçiş hızı değerleri

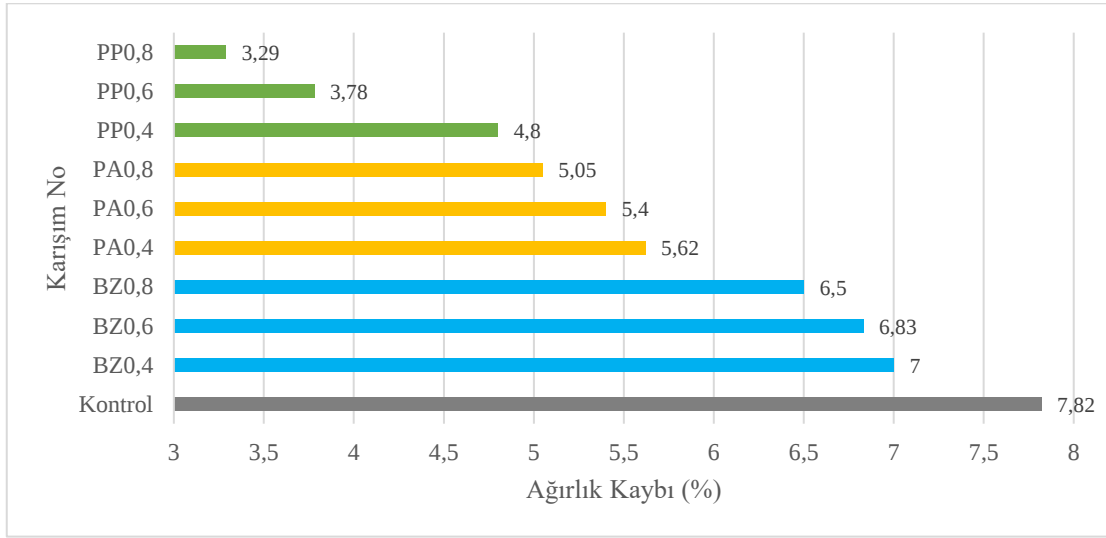


Şekil 4.18 Üretilen geopolimer harçların 7. ve 28. günde ultrasonik geçiş hızı değerlerine ait artış oranları (%)

4.2.5 Aşınma Direnci

Geopolimer harç numunelerinin 28. günde aşınma direnci sonuçları, ağırlık kaybı yüzdesi cinsinden Şekil 4.19'da grafiksel olarak gösterilmektedir. Lif takviyeli numunelerin tümü, takviyesiz numuneyle karşılaştırıldığında aşınmaya karşı daha fazla direnç göstermiştir. Aşınmaya karşı maksimum direnç, %3,29 oranı ile PP lif

takviyeli numunelerde, ardından sırasıyla %5,05 PA ve %6,5 BZ lif takviyeli numunelerde gösterilmiştir. Lif yüzdesinin artmasıyla birlikte ağırlık kaybında aşınmaya karşı daha fazla direnç gözlenmiştir. Bunun nedeni, geopolimer harçtaki liflerin varlığının aşınmaya karşı daha dayanıklı bir tabaka oluşturması, bunun sonucunda daha az uzunluk değişimi ve ağırlık kaybı oluşması gösterilebilir (Al-mashhadani vd.,2018). Çalışmaya göre, betonun dayanımı ve aşınma direncinin doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir (Binici vd., 2018). Bu araştırmada, tüm lif takviyeli karışımlar, takviyesiz kontrol karışımına kıyasla daha iyi dayanım özellikleri göstermiştir. Bu bulgular, araştırmada elde edilen sonuçların doğruluğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.19 Aşınma testi sonrası geopolimer harç numunelerinin ağırlık kaybı sonuçları

4.2.6 Yüksek Sıcaklık

Tablo 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı sonuçları

Karışım No	Sıcaklık (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ağırlık Kaybı (%)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)
KONTROL	100	50,57	10,91	0	3570

Tablo 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı sonuçları (devamı)

	250	46,97	8,77	0,46	3497
	500	40,25	5,20	3,03	2837
	750	29,81	3,40	4,50	2194
BZ0,4	100	52,88	12,05	0	3461
	250	49,79	11,84	0,41	3546
	500	45,18	5,39	2,85	2513
	750	28,44	3,35	4,38	2026
BZ0,6	100	56,12	12,30	0	3486
	250	52,79	12,00	0,42	3571
	500	46,39	6,23	3,00	3650
	750	30,7	3,77	4,50	2360
BZ0,8	100	51,3	12,98	0	3468
	250	50,96	11,91	0,40	3546
	500	47,81	5,60	3,42	3080
	750	28,72	3,61	4,90	2043
PA0,4	100	55,88	11,04	0	3452

Tablo 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı sonuçları (devamı)

PA0,4	250	52,34	8,70	0,61	3521
	500	39,90	5,32	3,82	2809
	750	23,63	2,39	5,03	1826
PA0,6	100	57,26	11,43	0	3538
	250	54,31	9,00	0,68	3571
	500	41,12	6,12	4,00	2930
	750	28,19	3,02	5,15	2097
PA0,8	100	60,15	12,15	0	3600
	250	57,42	11,55	0,62	3623
	500	46,77	6,54	4,39	2937
	750	30,14	3,30	5,71	2289
PP0,4	100	54,11	11,00	0	3465
	250	50,68	10,76	0,52	3425
	500	36,98	4,80	3,15	2358
	750	22,49	1,83	4,41	1621
PP0,6	100	56,92	11,07	0	3414

Tablo 4.7 Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı sonuçları (devamı)

PP0,6	250	54,58	10,92	0,69	3521
	500	40,74	5,41	3,66	2735
	750	23,38	2,48	4,59	1754
PP0,8	100	59,31	11,9	0	3498
	250	56,06	11,09	0,74	3356
	500	44,2	5,86	3,68	2826
	750	25,74	3,98	4,94	2025



Şekil 4.20 Yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce eğilme numuneleri

Literatür araştırması yapıldığında, geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması sırasında sıcaklığa bağlı olarak yüksek miktarlarda su kaybı gerçekleşmektedir. Su kaybından ötürü gerçekleşen termal büzülmede gözle görülür bir şekilde artış meydana gelmektedir. Termal büzülmedeki artışın da

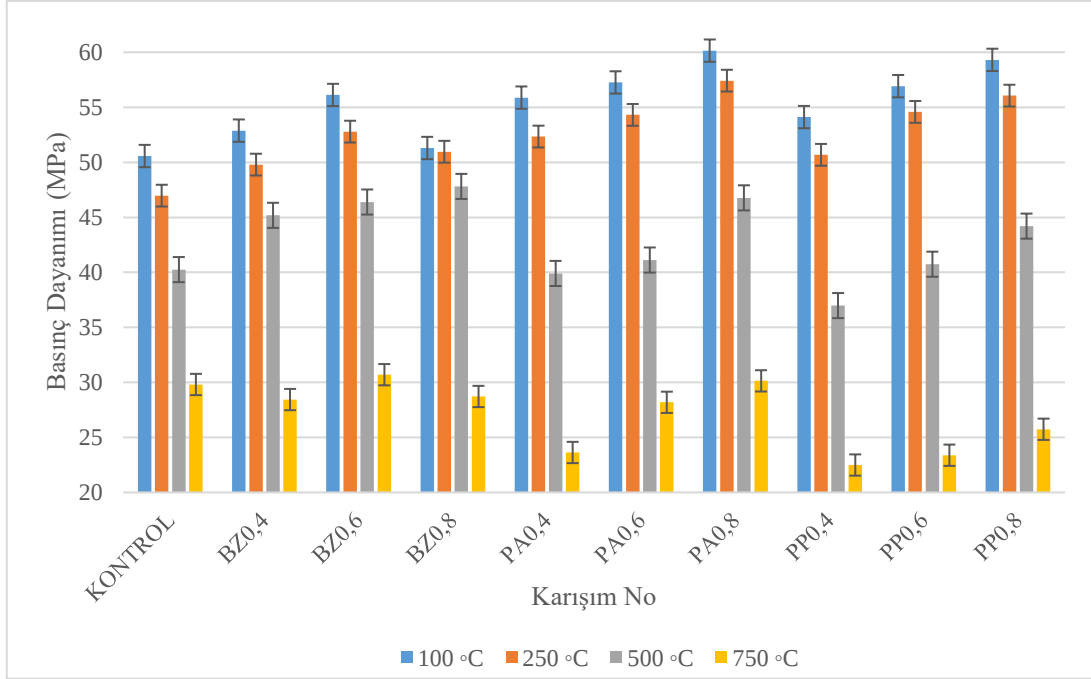
mekanik özellikleri olumsuz etkilediği bulunmuştur (Hu vd., 2009). Ayrıca, yüksek sıcaklıklara maruz kalan geopolimer harçların, macun ile agrega arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinde, termal uyumsuzluklara yol açan mikro çatlaklar oluşturmaktadır (Jiang vd., 2020).

Çalışma kapsamında, tüm geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4.7’de gösterilmektedir.

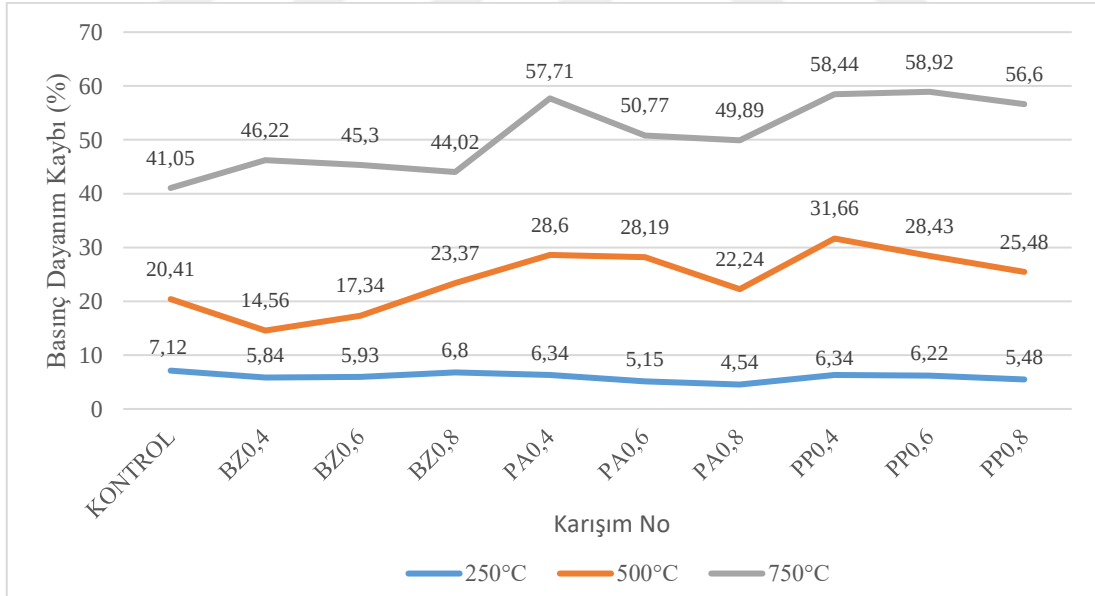
Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Numunelerin basınç dayanımı kaybı, lif takviyesiz kontrol karışımı için %7,12 ile %41,05 değerleri arasında lif takviyeli karışımlardan BZ lif takviyeli karışım için %5,84 ile %46,22, PA lif takviyeli karışımlar için %4,54 ile %57,71 ve PP lif takviyeli karışımlar için % 5,48 ile %58,92 arasında olmuştur (Şekil 4.22). Lif katkısız geopolimer numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımları kayıp oranları ile lif katkılı geopolimer numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımlarındaki kayıp oranları kıyaslandığında, lif katkılı geopolimer numunelerin basınç dayanım kayıpları, kontrol karışımı olan lifsiz geopolimer numunelerinin basınç dayanım kayıplarına göre sıcaklık artışı ile daha fazla artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuçlar, Aygörmez, 2018 çalışması ile de desteklenmektedir.

Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.23’te gösterilmiştir. Numunelerin eğilme dayanımı kaybı, lif takviyesiz kontrol karışımı için % 19,66 ile % 68,85 değerleri arasında lif takviyeli karışımlardan BZ lif takviyeli karışımlar için % 1,78 ile % 72,19, PA lif takviyeli karışımlar için %4,54 ile %78,35 ve PP lif takviyeli karışımlar için %1,34 ile %83,38 değerleri arasında olmuştur (Şekil 4.24). Yüksek sıcaklık etkilerinin basınç dayanımı sonuçlarındaki değişim oranları ile eğilme dayanımı sonuçlarındaki değişim oranları kıyaslandığında eğilme dayanımı sonuçlarının sıcaklık arttıkça daha yüksek oranda azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak sıcaklık arttıkça numunelerdeki eğilme dayanımının iç mikroyapı kusurlarının daha fazla ortaya çıkması olarak gösterilebilir (Zhang vd., 2015). Eğilme dayanımı, mikroyapısal kusurlara karşı (oluşan çatlakların yayılması ve yüksek sıcaklıklar altında oluşan

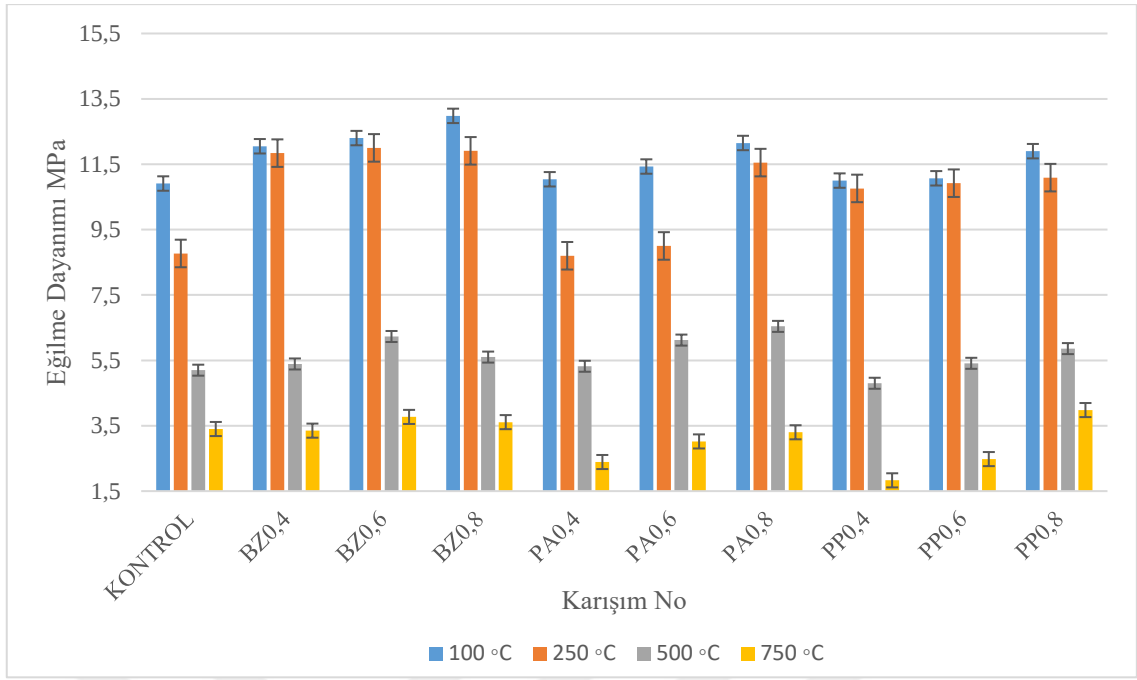
boşluklu yapıların büyümesi gibi) daha fazla duyarlıdır (Aygörmez vd., 2020 ve Zhang vd., 2016).



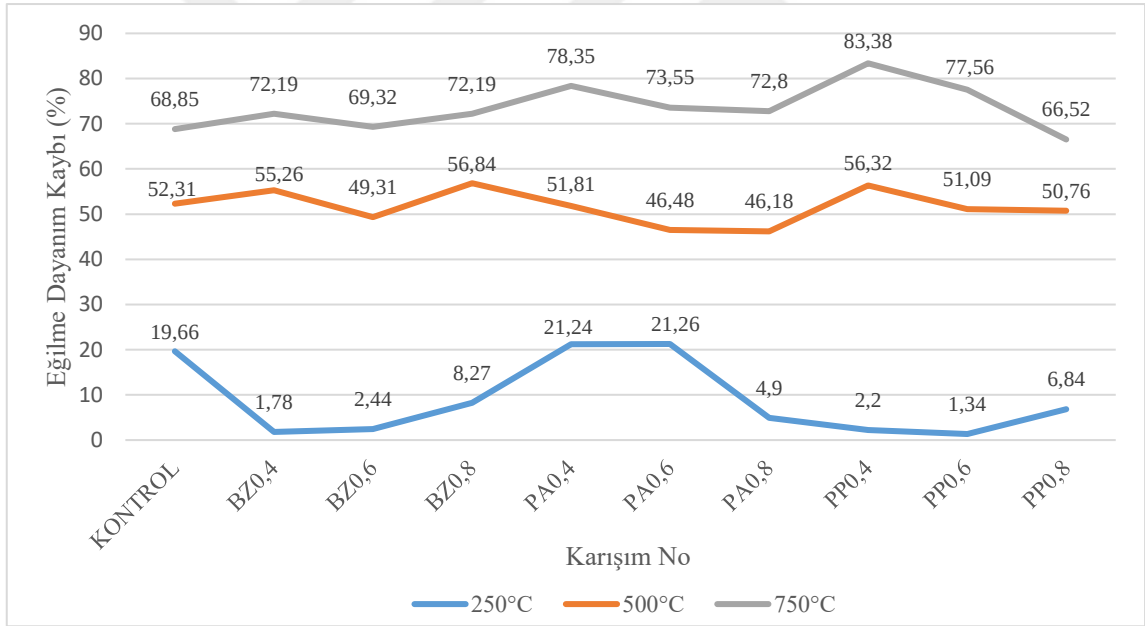
Şekil 4.21 Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım değerleri



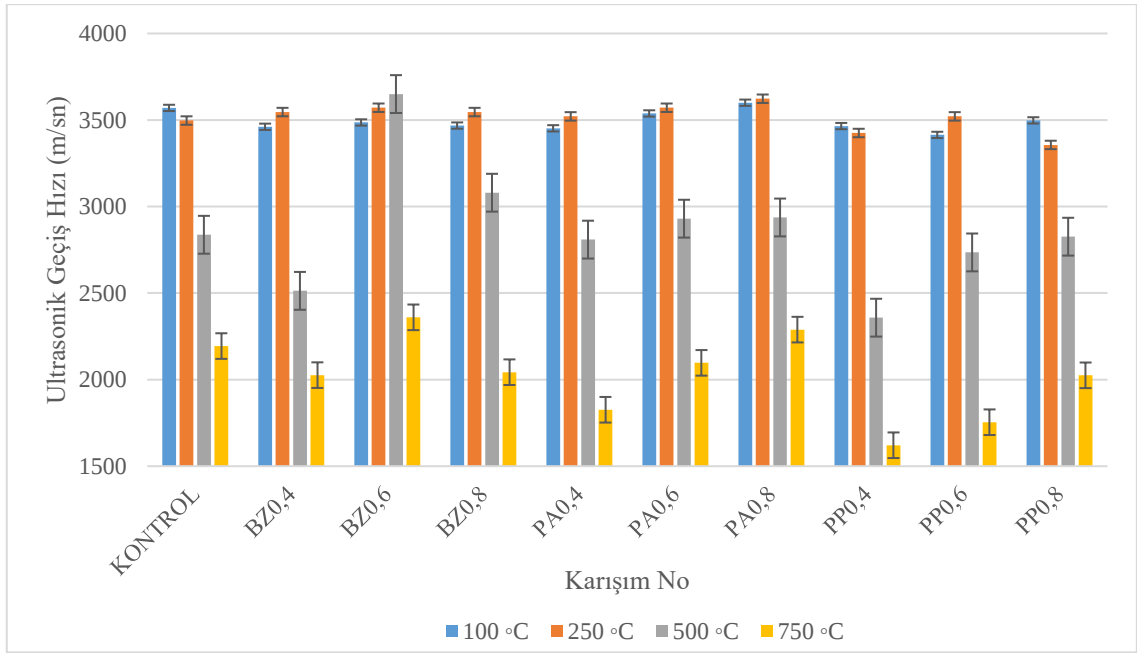
Şekil 4.22 Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım kaybı oranları



Şekil 4.23 Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin eğilme dayanımı değerleri

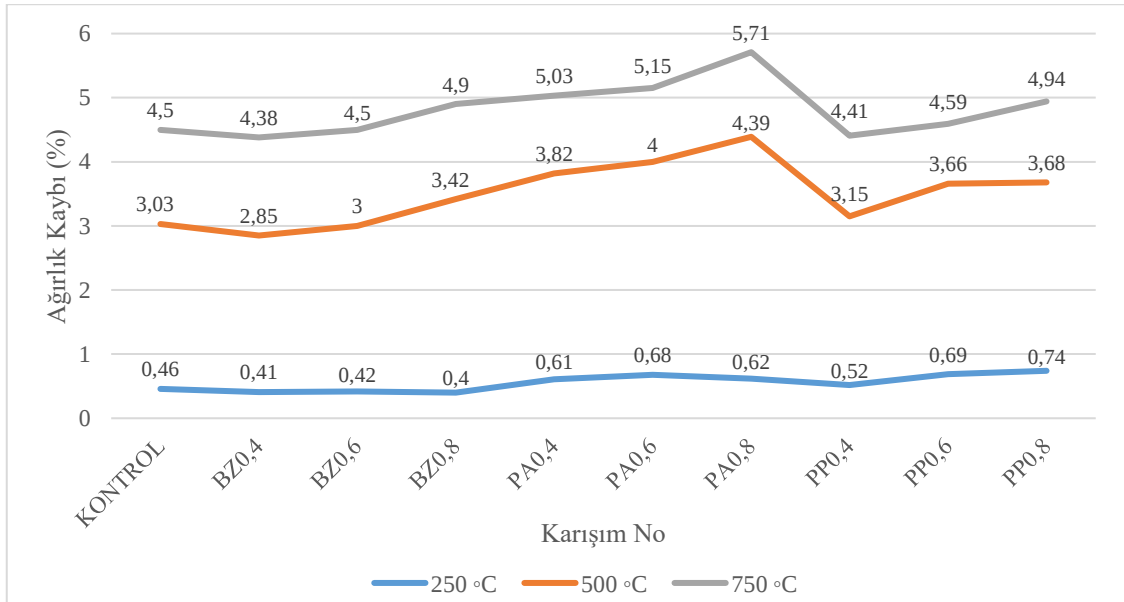


Şekil 4.24 Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin eğilme dayanım kaybı oranları (%)



Şekil 4.25 Yüksek sıcaklık sonrası ultrasonik geçiş hızı değerleri

Geopolimer kompozitlerde sıcaklık arttıkça, dehidrasyon reaksiyonu meydana gelerek nem kaybı oluşmakta, bu durum mikroyapıda iç hasar oluşmasına ve dolayısıyla geopolimer numunelerinde ağırlık kaybı meydana gelmesine yol açmaktadır (Kong vd, 2007).



Şekil 4.26 Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin ağırlık kaybı oranları (%)

Literatürde, yüksek sıcaklık deneyleri sırasında geopolimer harçtaki ağırlık kaybına neden olan üç faktörden bahsedilmektedir. Bunlar; birinci neden olarak asimile edilen suyun 30°C ile 210°C arasında buharlaşmasına bağlı olarak gerçekleşen

fiziksel ağırlık kaybıdır. 210°C ile 400°C sıcaklık aralığında yan zincirlerin bozulması meydana gelir; bu da ağırlık kaybına neden olan ikinci faktörü temsil etmektedir. Üçüncü faktör ise, 400 °C ile 500 °C arasında polimer zincirlerin önemli miktarda bozunarak ağırlık kaybına neden olmasıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıklar, hamur ile agrega arasındaki bağı zayıflatmakta ve bu da ağırlık kaybına neden olmaktadır (He vd., 2010 ve Kong vd., 2007).

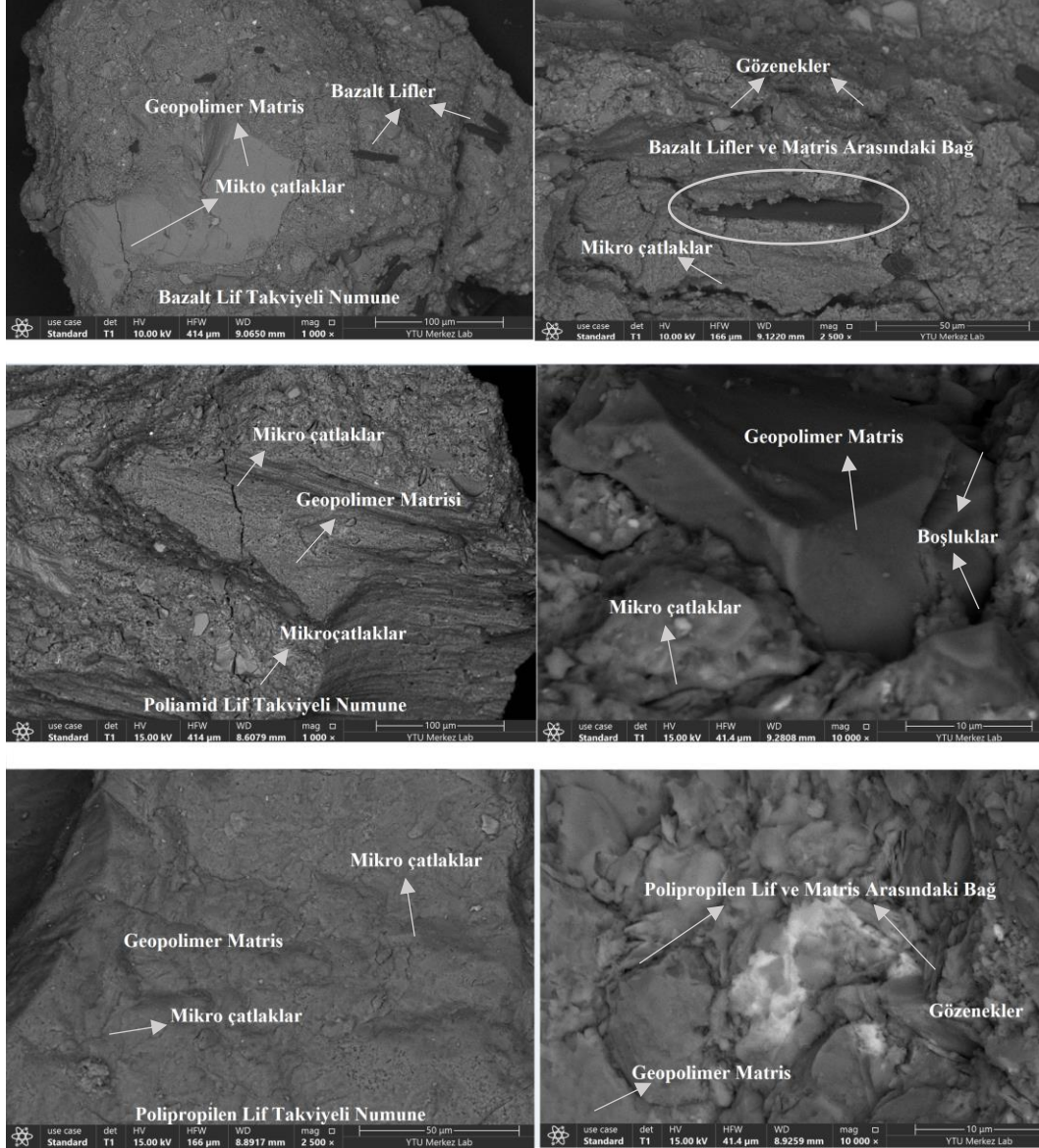
Geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra geopolimer harçtaki ağırlık kaybı sonuçları Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Numunelerin 250°C'ye maruz kaldıktan sonra gerçekleşen ağırlık kayıplarının oldukça düşük değerlerde ve numuneler arasındaki ağırlık kaybı değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Lif katkılı ve lif katkısız tüm numunelerde özellikle 500 °C ve 750 °C'ye maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybı değerlerinde ciddi artışlar yaşanmaya başlamıştır. Özellikle bu iki sıcaklık değeri için lif türleri içerisinde poliamid lif kullanılarak üretilen numunelerde daha fazla ağırlık kaybı yaşandığı görülmüştür. Lif takviyeli numuneler içerisinde ağırlık kaybı bazında en iyi sonuç BZ life aittir. Özellikle ağırlıkça %0,4 ve %0,6 oranlarında harç karışımlarında kullanılması, lif takviyesiz kontrol numunesine göre yüksek sıcaklıklara karşı daha fazla direnç göstermiştir. Genel itibarıyla üretilen tüm geopolimer harç numunelerinin sıcaklık artışı ile ağırlık kayıplarının da arttığı görülmüştür.

4.3 Mikroyapı İncelemesi

4.3.1 SEM Analizleri

Üretilen lif takviyeli geopolimer harçların mikro yapısını ve matris ile lifler arasındaki bağları analiz etmek için SEM analizleri yapılmıştır. Bazalt, poliamid ve polipropilen lifle güçlendirilmiş numunelerin 28. günün sonunda çeşitli büyütme ölçeklerindeki mikrografları, Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Genel olarak, AST ve GYFC içerikli tüm numunelerin, etkili bir jeopolimerizasyona sahip olduğunu gösteren yoğun bir mikro yapı sergilediği gözlenmiştir. Geopolimer kompozitlerde mikro çatlakların varlığı olağan karşılanmaktadır (Allaoui vd., 2022). SEM mikrograflarında da bazı boşluklar ve mikro çatlaklar görülmüştür. SEM mikrografları ayrıca liflerin geopolimer matrisine düzgün bir şekilde gömüldüğünü ve bunun da mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açtığını göstermiştir. SEM

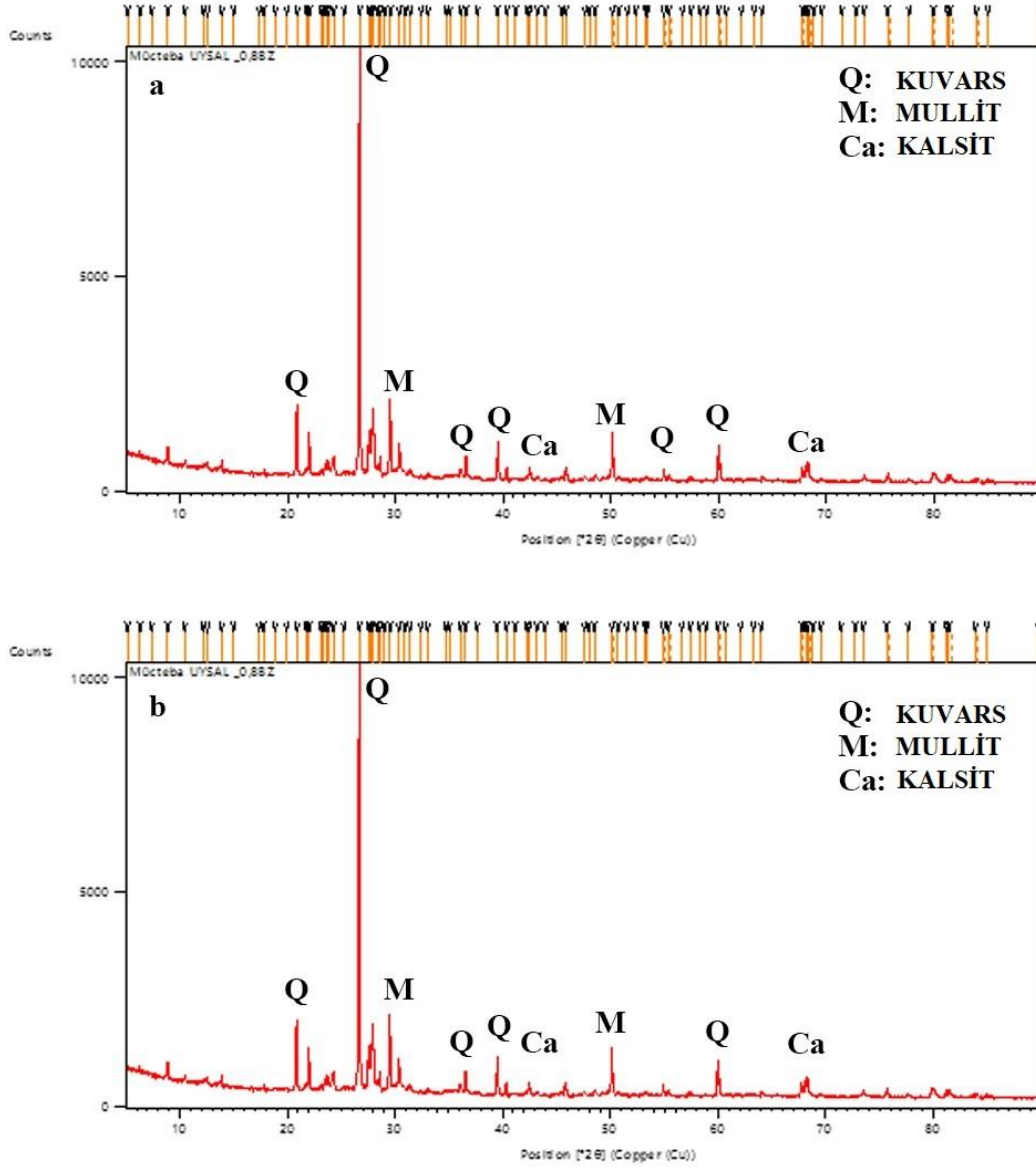
mikrograflarına dayanarak, artan dayanımın, köprüleme etkisi olarak bilinen, matriste bir kırılmanın meydana gelmesi üzerine etkinleştirilen ve matrise uygun şekilde gömülmüş liflerin varlığından kaynaklı olduğu sonucuna varılabilir (Karatas vd., 2019). Ayrıca geopolimer matrisinde, cürufun %20 oranında kullanılması nedeniyle kalsiyum içeriğinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Daha yoğun ve daha homojen bir mikro yapının yanı sıra gelişmiş mekanik davranış elde etmek için AST-GYFC bazlı geopolimer harçta cüruf içeriği arttırılabilir.



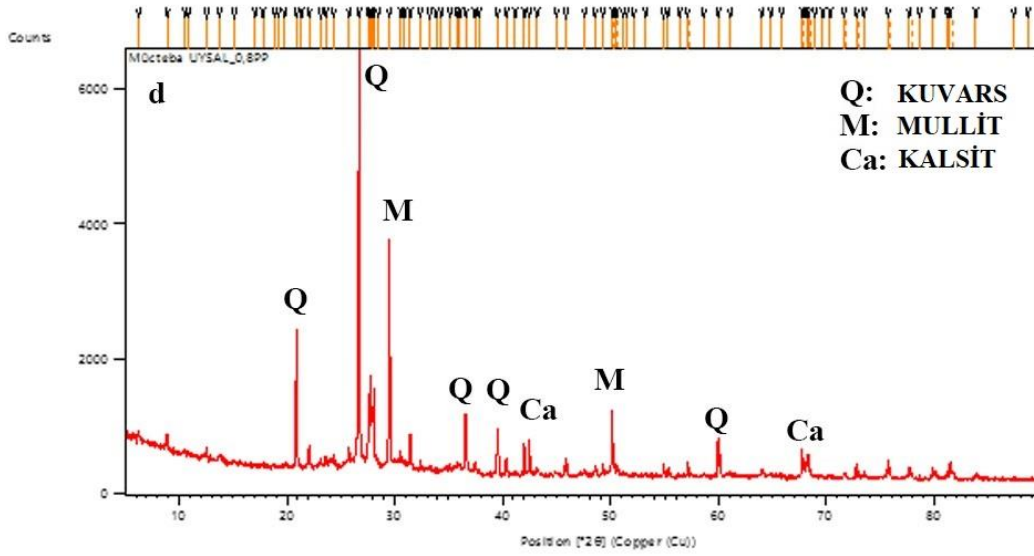
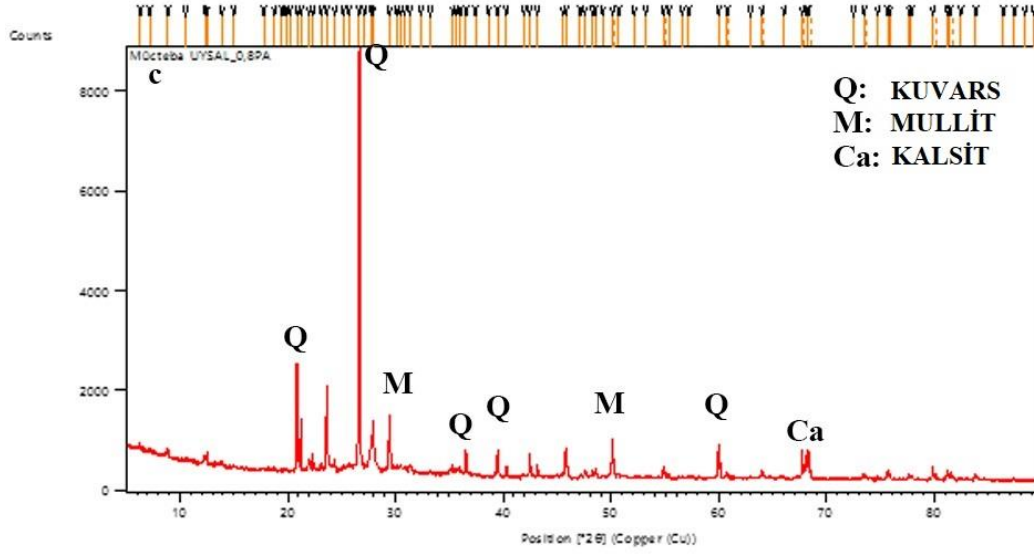
Şekil 4.27 Bazalt, poliamid ve polipropilen lif takviyeli numunelerin SEM görüntüleri

4.3.2 XRD Analizleri

Üretilen AST-GYFC bazlı geopolimer harçların kimyasal bileşimini anlamak için XRD çalışması yapılmıştır. Şekil 4.28, lif takviyesiz kontrol numunesinin ve bazalt lif takviyeli numunenin XRD'sini gösterirken, Şekil 4.29, poliamid ve polipropilen lif takviyeli karışımların XRD'sini göstermektedir. XRD desenleri analiz edildiğinde üretilen tüm geopolimer harç numunelerinde kuvars, müllit ve kalsit piklerine rastlanmıştır. Kuvars zirvelerinin 20° ile 30° 2θ aralığında daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu kuvars zirveleri çoğunlukla bağlayıcı malzemelerin yüksek kristalin silika içeriğinden kaynaklanmıştır (Sahin vd., 2021). Bu XRD analiz modelleri aynı zamanda AST'nin geri dönüştürülmüş beton agregası bazlı geopolimer kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanıldığı Uysal vd., 2022 tarafından yapılan çalışmadan elde edilen verilerle de tutarlıdır. Uysal çalışmasında, XRD'de 20° ile 30° 2θ aralığında kuvars pikleri tespit etmiş ve daha büyük bir yoğunluk gözlemiştir. Ayrıca müllit pikleri de tespit etmiştir. Hüseyin vd., 2018 de ağırlık oranı 70:30 olan AST-GYFC bazlı geopolimer harçların XRD desenlerinde güçlü kuvars ve müllit pikleri gözlemlemiştir. Pikleri etkileyen birkaç faktör arasında alkali aktivatör, dolgu ve bağlayıcı malzemelerin türü ve karışım tasarımı yer almaktadır (Aygörmez vd., 2020 ve Sahin vd., 2021). AST-GYFC bazlı geopolimer harçların XRD desenlerinde 20° ile 30° arasında 2θ pikinin varlığı etkili bir geopolimerizasyonunun gerçekleştiğini göstermektedir (Uysal vd., 2022). Ayrıca, lif takviyeli AST-GYFC bazlı geopolimer harçların kimyasal bileşimi, liflerin varlığından etkilenmemiştir.



Şekil 4.28 Kontrol (a) ve bazalt lif takviyeli numunelerin (b) XRD'si



Şekil 4.29 Poliamid (c) ve polipropilen lif takviyeli numunelerin (d) XRD'si

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- AST'nin %20 oranında ÖGYFC ile değiştirilmesi, 10M sodyum hidroksit çözeltisinde optimum ve ekonomik karışımı sağlayarak lif takviyesiz referans karışım olarak kabul edilmiştir.
- Tüm bazalt, poliamid ve polipropilen liflerin geopolimer harçlara belirli oranlarda eklenmesi, geopolimer harçların dayanım özelliklerini geliştirmiştir.
- Maksimum basınç ve yarmada çekme dayanımı poliamid lif takviyeli karışım (sırasıyla 60,15 ve 3,45 MPa) ile maksimum eğilme dayanımı ise bazalt lif takviyeli karışım (12,98 MPa) ile 28. günde elde edilmiştir.
- Fiziksel özellikler açısından AST-ÖGYFC bazlı geopolimer harçlara lif eklenmesi yoğunluk, gözeneklilik ve su emme açısından önemli bir etki göstermemiştir.
- Lif takviyeli numunelerin tamamında aşınmaya karşı direnç lif takviyesiz numuneye göre daha fazla olmuştur.
- Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra tüm numunelerde artan sıcaklık ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ağırlık kaybı oranları da artmıştır.
- SEM analizi, liflerin liflerle güçlendirilmiş geopolimer harcın matrisine düzgün bir şekilde gömüldüğünü ortaya çıkarmıştır.
- Geopolimer harçların XRD analizinde kuvars pikleri tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

Abdulkareem, O. A., Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Nizar, I. K., & Ala'eddin, A. S. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and building materials*, 50, 377-387.

ACI Committee, 3. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute. Standard, I. (2000). Plain and reinforced concrete-code of practice. New Delhi: Bureau of Indian Standards.

Acıkbaz G., Gocmez H. (2017) Polyester Matrisli Kompozit Özelliklerine Vitrifiye Seramik Sağlık Gereci Atık Miktarının Etkisi. *Akademik Platform*, 5 (3), 137-145.).

AKÇANSA, 2013, 2012-2013 Sürdürülebilirlik Raporu, http://www.akcansa.com.tr/downloads/surdurebilirlik/surdurebilirlik_2014_tr.pdf, (Erişim:03.02.2024).

Akdemir, A. (2007). Samsun Organize Sanayi Bölgesinde Hava Kalite Parametrelerinin İzlenmesi ve Meteorolojik Parametrelerle İlişkilerinin İncelenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora tezi.

Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Saidy, A. H., & Al-Oraimi, S. K. (2009). Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. *Construction and building materials*, 23(6), 2132-2140.

Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., Cánovas, M. F., & Osorio, I. R. (2014). Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions. *Materials & Design*, 60, 57-65.

Ali, N., Canpolat, O., Aygörmez, Y., & Al-Mashhadani, M. M. (2020). Evaluation of the 12–24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 251, 118976.

- Aliusta, H., & Yılmaz, B. (2020). Karbon maliyetlerinin muhasebeleştirilmesi: çimento sektörü uygulaması. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 15(1), 267-294.
- Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmmez, Y., Uysal, M., & Erdem, S. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. Construction and building materials, 167, 505-513.
- Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J., & JUMAAT, M. Z. (2013). Geopolymer concrete: A building material for the future. Electronic Journal of Structural Engineering, 13(2), 11-15.
- Allaoui, D., Nadi, M., Hattani, F., Majdoubi, H., Haddaji, Y., Mansouri, S., ... & Manoun, B. (2022). Eco-friendly geopolymer concrete based on metakaolin and ceramics sanitaryware wastes. Ceramics International, 48(23), 34793-34802.
- Altın Z, Erturan S, Çorbacıoğlu S, (2014) Seramik Endüstrisindeki Sırlı Atık Malzemenin Değerlendirilmesi, 11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, Eskişehir.
- Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. Journal of Cleaner Production, 251, 119679.
- Arslan, A. A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Şahin, F., & Aygörmmez, Y. (2019). Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites. Construction and Building Materials, 225, 909-926.
- ASTM C642 ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM Int. (2006). <https://doi.org/10.1520/C0642-06>.
- ASTM C109 ASTM C109/C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM Int. (2016). https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-16A.
- ASTM C348 ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM Int. (2014).

ASTM C496 ASTM C496-96, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Int. (1996). <https://doi.org/10.1520/C0496-96>

ASTM C597 ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM Int. (2016). <https://doi.org/10.1520/C0597-16>.

(ASTM C989-99, 2003) El Mahboub, K., Mbonimpa, M., Belem, T., & Maqsoud, A. (2022). Rheological characterization of cemented paste backfills containing superabsorbent polymers (SAPs). *Construction and Building Materials*, 317, 125863.

Aygörmez, Y. (2018). K Colemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi. Yıldız Technical Graduate School of Natural and Applied Sciences.[Turkish].

Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M. M., & Uysal, M. (2020). Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 235, 117502.

Aygörmez, Y., Canpolat, O., & Al-Mashhadani, M. M. (2020). A survey on one year strength performance of reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 264, 120267.

Bakharev, T. (2000). Alkali activated slag concrete: chemistry, microstructure and durability (Doctoral dissertation, Monash University).

Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (2001). Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 331-334.

Bagampadde, U., Isacsson, U., & Kiggundu, B. M. (2006). Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures. *Materials and structures*, 39, 303-315.

Barbosa, V. F., MacKenzie, K. J., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International journal of inorganic materials*, 2(4), 309-317.

Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., San Nicolas, R., Gehman, J. D., Brice, D. G., ... & van Deventer, J. S. (2013). Gel nanostructure in alkali-activated binders based on slag and fly ash, and effects of accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, 53, 127-144.

Bilim vd. El-Didamony, H., Amer, A. A., & Abd Ela-ziz, H. (2012). Properties and durability of alkali-activated slag pastes immersed in sea water. *Ceramics international*, 38(5), 3773-3780.

Binici, H., & Aksogan, O. (2018). Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. *Journal of Building Engineering*, 19, 109-121.

Bobirică, C., Shim, J. H., Pyeon, J. H., & Park, J. Y. (2015). Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers. *Ceramics International*, 41(10), 13638-13649.

BTSB,2015:1 Çimento Sektörü Raporu (2015/1), Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü- Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi

Castel ve Foster 2014 Castel, A., & Foster, S. J. (2015). Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 72, 48-53.

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.

C. D. Ati, Bilim, C., & Atış, C. D. (2012). Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 28(1), 708-712.

Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals engineering*, 16(3), 205-210.

Chowdhury vd., 2020 Chowdhury S, Mohapatra S, Gaur A, Dwivedi G, Soni A, 2020, Study Of Various 82 Properties of Geopolymer Concrete – a Review. *Materials Today: Proceedings*. Retrieved from 35

Chokkalingam, P., El-Hassan, H., El-Dieb, A., & El-Mir, A. (2022). Development and characterization of ceramic waste powder-slag blended geopolymer concrete designed using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 349, 128744.

Coelho, A., & De Brito, J. (2013). Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal–part II: economic sensitivity analysis. *Journal of cleaner production*, 39, 329-337.

Çelik, A. (2019). Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).

ÇINAR, M., & ERBAŞI, B. (2022). GEOTEKNİK UYGULAMALARDA GEOPOLİMERLERİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ, LİTERATÜR ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 774-789.

ÇİMSA, 2013, Sürdürülebilirlik Raporu-2013, <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/A91AF70B800B4FD0AF5DA989D7A39534.pdf>, (Erişim:14.03.2023)

Dash, M. K., Patro, S. K., & Rath, A. K. (2016). Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete–A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 484-516.

Davidovits, J. (1982). U.S. Patent No. 4,349,386. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Davidovits, 1994 J. Davidovits: J. Mater. Education Vol. 16 (1994), p. 91-139

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.

Davidovits, J., Sawyer, J.L. (1985). Early high-strength mineral polymer. *United States Patent*, 4, 509-985.

Devi, V. S., & Gnanavel, B. K. (2014). Properties of concrete manufactured using steel slag. *Procedia Engineering*, 97, 95-104.

- Dimas vd. 2009 Dimas, D., Giannopoulou, I., & Panias, D. (2009). Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. *Journal of materials science*, 44(14), 3719-3730.
- Duan, P., Yan, C., & Zhou, W. (2017). A novel water permeable geopolymer with high strength and high permeability coefficient derived from fly ash, slag and metakaolin. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1430-1434.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *cement and concrete research*, 37(12), 1590-1597.
- Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the american ceramic society*, 91(12), 3864-3869.
- Ekmen, Ş., Mermerdaş, K., & Algın, Z. (2021). Effect of oxide composition and ingredient proportions on the rheological and mechanical properties of geopolymer mortar incorporating pumice aggregate. *Journal of Building Engineering*, 34, 101893.
- El-Dieb, A. S., & Kanaan, D. M. (2018). Ceramic waste powder an alternative cement replacement–Characterization and evaluation. *Sustainable Materials and Technologies*, 17, e00063.).
- Erdoğan, A. (2008). İklim değişikliği ile mücadele faaliyetlerinin Türk çimento sanayiine etkileri. DPT.
- Erdoğan, S. T. (2014). Are geopolymers environmentally friendly?. *Cem. Concr. World*, 19(107), 50-62.
- Erol, F. (2023). Farklı molariteli ve atıkseramik tozlu alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özellikleri (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Fleury, M., Sissmann, O., Brosse, E., & Chardin, M. (2017). A silicate based process for plugging the near well bore formation. *Energy Procedia*, 114, 4172-4187.
- Glukhovsky, V. (1994). Alkaline cements and concretes. *Frist International*.

- Gülşan, M. E., Alzebaree, R., Rasheed, A. A., Niş, A., & Kurtoğlu, A. E. (2019). Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. *Construction and Building Materials*, 211, 271-283.
- Hafez, A. I., Khedr, M. M. A., Mohammed, M. S., Osman, R. M., & Sabry, R. M. (2017). Utilization of rice hHafez, A. I., Khedr, M. M. A., Mohammed, M. S., Osman, R. M., & Sabry, R. M. (2017).
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- 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.
- Hienola vd.,2017 Hienola, A., Pietikäinen, J. P., O'Donnell, D., Partanen, A. I., Korhonen, H., & Laaksonen, A. (2017, April). The role of anthropogenic aerosol emission reduction in achieving the Paris Agreement's objective. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 12544).
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Mirza, J., Tahir, M. M., Asaad, M. A., Ismail, M., & Shah, K. W. (2018). Waste ceramic powder incorporated alkali activated mortars exposed to elevated Temperatures: Performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 187, 307-317.
- Huseien, G. F., Mirza, J., & Ismail, M. (2018). Effects of high volume ceramic binders on flexural strength of self-compacting geopolymer concrete. *Advanced Science Letters*, 24(6), 4097-4101.
- Hu, S. G., Wu, J., Yang, W., He, Y. J., Wang, F. Z., & Ding, Q. J. (2009). Preparation and properties of geopolymer-lightweight aggregate refractory concrete. *Journal of Central South University of Technology*, 16(6), 914-918.
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Shah, K. W., Asaad, M. A., Tahir, M. M., & Mirza, J. (2019). Properties of ceramic tile waste based alkali-activated mortars incorporating GBFS and fly ash. *Construction and Building Materials*, 214, 355-368.

- Hwang, C. L., & Huynh, T. P. (2015). Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 1-9.
- Hwang, C. L., Yehualaw, M. D., Vo, D. H., & Huynh, T. P. (2019). Development of high-strength alkali-activated pastes containing high volumes of waste brick and ceramic powders. *Construction and Building Materials*, 218, 519-529.
- Jahromi, S. G. (2009). Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2324-2331.
- Jiang, X., Xiao, R., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y., & Huang, B. (2020). A laboratory investigation of steel to fly ash-based geopolymer paste bonding behavior after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 254, 119267.
- Kasehchi, E., Arjomand, M. A., & Elizei, M. H. A. (2024). Experimental investigation of the feasibility of stabilizing inshore silty sand soil using geopolymer based on ceramic waste powder: an approach to upcycling waste material for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, e02979.
- K. Divya, and C. Rubina, Mechanism of geopolymerisation and factors influencing its development: A review. *Journal of Materials Science*, 42, 729–746, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853006-0401-4>
- Kalınçimen, G., Öztürk, A., Kaplan, G., & Yıldız, S. (2015). Seramik atıklarının çimento ikame malzemesi olarak kullanılması ve asit dayanıklılığının incelenmesi. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 1(1), 9-16.
- Kannan, D. M., Aboubakr, S. H., El-Dieb, A. S., & Taha, M. M. R. (2017). High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 144, 35-41.
- Kara, G., İbiç, A., & Yağcıoğlu, E. (2018). Çimento sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(2), 87-90.

Karatas, M., Dener, M., Benli, A., & Mohabbi, M. (2019). High temperature effect on the mechanical behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete containing ground pumice powder. *Structural Concrete*, 20(5), 1734-1749.

Kaya, M. (2016). Farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).

Kasehchi, E., Arjomand, M. A., & Elizei, M. H. A. (2024). Experimental investigation of the feasibility of stabilizing inshore silty sand soil using geopolymer based on ceramic waste powder: An approach to upcycling waste material for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02979.

Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42(3), 729-746.

Nazir, K., Canpolat, O., Uysal, M., Niş, A., & Kuranlı, Ö. F. (2023). Engineering properties of different fiber-reinforced metakaolin-red mud based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 385, 131496.

Krivenko, V. P. 1994. “Alkaline cements”. İçinde *Proceedings of the 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, 1994, 1:11–129. VIPOL Stock Company.

Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Crentsil, K.S., (2007). “Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research*, 37: 1583–1589.

KONYA ÇİMENTO, 2022 Konya Çimento 2021 Yılı Faaliyet Raporu

Kunduracı, N., Tarhan, B., & Sarısakal, C. (2019). Seramik Sağlık Gereçleri Ürünlerinde Piroplastik Deformasyonun Azaltılmasına Bağlı Olarak Geliştirilen Kompozisyonların Üretim Maliyeti Açısından Değerlendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 474-480.

Kuranlı, Ö. F., Uysal, M., Abbas, M. T., Cosgun, T., Niş, A., Aygörmez, Y., ... & Al-Mashhadani, M. M. (2022). Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. *Construction and Building Materials*, 325, 126747.

Li, H., Gao, P., Xu, F., Sun, T., Zhou, Y., Zhu, J., ... & Lin, J. (2021). Effect of fine aggregate particle characteristics on mechanical properties of fly ash-based geopolymer mortar. *Minerals*, 11(8), 897.

Liew, Y. M., Heah, C. Y., Li, L. Y., Jaya, N. A., Abdullah, M. M. A. B., Tan, S. J., & Hussin, K. (2017). Formation of one-part-mixing geopolymers and geopolymer ceramics from geopolymer powder. *Construction and Building Materials*, 156, 9-18.

Materials Used in Traditional Ceramics. *Geostand Newsletter*, 28(2):203–12.
Jambor, JJ (1963) Relation Between Phase Composition, Overall Porosity and Strength of Hardened

Mermerdaş, K., Manguri, S., Nassani, D. E., & Oleiwi, S. M. (2017). Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering science and Technology, an international Journal*, 20(6), 1642-1652.

Mohseni, E., Kazemi, M. J., Koushkbaghi, M., Zehtab, B., & Behforouz, B. (2019). Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymer composites based on rice husk ash and nano-alumina. *Construction and Building Materials*, 209, 532-540.

Niş, A. N. I. L., Özyurt, N., & Özturan, T. (2020). Variation of flexural performance parameters depending on specimen size and fiber properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(4), 04020054.

Oh, J. E., Monteiro, P. J., Jun, S. S., Choi, S., & Clark, S. M. (2010). The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 189-196.

Oikonomou, N.D., (2005). Recycled Concrete Aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 27, ss. 315-318.

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and building materials*, 24(5), 832-838.

Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindaprasit, P. (Eds.). (2014). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier.

- Shoaei, P., Musaei, H. R., Mirlohi, F., Ameri, F., & Bahrami, N. (2019). Waste ceramic powder-based geopolymer mortars: Effect of curing temperature and alkaline solution-to-binder ratio. *Construction and Building Materials*, 227, 116686.
- Penteado, C. S. G., de Carvalho, E. V., & Lintz, R. C. C. (2016). Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 112, 514-520.
- Petermann, J. C., Saeed, A., & Hammons, M. I. (2010). Alkali-activated geopolymers: a literature review. Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division.
- Puertas F, Barba A, Gazulla MF, Gómez MP, Palacios M, Martínez-Ramírez S (2006) Ceramic Waste as Raw Materials in Portland Cement Clinker Fabrication: Characterization and Alkaline Activation. *Materiales De Construccion*, 56(281): 73–84.
- Rangan, B. V. (2008). Fly ash-based geopolymer concrete.
- Rovnaník, P., & Šafránková, K. (2016). Thermal behaviour of metakaolin/fly ash geopolymers with chamotte aggregate. *Materials*, 9(7), 535.
- Rowles, M. R., Hanna, J. V., Pike, K. J., Smith, M. E., & O'connor, B. H. (2007). ²⁹Si, ²⁷Al, ¹H and ²³Na MAS NMR study of the bonding character in aluminosilicate inorganic polymers. *Applied Magnetic Resonance*, 32, 663-689.
- Shi, C. (2004). Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of materials in civil engineering*, 16(3), 230-236.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763.
- Shoaei, P., Musaei, H. R., Mirlohi, F., Ameri, F., & Bahrami, N. (2019). Waste ceramic powder-based geopolymer mortars: Effect of curing temperature and alkaline solution-to-binder ratio. *Construction and Building Materials*, 227, 116686.
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455.

- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Singh, N. B. (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals*, 8(7), 299.
- Subaşı, S., Öztürk, H., & Emiroğlu, M. (2017). Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 567-574.
- Suhendro, B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering*, 95, 305-320.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2007). Fly ash-based geopolymer concrete: study of slender reinforced columns. *Journal of materials science*, 42, 3124-3130.
- Su, Z., Guo, L., Zhang, Z., & Duan, P. (2019). Influence of different fibers on properties of thermal insulation composites based on geopolymer blended with glazed hollow bead. *Construction and Building Materials*, 203, 525-540.
- Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
- Sahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars with different aggregate filling. *Construction and building materials*, 300, 124257.
- Şahin, F., Uysal, M., & Canpolat, O. (2021). Systematic evaluation of the aggregate types and properties on metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 278, 122414.
- Tanyıldızı, M. (2022). Capillarity of Concrete Incorporating Waste Ceramic Powder. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 925-930.
- UCBAD, 2018 Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, Sayı 1(2): 87-90 (2018) (Orijinal Makale) 87 Çimento Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları

Uysal, M., Kuranlı, Ö. F., Aygörmez, Y., Canpolat, O., & Çoşgun, T. (2023). The effect of various fibers on the red mud additive sustainable geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 363, 129864.

Uysal, M., Aygörmez, Y., Canpolat, O., Cosgun, T., & Kuranlı, Ö. F. (2022). Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 361, 129718.

Tenn, N., Allou, F., Petit, C., Absi, J., & Rossignol, S. (2015). Formulation of new materials based on geopolymer binders and different road aggregates. *Ceramics international*, 41(4), 5812-5820.

Thomas, B. S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material—A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3913-3923.

Tumadhir, M. (2013). Thermal and mechanical properties of basalt fibre reinforced concrete. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 7(4), 334-337.

Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and building materials*, 43, 125-130.

TÜİK (2023), Sera Gazı Emisyon İstatistikleri, 1990-2021, Türkiye İstatistik Kurumu Sayı: 49672

TÜİK (2012), Haber Bülteni: Seragazı Emisyon Envanteri 1990-2010. Türkiye İstatistik Kurumu, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=10829>, (Erişim: 03.02.2024)

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Seramik Sektörü Raporu, 2020 T.C. Çevre Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü Hava Yönetimi Dairesi Başkanlığı Türkiye'nin Bilgilendirici Envanter Raporu (IIR) 2021

Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., & Lorenzen, L. L. (1998). Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash. *Metallurgical and materials transactions B*, 29, 283-291.

V. F., MacKenzie, K. J., & Thaumaturgo, C. (2000). Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International journal of inorganic materials*, 2(4), 309-317.

Wiyono, D., & Hardjito, D. (2015). Improving the durability of pozzolan concrete using alkaline solution and geopolymer coating. *Procedia Engineering*, 125, 747-753.

https://tr.wikipedia.org/wiki/Sodyum_hidroksit#:~:text=Sodyum%20hidroksit%2C%20laboratuvar%20CO2,serigrafide%20pozitif%20ile%20beraber%20kullan%C4%B1%C4%B1r.

<https://en.wikipedia.org>, 2024

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26(1), 303-329.

Xu, H., Gong, W., Syltebo, L., Izzo, K., Lutze, W., & Pegg, I. L. (2014). Effect of blast furnace slag grades on fly ash based geopolymer waste forms. *Fuel*, 133, 332-340.

Yalghuz, M. R. (2020). Farklı tip malzemeler kullanılarak geopolimer harç üretimi ve dayanıklılığın incelenmesi (Master's thesis, Eskişehir Teknik Üniversitesi).

Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (2008). Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 554-564.

Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M. A. ve Hussin K., (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review, *Progress in Materials Science*, 83, 595-629.

Zeybek, O. (2009). Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi (Master's thesis, Anadolu University (Turkey))

Zhang, Y. J., Li, S., & Wang, Y. C. (2012). Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(3), 620-624.

Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L. ve Qi, S.L., (2015). “Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash”, J. Mater. Civ. Eng., 28

Zhang, H., Chen, B., Xu, H., & Ni, M. (2016). Thermodynamic assessment of an integrated molten carbonate fuel cell and absorption refrigerator hybrid system for combined power and cooling applications. International Journal of Refrigeration, 70, 1-12.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Investigation of ceramic powder-based geopolymer mortars containing different activators

