T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI LİF İÇERİĞİNE SAHİP YÜKSEK FIRIN CÜRUFU, OBSİDYEN VE METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARIN VE BETONLARIN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Zafer KURT

Danışman
Prof. Dr. İlker USTABAŞ

RİZE
2023

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Prof. Dr. İlker USTABAŞ danışmanlığında, Zafer KURT tarafından hazırlanan *Farklı Lif İçeriğine Sahip Yüksek Fırın Cürufu, Obsidyen ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların ve Betonların İncelenmesi* adlı bu tez çalışması, 22/09/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri		**Unvanı, Adı SOYADI**	**İmza**
Başkan	:	Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU	
Üye	:	Prof. Dr. İlker USTABAŞ	
Üye	:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN	
Üye	:	Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU	
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ	

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Doktora Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim "Farklı Lif İçeriğine Sahip Yüksek Fırın Cürufu, Obsidyen ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların ve Betonların İncelenmesi" adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılacak bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.
22/09/2023

Zafer KURT

ÖN SÖZ

Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Farklı Lif İçeriğine Sahip Yüksek Fırın Cürufu, Obsidyen ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların ve Betonların İncelenmesi” isimli tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, öğrencisi olduğum için şanslı hissettiğim danışman Hocam Sayın Prof. Dr. İlker USTABAŞ’a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tüm eğitim ve öğretim hayatım süresince üzerimde iz bırakmış tüm hocalarıma, Tez İzleme Kurulu üyeleri Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU’na , Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ’e, Tez savunma jüri üyeliğini kabul eden Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU ve Prof. Dr. Abdülkadir Cüneyt AYDIN’a teşekkür ederim.

Tez çalışmasının tüm aşamasında yanımda olan, desteğini esirgemeyen başta Arş. Gör. Talip ÇAKMAK’a, Arş. Gör. Dr. Vahiddin Alperen BAKİ’ye, Arş. Gör. Cemalettin TERZİ’ye, Dr. Öğr. Üyesi Yıldıran YILMAZ’a teşekkürü borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca yanımda olan başta annem Fevziye KURT’a, babam Mustafa KURT’a, ağabeylerim Cemil KURT, Haluk KURT, Yahya KURT ve Rahman KURT’a minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Zafer KURT

2023/ RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY I
ETİK BEYAN II
ÖN SÖZ III
İÇİNDEKİLER IV
ÖZET VII
ABSTRACT VIII
KISALTMALAR IX
TABLOLAR LİSTESİ XI
ŞEKİLLER LİSTESİ XIII
GİRİŞ XVII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.2. Geopolimerlerin Tarihi 5
1.3. Geopolimer Kimyası 7
1.4. Geopolimerlerin Avantajları ve Dezavantajları 15
1.5. Lifler 17
1.6. Makine Öğrenmesi İle Dayanımların Tahmininde Kullanılan Algoritmalar 18
1.6.1. Değerlendirme Metrikleri 20
1.6.2. Algoritmalar 21
1.7. Literatür Özeti 26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 43
2.1. Tezin Amacı 43
2.2. Çalışma Hakkında Genel Bilgiler 43
2.2.1. Malzemeler 45
2.3. Geopolimer Harçların Üretim Süreci 54
2.4. Lifli Harç Numunelerin Üretim Süreci 58
2.5. Harç ve Beton Numuneler İçin Gerçekleştirilen Mekanik Testler 59
2.5.1. Eğilme Dayanımı Testi 59
2.5.2. Basınç Dayanımı Testi 60
2.5.3. Yarmada Çekme Dayanımı Testi 61
2.6. Geopolimer Harçlar için İç Yapı Analizleri 62
2.7. Geopolimer Betonların Üretim Süreci 63

3. BULGULAR 66
3.1. Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımları 66
3.2. Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları 68
3.3. Geopolimer Harçların XRD Analizi 70
3.4. Geopolimer Harçların SEM-EDS Analizi 71
3.5. Geopolimer Harçların FTIR Analizleri 76
3.6. Lifli Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımları 76
3.7. Lifli Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları 77
3.8. Lifli Geopolimer Harçların SEM Analizi 78
3.9. Geopolimer Harçların Eğilme ve Basınç Dayanımlarının Makine Öğrenmesi ile Tahmini 80
3.10. Geopolimer Betonların Yarmada Çekme Dayanımları 85
3.11. Lifli Geopolimer Betonların Basınç Dayanımları 87
3.12. Lifli Geopolimer Betonların SEM Görüntüleri 88
4.TARTIŞMA VE SONUÇLAR 91
4.1. Tartışma 91
4.1.1. Geopolimer Harçların Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi 91
4.1.2. Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi 100
4.1.3. Geopolimer Harçların XRD Analizi Değerlendirmesi 105
4.1.4. Geopolimer Harçların FTIR Analizi Değerlendirmesi 109
4.1.5. Geopolimer Harçların SEM ve EDS Analizi Değerlendirmesi 111
4.1.6. Lifli Geopolimer Harçların Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi 116
4.1.7. Lifli Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi 118
4.1.8. Lifli Geopolimer Harçların SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi ... 120
4.1.9. Geopolimer Harçların Yapay Zeka Algoritmaları ile Tahmin Değerlendirmesi (Basınç ve Eğilme Dayanımı) 122
4.1.10. Lifli Geopolimer Betonların Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi 126
4.1.11. Lifli Geopolimer Betonların Yarmada Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi 128

4.1.12. Lifli Geopolimer Betonların SEM-EDS Analizlerinin Değerlendirilmesi 131
4.2. Sonuçlar 134
KAYNAKÇA..... 136

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Tez Türü : Doktora
Danışman : Prof. Dr. İlker USTABAŞ
Hazırlayan : Zafer KURT
Yıl : 2023
Sayfa Sayısı : 161

ÖZET

FARKLI LİF İÇERİĞİNE SAHİP YÜKSEK FIRIN CÜRUFU, OBSİDYEN VE METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARIN VE BETONLARIN İNCELENMESİ

Bu çalışmada obsidiyen tozu (OB), yüksek fırın cürufu (YF) ve metakaolin (MT) içeren karışımların mekanik ve içyapı özellikleri araştırılmıştır. Elde edilen veriler uygun makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin edilerek iş gücü ve zamandan tasarruf edilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışması 4 aşamadan oluşmaktadır. 1. aşamada bahsi geçen 3 farklı malzeme (OB, YF ve MT) ağırlıkça %25 oranlarında 13 farklı kombinasyona bağlı olarak karıştırılarak geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretim sürecinde alkali aktivatör olarak 12 molar konsantrasyona sahip NaOH, alkali/bağlayıcı oranı 0,45; kür sıcaklığı 75 °C, 90 °C, 105 °C ve 120 °C, kür süresi 72 saat olarak dikkate alınmış, 7, 28 ve 90. gün sonunda mekanik (eğilme ve basınç dayanımı) ve XRD, SEM-EDS ve FTIR vasıtasıyla içyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Tezin 2. aşamasında en yüksek eğilme ve basınç dayanımlarına sahip 5 karışıma (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) bağlayıcı ağırlığının %1,5; %2,0 ve %2,5 oranında çelik, polivinil alkol ve bazalt lifler ikame edilerek üretilen lifli geopolimer harçların mekanik (eğilme + basınç) dayanımları ve SEM-EDS vasıtasıyla içyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. 3. aşamada elde edilen eğilme ve basınç dayanımlarından oluşan veri seti lineer regresyon (LR), k en yakın komşu (kNN), derin sinir ağları (DNN), karar ağaçları (DT) ve Rastgele orman (RF) gibi algoritmalar ile tahmin edilmiştir. Ayrıca, yapılan özellik sıralaması analizleri ile girdilerin önem ağırlıkları elde edilmiştir. Tezin son aşamasında, lifli geopolimer harçlarda elde edilen en yüksek dayanıma sahip 5 farklı karışım, optimum lif oranı olarak belirlenen bağlayıcı ağırlığının %2'i oranında çelik lif, polivinil alkol ve bazalt lifler ikame edilerek 90 °C kür sıcaklığı ve 72 saat kür süresi altında beton numuneler hazırlanmıştır. Beton numunelerin 28. günde mekanik dayanımları (basınç ve yarmada çekme dayanımı) ve SEM-EDS vasıtasıyla içyapı özellikleri incelenmiştir. Tez çalışması ile elde edilen bulgular, obsidiyen tozunun geopolimer harç ve beton üretiminde kullanılabileceğini, optimum kür sıcaklığının 90 °C olduğunu, optimum lif oranının genel olarak bağlayıcı ağırlığının %2'si olduğunu, makine öğrenmesi çalışmalarında en önemli girdinin metakaolin olduğunu ve en başarılı tahmin algoritmasının Rastgele orman (R^2=0,983) olarak ortaya çıktığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Obsidiyen, yüksek fırın cürufu, metakaolin, makine öğrenmesi, geopolimer harç, geopolimer beton, SEM-EDS

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies
Department : Civil Engineering
Thesis Type : PhD. Thesis
Supervisor : Prof. Dr. Ilker USTABAŞ
Author : Zafer KURT
Year : 2023
Pages : 161

ABSTRACT

INVESTIGATION OF GEOPOLYMER MORTARS AND CONCRETES BASED ON BLAST FURNACE SLAG, OBSIDIAN, AND METAKAOLIN WITH DIFFERENT FIBER CONTENT

In this study, the mechanical and microstructural properties of blends containing obsidian powder (OB), blast furnace slag (HFS) and metakaolin (MT) were investigated. It is aimed to save labor and time by predicting the obtained data with appropriate machine learning algorithms. The thesis study consists of 4 stages. In the first stage, geopolymer mortars were produced by mixing the 3 different materials (OB, YF and MT) at 25% by weight in 13 different combinations. During the production process, NaOH with 12 molar concentration was used as alkali activator, alkali/binder ratio was 0.45, curing temperature was 75 °C, 90 °C, 105 °C and 120 °C, curing time was 72 hours, mechanical (flexural and compressive strength) and microstructural analyses by XRD, SEM-EDS and FTIR were performed after 7, 28 and 90 days. Second phase of the thesis mechanical (flexural + compressive) strengths and microstructural analysis by SEM-EDS of the fibrous geopolymer mortars produced by substituting steel, polyvinyl alcohol, and basalt fibers at 1,5%, 2,0% and 2,5% of the binder weight to the 5 mixtures with the highest flexural and compressive strengths (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 and OB50YF50MT0). In third stage, the data set consisting of flexural and compressive strengths were predicted by algorithms such as linear regression (LR), k nearest neighbor (kNN), deep neural networks (DNN), decision trees (DT) and Random Forest (RF). In addition, the importance weights of the inputs were obtained by feature ranking analysis. In the final stage of the thesis, concrete specimens were prepared under 90 °C curing temperature and 72 hours curing time by substituting steel fiber, polyvinyl alcohol and basalt fibers at the rate of 2% of the binder weight, which was determined as the optimum fiber ratio, in 5 different mixtures with the highest strength obtained in fibrous geopolymer mortars. The mechanical strength (compressive and splitting tensile strength) and microstructural properties of the concrete specimens were analyzed by SEM-EDS at 28 days. The findings of this thesis show that obsidian powder can be used in the production of geopolymer mortar and concrete, the optimum curing temperature is 90 °C, the optimum fiber ratio is generally 2% of the binder weight, metakaolin is the most important input in machine learning studies and the most successful prediction algorithm is Random Forest (R2=0,983).

Keywords: Obsidian**,** blast furnace slag, metakaolin, machine learning, geopolymer mortar, geopolymer concrete, SEM-EDS

KISALTMALAR

OB	:	Obsidiyen tozu
YF	:	Yüksek fırın cürufu
MT	:	Metakaolin
CO_2	:	Karbondioksit
LR	:	Lineer Regresyon
kNN	:	k en yakın komşu algoritması
DNN	:	Derin sinir ağları
DT	:	Karar ağaçları
RF	:	Rastgele orman
R^2	:	Determinasyon katsayısı
MSE	:	Ortalama Kare Hatası
MAE	:	Ortalama Mutlak Hata
RMSE	:	Karesel Ortalama Hata
MPa	:	Birim alana düşen kuvvet (N/mm^2)
N	:	Kuvvet
mm	:	Milimetre
NMR	:	Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi
FTIR	:	Fourier Dönüşümlü Kizilötesi Spektrometresi
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	:	Enerji Dağınımlı Görünge Gözlemi
PVA	:	Polivinil Alkol Lif
GPC	:	Geopolimer Beton
NaOH, NH	:	Sodyum Hidroksit
Na_2SiO_3, NS	:	Sodyum Silikat
Ms	:	Silis Modülü
ANFIS	:	Uyarlayıcı bulanık mantık sonuç çıkarımı
SCGC	:	Kendiliğinden yerleşen geopolimer beton
FA	:	Uçucu kül
PCC	:	Portland çimentolu beton
GPC	:	Geopolimer kompozit
POCS	:	Hurma yağı klinker kumu

GGBS	:	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
MS	:	Madencilik kumu
CHTS	:	Karbonize yüksek titanyum cürufu
CRA	:	Geleneksel regresyon analizi
MARS	:	Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon çizgileri
YSA	:	Yapay Sinir Ağları
CS	:	Basınç dayanımı
FS	:	Eğilme dayanımı
a.u.	:	Keyfi birim
NS	:	Nash-Sutcliffe performans istatistiki
CDWG	:	İnşaat yıkım atığı geopolimeri
GB	:	Gradyan artırma
XGBoost	:	Aşırı gradyan artırma
L/B	:	Sıvı/bağlayıcı oranı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Hammaddelerin Portland Çimentosu ve Alternatif Çimento Bileşenlerine Dönüştürülmesinden Ortaya Çıkan CO_2 Miktarlarının Karşılaştırılması 2
Tablo 2. 1 ton beton için hesaplanan çevresel etkiler 3
Tablo 3. Geopolimer ile alakalı geçmişten günümüze çalışmalar 7
Tablo 4. Liflerin Mekanik Özellikleri 18
Tablo 5. Geopolimer numunelerin bağlayıcıya bağlı olarak isimlendirilmesi..... 45
Tablo 6. Obsidiyen taşı tozunun XRF analizi sonuçları 48
Tablo 7. Yüksek fırın cürufu XRF analizi sonuçları..... 50
Tablo 8. Metakaolinin XRF analizi sonuçları 51
Tablo 9. Sodyum Hidroksit (NaOH)'ın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri..... 52
Tablo 10. Agregalara ait özgül ağırlıklar, su emme kapasiteleri ve nem içerikleri .. 54
Tablo 11. Geopolimer Harçlarda Dikkate Alınan Toz Malzeme ve Alkali Aktivatör Miktarları (gram) 55
Tablo 12. Geopolimer Beton Numunelerde Kullanılan Malzeme Miktarları (kg/m^3) 64
Tablo 13. Geopolimer Harçların 7 Günlük Eğilme Dayanımları (MPa) 66
Tablo 14. Geopolimer Harçların 28 Günlük Eğilme Dayanımları (MPa) 67
Tablo 15. Geopolimer Harçların 90 Günlük Eğilme Dayanımları..... 67
Tablo 16. Geopolimer Harçların 7 Günlük Basınç Dayanımları (MPa) 68
Tablo 17. Geopolimer Harçların 28 Günlük Basınç Dayanımları (MPa) 69
Tablo 18. Geopolimer Harçların 90 Günlük Basınç Dayanımları (MPa) 69
Tablo 19. Lifli geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları (MPa)..... 77
Tablo 20. Lifli geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları (MPa) 78
Tablo 21. Basınç dayanımı veri seti için özellik istatistikleri 82
Tablo 22. Eğilme dayanımı veri seti için özellik istatistikleri 82
Tablo 23. Basınç Dayanımı Verilerine Etki Eden Girdilerin Önem Analizi Sonuçları 83
Tablo 24. Eğilme Dayanımı Verilerine Etki Eden Girdilerin Önem Analizi Sonuçları 83

Tablo 25. Basınç Dayanımı Verilerine Uygulanan Algoritmaların Performans Metrikleri 83
Tablo 26. Eğilme Dayanımı Verilerine Uygulanan Algoritmaların Performans Metrikleri 84
Tablo 27. Gerçek Basınç Dayanımları ve Algoritmaya Bağlı Tahmin Verileri (MPa) 84
Tablo 28. Gerçek Eğilme Dayanımları ve Algoritmaya Bağlı Tahmin Verileri (MPa) 85
Tablo 29. Lifli Geopolimer Betonların 28 Günlük Yarmada Çekme Dayanımları (MPa) 86
Tablo 30. Lifli Geopolimer Betonların 28 Günlük Basınç Dayanımları (MPa) 87

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Geopolimer ve geleneksel Portland çimentolu kompozitlerin kimyasal yapısı 9
Şekil 2. Sialat Si-O-Al-O ‘nin dörtyüzlü (tetrahedral) gösterimi 11
Şekil 3. Tamamen reaktif K-poli(sialat-silokso) 3D-yapısal modeli..... 12
Şekil 4. Değişen Si/Al oranlarına bağlı olarak geopolimerin yapısal modeli 13
Şekil 5. Geopolimerizasyonun kimyasal şematik taslağı 14
Şekil 6. Geopolimerlerin alkalileşmesinin grafik modeli 15
Şekil 7. Lifler: a) Bazalt Lif, b) Çelik Lif ve c) Polivinil Alkol Lif..... 18
Şekil 8. Makine Öğrenmesinin Alt Türleri..... 19
Şekil 9. Karar Ağaçları Mekanizmasının Şematik Gösterimi 22
Şekil 10. AdaBoost Algoritması Süreç İşleyişi Şeması..... 23
Şekil 11. Rastgele Orman Algoritması İşleyiş Örneği 25
Şekil 12. k en yakın komşu algoritması işlem adımları..... 26
Şekil 13. Obsidiyenin bölgedeki yerleşimi , a) Lokasyon haritası, b) Çağırankaya yerleşimi..... 46
Şekil 14. Obsidiyen görüntüleri: a) Çağırankaya mevkii obsidiyen yatağı, b) obsidiyen taşı..... 47
Şekil 15. Öğütme işlemi esnasında kullanılan makineler: a)çeneli Kırıcı, b) bilyeli değirmen ve c) öğütülmüş obsidiyen tozu 48
Şekil 16. Çalışmada kullanılan yüksek Fırın cürufu..... 49
Şekil 17. Çalışmada kullanılan metakaolin 51
Şekil 18. Harçlarda kullanılan standart kum 51
Şekil 19. Kullanılan NaOH: a) Pelet, b) Çözelti..... 52
Şekil 20. Yıkanan Agregalar 53
Şekil 21. Kullanılan Agregalara Ait Granülometri Eğrileri 54
Şekil 22. Karıştırılan bağlayıcı malzemeler 56
Şekil 23. Kalıp aşaması: a) Titreşimli makine, b) Kalıba yerleştirilmiş numuneler . 56
Şekil 24. Numunelerin bekletildiği etüv ve etüvden çıkarılmış numuneler 57
Şekil 25. Numara verilerek poşetlenmiş numune örneği..... 57
Şekil 26. Geopolimer harçların üretimi için kullanılan akış diyagramı 58
Şekil 27. Lifli geopolimer harçların üretiminde kullanılan akış diyagramı 59

Şekil 28. Poşetlenen lifli harç numunesi 59
Şekil 29. Harç Numuneler İçin Eğilme Dayanımı Test Cihazı 60
Şekil 30. Harç numuneler için basınç dayanımı test cihazı 61
Şekil 31. Küp beton numuneler için yarmada çekme dayanımı test cihazı 62
Şekil 32. İç yapı analizleri için kullanılan numune örnekleri: a) Toz, b) Prizmatik . 63
Şekil 33. Geopolimer betonların üretimi için kullanılan akış diyagramı 64
Şekil 34. Poşetlenen Beton Numuneler 65
Şekil 35. Beş farklı geopolimer harç karışımı için XRD spektrumu 70
Şekil 36. 5 farklı geopolimer karışımın x10000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 71
Şekil 37. 5 farklı geopolimer karışımın x5000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 73
Şekil 38. 5 farklı geopolimer karışımın x1000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Ca/Si Oranları 74
Şekil 39. 5 farklı geopolimer karışımın elemental spektroskopileri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Si/Al Oranları 75
Şekil 40. 5 farklı geopolimer karışımın FTIR spektrumu (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) 76
Şekil 41. 4 farklı lifli geopolimer harç için x10000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: (a) Kontrol, b) Bazalt Lif-2,5; c) Çelik Lif-2,0 ve d) Polivinil Alkol Lif-1,5) 79
Şekil 42. Geopolimer Harçlarda Lif Dağılımı için SEM görüntüleri: (a) Polivinil Alkol Lif-1,5 x200; b) Polivinil Alkol Lif-1,5 x100 ve c) Çelik Lif-2,0 x200 80
Şekil 43. Basınç Dayanımı İçin Veri Seti Görünümü 81
Şekil 44. 8 farklı lifli geopolimer beton için x10000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OB100YF0MT0, b) OB0YF100MT0, c) OB100YF0MT0-Bazalt-2, d) OB0YF100MT0-Bazalt-2, e) OB100YF0MT0-Çelik-2, f) OB0YF100MT0-Çelik-2, g) OB100YF0MT0-PVA-2 ve h) OB0YF100MT0-PVA-2 90

Şekil 45. Lifli Geopolimer Betonlarda Lif Dağılımı için SEM görüntüleri: (a) Bazalt Lif-2 x500, b) Çelik Lif-2 x100 ve c) Polivinil Alkol Lif-2 x100 90
Şekil 46. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %100 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolinli geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük basınç dayanımları 91
Şekil 47. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %75 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 94
Şekil 48. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %25 ve %50 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük basınç dayanımları 95
Şekil 49. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (Optimum Kür Sıcaklığı) 98
Şekil 50. 90 C°'de kür edilmiş, obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları 99
Şekil 51. Geopolimer Harç Numunelerde Ortaya Çıkan Beyaz Tortular 100
Şekil 52. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %100 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolinli geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları 100
Şekil 53. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %75 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları..... 102
Şekil 54. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %25 ve %50 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları 103
Şekil 55. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları (Optimum Kür Sıcaklığı) 105
Şekil 56. OB100YF0MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği 106
Şekil 57. OB75YF25MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği 106
Şekil 58. OB75YF0MT25 harç numunesine ait XRD Grafiği 107
Şekil 59. OB50YF50MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği 108
Şekil 60. OB0YF100MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği 109

Şekil 61. 5 farklı geopolimer harç numunesi için FTIR spektrumu (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) (Kurt, Ustabas ve Cakmak, 2023) 111
Şekil 62. 5 farklı geopolimer karışımın x1000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Ca/Si Oranları [217] 113
Şekil 63. 5 farklı geopolimer karışımın elemental spektroskopileri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Si/Al Oranları..... 115
Şekil 64. %100 obsidiyen tozu ve %100 obsidiyen tozuna %1,5; %2 ve %2,5 oranında bazalt, çelik ve polivinil alkol lif ikame edilmiş geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları 116
Şekil 65. %100 obsidiyen tozu ve %100 obsidiyen tozuna %1,5; %2 ve %2,5 oranında bazalt, çelik ve polivinil alkol lif ikame edilmiş geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları 119
Şekil 66. Geopolimer Harçlarda Lif Dağılımı için SEM görüntüleri: (a) Polivinil Alkol Lif-1,5 x200, b) Polivinil Alkol Lif-1,5 x100 ve c) Çelik Lif-2 x200 121
Şekil 67. Farklı Algoritmalara Dayalı Basınç Dayanımlarının Gerçek Verileri ve Tahmin Edilen Değerleri 124
Şekil 68. Farklı Algoritmalara Dayalı Eğilme Dayanımlarının Gerçek Verileri ve Tahmin Edilen Değerleri 125
Şekil 69. Lifli geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri 126
Şekil 70. Lifli geopolimer betonların yarmada çekme dayanımı değerleri 129
Şekil 71. 8 farklı geopolimer karışımın x1000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OB100YF0MT0, b) OB0YF100MT0, c) OB100YF0MT0-Bazalt-2, d) OB0YF100MT0-Bazalt-2, e) OB100YF0MT0-Çelik-2, f) OB0YF100MT0-Çelik-2, g) OB100YF0MT0-PVA-2 ve h) OB0YF100MT0-PVA-2 132
Şekil 72. 8 farklı geopolimer karışımın EDS analizi sonuçları ve Si/Al Oranları: a) OB100YF0MT0, b) OB0YF100MT0, c) OB100YF0MT0-Bazalt-2, d) OB0YF100MT0-Bazalt-2, e) OB100YF0MT0-Çelik-2, f) OB0YF100MT0-Çelik-2, g) OB100YF0MT0-PVA-2 ve h) OB0YF100MT0-PVA-2 133

GİRİŞ

Artan nüfusa bağlı olarak her geçen gün yapılaşma artmaktadır. Bu durum yapı malzemelerine olan talebi artırmaktadır. Birçok yapı malzemesi olmasına karşın, beton sağladığı uygulama kolaylıkları nedeniyle kullanımı en popüler olan yapı malzemesi konumundadır. Betonu oluşturan Portland çimentosunun üretimi sırasında hem oldukça fazla enerji harcanmakta hem de büyük oranda CO2 salınımına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle ortaya çıkan geopolimer malzemesi hem sağladığı üstün mekanik özellikler hem de azalttığı CO2 salınımı sebebiyle yapı sektörü için yeşil bir gelecek vadetmektedir. Bu bağlamda, günümüzde artan küresel ısınma olgusuna sebep olan sera gazlarını azaltmak için geopolimer malzemelerin deneysel çalışmaları hızla yürütülmektedir. Bu çalışmalara katkı sağlamak amacıyla ortaya çıkan bu tez çalışması 4 kısımdan oluşmaktadır. Tezin 1. kısmında, 13 farklı kombinasyon için geopolimer harçlar üretilmiştir. Tezin 2. kısmında üretilen harçlara lif ikamesi gerçekleştirilmiştir. Tezin 3. kısmında geopolimer harçların dayanımları algoritmalar ile tahmin edilmiştir. Tezin son kısmında ise lifli geopolimer betonlar üretilerek mekanik dayanımları incelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

İnsanoğlu var olduğu günden bu yana çevresini gözlemlemiş, elde ettiği gözlemler ile birlikte biriken bilgisini, hayatta kalması için gereken ihtiyaçlarını gidermek için sürekli geliştirerek kullanmıştır. Bilimin başlangıç seviyesinde olduğu varsayılabilecek çağlarda genel olarak yapısal elemanlarda bağlayıcı olarak kireç ve puzolanik bağlayıcılar kullanılırken, 1800'lü yıllarda betona zemin hazırlayabilecek gelişme, 1824 yılında İngiliz duvar ustası Joseph Aspdin'in Portland çimentosunu keşfetmesi olmuştur. Bilinen ilk hazır beton kullanımı 1903 yılında Almanya'da gerçekleşirken, beton yapı malzemesi olarak kullanımı günümüzde de yoğun şekilde devam etmektedir (Kuranlı, 2020; Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2015).

Dünyada her geçen gün nüfus artmakta, artan nüfusa bağlı olarak yapılaşma hızlı bir şekilde çoğalmaktadır. Beton sağladığı pratik uygulama kolaylıkları ile birlikte dünyada sudan sonra en çok kullanılan malzeme olmaktadır. Portland çimentosu betonu oluşturan agregaları bir arada tutması sebebiyle ana bileşen olmaktadır (Shaikh 2016). Bu nedenle, geleneksel betonun içerdiği Portland çimentosu dünyada çok yaygın bir şekilde kullanılmakta, ancak, üretilirken ortaya çıkan CO_2, dünyadaki tüm kirliliğin %17'sini oluşturmaktadır (Özsoy, 2021; Chakkor, 2021).

Çimento üretiminde çevreye CO_2 salınımı, aşağıda verilen kimyasal denklem üzerine ortaya çıkmaktadır. Bu denklemde kalker ve silikanın kalsiyum silikata dönüştüğü görülmektedir.

$$5CaCO_3+2SiO_2 \longrightarrow Ca_3SiO_4+Ca_2.SiO_4+5CO_2$$

Belirtilen kimyasal reaksiyon ile birlikte, her üretilen çimentoda ton başına yaklaşık 597 kg CO_2 çevreye salınılmaktadır. Ayrıca bu kimyasal olay çimento üretimindeki CO_2 salınımının %50'sine karşılık gelmekte, geriye kalan salınım ise çimento üretiminin tüm faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır (Yegin, 2020).

Dünyada yıllık yaklaşık olarak 130 milyon ton portland çimentosu kullanıldığı, her geçen yıl bu miktarın %5 civarında arttığı, agrega ve su kaynakları da dikkate alındığı durumda yılda 1 milyar ton beton üretilip kullanıldığı tahmin edilmektedir. Her ne kadar büyük önem taşısa da taş ocakları ve su kaynaklarının tükenmesi ihmal edilse dahi üretilen her çimento ile birlikte yaklaşık aynı oranda CO_2 salınımının ve üretimin diğer safhalarında ortaya çıkan diğer sera gazı etkilerinin zararı

düşünüldüğünde, geleneksel çimentolu betonun sürdürülebilir çevre dostu bir malzeme olmadığı açıktır (Yonar, 2014). McCraffey (2002), çimento sanayisindeki CO_2 salınımının, betonun içerdiği çimentonun tamamen veya kısmi olarak azaltılması ile denetim altına alınabileceğini ifade etmiştir.

Zamanla birlikte CO_2 salınımını azaltmak, çimentonun mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirmek, sanayi üretimi ile ortaya çıkan atık malzemeleri bertaraf etmek için katkılı Portland çimentoları ortaya çıkmıştır. Bazı çimento bileşenlerinin CO_2 salınımı miktarı Tablo 1'de verilmektedir (McNulty, 2009).

Tablo 1. Hammaddelerin Portland Çimentosu ve Alternatif Çimento Bileşenlerine Dönüştürülmesinden Ortaya Çıkan CO_2 Miktarlarının Karşılaştırılması (McNulty, 2009)

Çimento bileşeni	**Kullanılan hammadde**	**Üretilen 1 g üründe ortaya çıkan CO_2 miktarı (g)**	**Üretilen 1 ml üründe ortaya çıkan CO_2 miktarı (g)**
M (magnezyum, periglaz)	Magnezit	1,092	3,91
C (sönmemiş kireç)	Kalker	0,785	2,63
C_3S(Alit)	Kalker$^+$	0,578	1,80
C_2S(Belit)	Silika	0,511	1,70
C_3A(Trikalsiyum alüminat)	Kalker$^+$	0,489	1,50
C_4AF(Kalsiyum alüminoferrit	Kalker+Alümina+Demir oksit	0,362	1,29
NS(Sodyum metasilikat)	Soda+Silika	0,361	-
CA(Monokalsiyum alüminat)	Kalker+Alümina	0,279	0,83
C4A3S(Kalsiyum sülfoalüminat)	Kalker+Alümina+Anhidrit	0,216	0,56

Çimento CO_2 salınımı yapmasının yanı sıra, döner fırınla yüksek sıcaklıklarda (1400-1500 °C) üretildiğinden, büyük miktarda enerji tüketmekte, bu durumda maliyetine yansımaktadır. Bu nedenle çimento üretiminin yarattığı enerji ihtiyacının azaltılması için yeni bağlayıcı sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Yegin, 2020; McNulty, 2009; Davidovits, 1994).

Geleneksel Portland çimentosu ile elde edilen betonların hidratasyonundan dolayı meydana gelen enerjinin, atık kullanılarak elde edilen betonlarda açığa çıkan ısı

enerjisinden çok daha az olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 2'de Higgins tarafından hesaplanan, salınan CO_2 miktarı ve açığa çıkan enerjiler verilmektedir.

Tablo 2. 1 ton beton için hesaplanan çevresel etkiler (Higgins, 2006)

Çevresel Etki	%100 Portland çimentosu	%50 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	%30 Uçucu Kül
Sera Gazı (CO_2)	142 kg (%100)	85,4 kg (%60)	118 kg (%83)
Başlıca Enerji Kullanımı	1070 MJ (%100)	760 MJ (%71)	925 MJ (%86)
Mineral Özü	1048 kg (%100)	965 kg (%92)	1007 kg (%96)

Çimento üretilirken gerektirdiği yüksek enerji ve aynı zamanda ortaya çıkardığı CO_2 nedeniyle, araştırmacılar çimento yerine kısmi veya tamamen ikame edilebilecek çevre dostu malzemelerin arayışına girmişlerdir. Bu arayış ile birlikte bilgi birikimi artarken geopolimer tanımı ortaya çıkmıştır. Geopolimer ile üretilmiş betonlar bağlayıcı olarak çimento içermediğinden dolayı çimento üretiminin neden olduğu yüksek enerji gereksinimi ve atmosfere yayılan CO_2 salınımını azaltmakta, çimentolu betona alternatif bir çevre uyumlu malzeme olmaktadır. Aynı zamanda geopolimerler endüstriyel atıkların (cüruf, silis dumanı vs.) alkaliler (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat) ile birleşerek oluşturulabildiğinden geri dönüşüme de katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda geopolimerlerin geleneksel betona göre %60 daha az enerji gerektirdiği ve %80 daha az CO_2 salınımı yaptığı belirtilmektedir (Chindaprasirt, Chareerat ve Sirivivatnanon, 2007).

Geopolimerler, normal portland çimentosundan üretilen betonlara göre erken ve daha yüksek dayanım, düşük hidratasyon ısısı, yüksek durabilite gibi önemli avantajlar sağlayabilmektedir. Ancak ani priz, büyük derecede büzülme gibi dezavantajları da bulunabilmektedir (Aydın, 2010).

Geopolimerler ile ilgili birçok atık veya endüstriyel malzemenin ikame edilmesiyle alakalı çalışmalar yer almaktadır: uçucu kül (Kuranlı, 2020; Özsoy, 2021; Kalaycıklı, 2020; Keklik, 2020; Altındal, 2020; Al Azzawi, 2019; Köker, 2019; Altundal, 2019; Humur, 2018; Gümüş, 2016; Hamid, 2021; Alnkaa, 2019; Mahmud, 2016; Kwami, 2020; Tokay, 2019; Örklemez, 2019; Atabey, 2017; Dolamary, 2018; Aykut, 2017), yüksek fırın cürufu (Kuranlı, 2020; Yegin, 2020; Akbulut, 2020; Kalaycıklı, 2020; Hassan Sarkaz, 2020; Keklik, 2020; Topal, 2020; Altındal, 2020; Al

Azzawi, 2019; Altundal, 2019; Karadağ, 2021; Alnkaa, 2019; Özcan, 2018; Yalghuz, 2020; Uğurlu, 2020; Gülmez, 2018; Bingöl, 2018), kırmızı çamur (Chakkor, 2021; Yegin, 2020; Akbulut, 2020; Turhan, 2020), metakaolin (Özsoy, 2021; Chakkor, 2021; Al Azzawi, 2019; Çelik, 2019; Arslan, 2019; Aygörmez, 2018; Nawar, 2018; Gümüş, 2016; Girgin, 2016; Yalghuz, 2020; Polat, 2019; Aykut, 2017), silis dumanı (Kalaycıklı, 2020; Keklik, 2020; Aygörmez, 2018; Yalghuz, 2020; Gülmez, 2018; Aykut, 2017), nano silika (Yegin, 2020; Humur, 2018; Mamaseni, 2021; Rasheed, 2019; Kantarcı, 2018; Balun, 2019; Aykut, 2017), lifler (Kuranlı, 2020; Yonar, 2014; Çelik, 2019; Arslan, 2019; Rasheed, 2019), ferrokrom cürufu (Aydın, 2010; Maraş, 2013; Kantarcı, 2013; Özcan, 2018; Kalkan, 2017), kolemanit atığı (Çelik, 2019; Arslan, 2019; Aygörmez, 2018; Nawar, 2018), pomza (Yaddollahi, 2013; Mamaseni, 2021; Hamid, 2021; Balun, 2019), zeolit (Güngör, 2019; Tuyan, 2017; Başçik, 2019; Özer, 2018), perlit (Güzelküçük, 2020; Turhan, 2020; Yalghuz, 2020), volkanik tüf (Ekinci, 2017; Kantarcı, 2018), atık cam (Annakoa, 2019; Alnkaa, 2019), atık lastik (Hassan Sarkaz, 2020), geri dönüştürülmüş agrega (Topal, 2020; Köker, 2019), pirinç kabuğu külü ve seramik tozu (Bilal, 2019), diatomit (Özsoy, 2021; Örklemez, 2019), tuğla tozu (Tuyan, 2017), termik santral taban külü (Toprak, 2011), vermikülit ve silis kumu (Tokay, 2019), atık döküm kumu (Yolcu, 2019), atık kül (Vural, 2019), bakteri (Polat, 2019), taş atığı (Aykut, 2017), borik asit (Eren, 2018), alçı (Aydın, 2010), bakır cürufu (Wang vd., 2021), şist yağı külü (Alaloul vd., 2021; Haddad, Ashteyat ve Lababneh, 2019). Ancak malzeme olarak obsidiyenle yapılmış bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Ayrıca, yapılan çalışmalardan elde edilen veriler deneylerde kullanılan oranlarda kalmış, çalışmada kullanılan malzeme oranları dışındaki verileri tahmin edebilecek bir yapay zeka çalışması bulunmamaktadır.

Bu noktada tezin ana amacı, puzolanik ve endüstri atığı malzemelerin en uygun karışım oranı bulunarak geopolimer malzemelerin performansının araştırılmasıdır. Ayrıca tezin diğer amaçları da aşağıdaki gibi olmaktadır:

1)Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, obsidiyen ve metakaolinli geopolimer kompozitlerin eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımlarının belirlenmesi

2)Geopolimer harçlarda en yüksek eğilme ve basınç dayanımına sahip kombinasyonlara farklı türde lifler ikame edilerek elde edilecek olan basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının belirlenmesi

3)Üretilecek geopolimerlerin SEM-EDS, XRD ve FTIR vasıtasıyla içyapısındaki değişimin incelenmesi

4)Elde edilen verilerin uygun makine öğrenmesi dili ile işlenerek tahmin algoritmalarının oluşturulmasıdır.

1.2. Geopolimerlerin Tarihi

Geopolimer kavramı 1970'li yılların sonuna doğru Fransız kimyager Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmıştır. Temel olarak geopolimer, alkali çözeltileri kullanılarak alümino-silikat tozun kimyasal bir süreç ile sentezlenmesiyle oluşan katı malzeme olarak tanımlanabilmektedir (Davidovits, 1991; Davidovits, 2008). Aslına bakılırsa, geopolimerler Avrupa'da ortaya çıkan bir dizi yangın sonrası organik ısıyla dayanım alabilen polimerler olarak tasarlandılar (Ali ve Natrajan, 2021). Ardından ortaya çıkan ilk ürünler yolcu gemilerinin yangın dayanımının artırılması için kaplama (Talling, 2002), yüksek sıcaklıklı karbon fiber kompozitlerde reçine (Lyon vd., 1997), yüksek dayanımlı bir yapıştırıcı (Bell, Gordon ve Kriven, 2005), ahşap yapıların ısı yalıtımında (Giancaspro, Balaguru ve Lyon, 2006) ve birçok farklı alanda kullanılmıştır. Ancak, metakaolin ve alkali çözeltilerden üretilen haline gelene kadar yapı malzemesi olarak kullanımına pek rastlanmamaktadır (Provis ve Van Deventer, 2009).

Çimentonun bağlayıcı olarak kullanılmadığı, cürufun alkaliler ile aktive edildiği harçların ilk kullanım örneği Purdon tarafından 1940'lı yıllarda ortaya çıkarılmıştır. Purdon bu konunun ilk örneğini oluştururken, ardından gelen araştırmacıların katkılarıyla geopolimerizasyon süreci günümüze kadar gelen gelişimini oluşturabilmiştir (Purdon, 1940).

Antik dönemde inşa edilen birçok devasa yapının oluşum sürecinde kullanılan yöntemlerin bazıları günümüzde de sır olarak kalmaktadır. Fakat, bu yapıların inşasında geopolimerin kimyasal sürecine benzer kimyasal teknolojilerin kullanıldığını ileri süren araştırmacılar olmuştur. Mısır piramitlerinin inşaatında kullanılan çok büyük boyutlardaki taşların birbirine yapıştırıldığını ileri süren teorilerde yer alan kimyasal karışımlar geopolimer karışımlar ile benzer özellikler taşımaktadır (Davidovits ve Morris, 1988). Piramitler ile geopolimer arasındaki bağlantıyı en belirgin şekilde Davidovits, 1987 desteklemiştir. Bu teoriye göre, alkali

aktivasyonuna benzer bir kimyasal kullanılarak piramitin blokları yerinde dökülerek montajı yapılmıştır. Daha detaylı yapılan bilimsel çalışmalar, incelenen taş örneklerinin yüksek alkali ve alüminyum içeriğine sahip olduğunu desteklememiş, fakat amorf silika ve yerinde dökülen kireç taşı yığınlarıyla tutarlı olacak bileşenlere sahip olabileceğini göstermiştir (MacKenzie vd., 2011). Ardından Glukhovsky antik dönemlerdeki yapılarda kullanılan bağlayıcı türlerini araştırmış, bağlayıcıların günümüzdeki portland çimentosunun bileşiminde bulunan alüminosilikat kalsiyum hidrat gibi hidratasyon ürünlerine; karışım fazlarında ise analsit içerdiğini belirtmiştir. Glukhovsky bu çalışmalarını temel alarak elde ettiği bağlayıcısına zemin çimentosu adını vermiştir. Çalışmalarının sonucunda alkali aktivatörleri 6 grup olarak kategorize etmiştir. Bu gruplarda M alkali iyon türünü ifade etmektedir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008).

-MOH (Alkaliler)

-M_2CO_3, M_2SO_3, M_3PO_4, MF (Zayıf Asit Tuzları)

-$M_2O.nSiO_3$ (Silikatlar)

-$M_2O.nAl_2O_3$ (Alüminatlar)

-$M_2O.Al_2O_3.(2\text{-}6)SiO_2$ (Alüminosilikatlar)

-M_2SO_4 (Kuvvetli Asit Tuzları)

Geopolimer ya da diğer adıyla alkali aktive malzemeler ile alakalı yapılmış çalışmaların genel bir sıralaması Tablo 1'de verilmektedir. 20. yüzyılın başındaki çalışmalar ile alkali ile aktive edilmiş malzemelerin teorik altyapısı oluşturulmuş, 1970'li yılların başında geopolimer kavramı ortaya çıkmış ve yüzyılın sonuna kadar çalışmaların öncüleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile birlikte 2000'li yıllarda konuyla alakalı çalışmalar artmıştır. Yapılan sayısız çalışmaların önemli sayılabilecek kısmına literatür araştırması bölümünde değinilmiştir.

Tablo 3. Geopolimer ile alakalı geçmişten günümüze çalışmalar (Roy, 1999)

Araştıran Kişi	Yıl	Araştırma Konusu
Feret	1939	Çimentoya cüruf ikamesi
Purdon	1940	Alkali+cüruf karışımı
Glukhovsky	1959	Alkali aktive çimentoların teorik altyapısı
Glukhovsky	1965	İlk alkali çimentolar ifadesinin kullanılması
Davidovits	1979	İlk "geopolimer" kavramının ortaya çıkışı
Malinowski	1979	Eski su kemerlerindeki kalıntıların karakterize edilmesi
Forss	1983	Cüruf+alkali+süperakışkanlaştırıcı içeren F tipi çimento
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemelerinin karakterizasyon çalışmaları
Wang and Scrivener	1985	Cüruf mikro-yapı araştırmaları
Davidovits vd.	1985	"Pyrament"olarak adlandırılan harçların patentinin alınması
Krivenko	1986	R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O bağlı birleşimlerin incelenmesi
Malek vd.	1986	Radyoaktivitesi az olan atıkların harçlara ikamesi
Davidovits	1987	Antik ve 20. yüzyıl betonlarının kıyaslanması
Deja and Malolepsy	1989	Klorürlü ortamlardaki durabilite özelliklerinin araştırılması
Talling vd.	1989	Alkali aktive cüruf çalışmaları
Wu vd.	1990	Cüruf ikameli çimentoların aktive edilmesi
Roy vd.	1991	Hızlı priz özelliği kazanan çimentoların üretimi
Roy and Silsbee	1992	Alkali ile aktive olan çimentoların incelenmesi
Roy ve Malek	1993	Cüruf ikameli çimentolar
Krivenko	1994	Alkali çimentolar
Rahier vd.	1996-1997	Alümina-silikat cam üretimi

1.3. Geopolimer Kimyası

Geopolimer amorf alkali alüminosilikat veya alkali aktive çimentolar olarak tanımlanabilmektedir (Singh vd., 2015). Geopolimer harç ve betonlar yüksek fırın cürufu, metakaolin, uçucu kül, pirinç atığı külü ve yüksek kalsiyumlu ağaç külü gibi alüminosilikatların alkali çözeltileri ile aktive edilmesi ile üretilebilmektedir. Bundan dolayıdır ki geopolimer harç ve betonların verimliliği alüminosilikat ve alkali aktivatörlerin türüne bağlı olarak değişmektedir (Duxson vd., 2007).

Genel olarak, geopolimer inorganik polimerlerden biridir. Diğer zeolitik mineraller ile karşılaştırıldığında amorf yapısı ön plana çıkmaktadır (Ma, Awang ve Omar, 2018; Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999). Polimerizasyon Si-O-Al-O bağlarının üç boyutlu polimerik zincirini oluşturan alkali koşullar altında hızlı bir silika (Si) ve alümina (Al) reaksiyonunu gerektirir. Geleneksel Portland çimentosu veya puzolanik çimentoların aksine, basınç dayanımı kazanması için silika, alümina ve yüksek alkali içeriğinin polikondenzasyonunu (çoklu yoğuşma) kullanır (Davidovits, 1991). Burada kullanılan polikondenzasyon terimi iki ya da daha fazla

fonksiyonel grubu olan monomerin katılımı ile basamaklı olarak gerçekleşen polimerizasyonları ifade etmektedir. Geopolimer kompozitlerin oluşumunda gerçekleşen kimyasal tepkimeler aşağıda Denklem (1) ve Denklem (2)'de verilmektedir.

$$(Si_2O_5Al_2O_2)_n + H_2O + OH^- \longrightarrow Si(OH)_4 + Al(OH)^{4-} \quad (1)$$

$$Si(OH)_4 + Al(OH)_4^- \rightarrow (Si-O-Al-O)_n + 4H_2O \quad (2)$$

Kimyasal tepkimedeki girenler ve ürünler incelendiğinde, amorf yapıdaki silisyum ve alüminyum içeriğine sahip akla gelen herhangi bir malzemenin geopolimer kompozitlerin üretiminde kullanılabileceği tahmin edilebilmektedir. Malzemeler ise doğal yolla oluşabilen (obsidiyen taşı, perlit, pomza vb.) olabileceği gibi, yapay yolla elde edilen (yüksek fırın cürufu, metakaolin, silis dumanı vb.) gibi puzolanlar olabilir (Ma, Awang ve Omar, 2018).

Geopolimerizasyon süreci esnasında meydana gelen reaksiyon mekanizması hakkında farklı araştırmacılar farklı görüşlere sahip olsa da, çoğunluğu bu sürecin 3 aşamada gerçekleştiğini ileri sürmektedir (Fernández-Jiménez vd., 2006; Xie ve Xi, 2001):

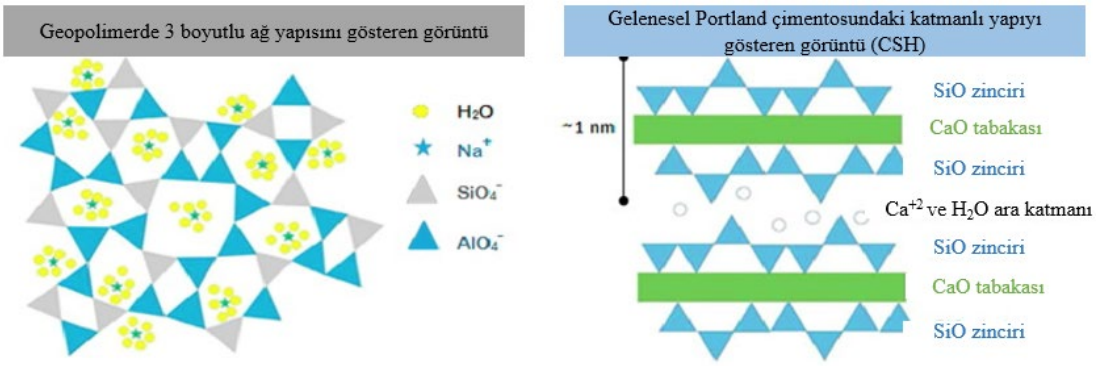
1) Al ve Si türleri alkali ortamın etkisi altında kaynak malzemeden çözünmektedir. Çözünme, alkali çözelti alüminosilikatlar açısından zengin kaynak malzeme ile temas ettiğinde hemen başlar ve türler arasında iyonik bir arayüze izin verir, ardından silikon, alüminyum ve oksijen atomları arasındaki kovalent bağların kırılması sağlanır. Al ve Si türlerinin çözünmesi, kaynak materyalin miktarına, bileşimine ve aktivatörün pH'ına bağlıdır.

2) Çözünmeyi, öncü iyonların monomerlere taşınması, yönlendirilmesi veya yoğunlaştırılması izler.

3) Monomerlerin polikondenzasyonu, katı bir üç boyutlu silika-alüminat ağı oluşturmak için gerçekleşir.

Ayrıca, alüminat tetrahedra $(AlO_4)^{-1}$'deki Al^{3+} dörtlü koordinasyonda olduğundan, aşırı negatif yük, alkalin aktive edici çözelti tarafından sağlanan alkali metal katyonu ile dengelenir. Genellikle, geopolimer bağlayıcıdaki su, geopolimer kimyasal yapısının bütünleşik bir parçasını oluşturmaz. Bu durum, suyun C-S-H

jelinin ayrılmaz bir parçasını oluşturduğu hidratlı geleneksel Portland çimentolu bileşiklerden farklı olmaktadır. Ancak, geopolimerin yüksek Ca kaynağı içeren yüksek fırın cürufu ve C sınıfı uçucu kül gibi sanayi atığı ürünler ile oluşturulduğu durumlarda yapısında C-S-H veya C-A-S-H gibi jeller oluşabilmektedir. Bu gibi durumlarda geopolimerin moleküler yapısı Şekil 1'de gösterilenden farklı olacağı dikkate alınmalıdır (Lahoti, Tan ve Yang, 2019).



Şekil 1. Geopolimer ve geleneksel Portland çimentolu kompozitlerin kimyasal yapısı (Lahoti, Tan ve Yang, 2019)

Aynı zamanda Duxson vd., 2007 tarafından oluşturulan kavramsal modelde, geopolimerasyon süreci tanıtılmıştır. Alüminosilikat kaynağının alkali aktive edici solüsyonla temas nedeniyle çözünmesi, bireysel alümina ve silikat türlerinin (muhtemelen monomerler olarak) oluşumuna yol açar. Bu durum sürecin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Bu monomerler, dimerler ve daha fazla trimerler, tetramerler vb. oluşturmak için etkileşime girer. Çözelti doygunluğa ulaştığında alüminosilikat jel çökelir. Reaktif alüminyum silikondan daha hızlı çözündüğünden (Al-O bağları Si-O bağlarından daha zayıftır), başlangıçta çökelen jel (Jel 1) alüminyum açısından zengindir. Reaksiyon ilerledikçe, alüminosilikat kaynağından daha fazla silikon çözülür ve jeldeki silikon konsantrasyonu artarak Jel 2'ye dönüşür. Çözünme, denge, jelleşme, yeniden yapılanma, polimerizasyon ve sertleşmeyi içeren tüm bu aşamalar aynı anda devam eder. Reaksiyonun başlaması için alüminosilikat kaynağının çözünmesi ve ayrıca yoğuşma reaksiyonunun katalizlenmesi için alkali bir çözelti gerektirir (Lahoti, Tan ve Yang, 2019; Xu ve Van Deventer, 2000).

Geopolimer malzemelerin kimyasal yapısında bağlayıcı ve alkali aktivatörlerin Si/Al oranı önemli bir etkiye sahiptir. Eğer Si/Al oranı 1'e eşit ise seramik, tuğla ve yangına karşı koruyucu malzemeler ortaya çıkar. Si/Al oranı 2 ise geopolimer beton ve çimentosu gibi ürünler üretilebilmektedir. Si/Al oranı 3 olduğu durumlarda fırın kaplamaları tarzı yangına dayanıklı malzemeler oluşmaktadır. Si/Al oranı 3'ten büyükse, dolgu malzemeleri üretilebilmektedir. Ancak Si/Al oranı 15'ten büyük ise nano kompozit adı verilen ısı dayanımı fazla olan malzemeler meydana gelmektedir (Xu ve Van Deventer, 2000; Davidovits, 2008).

Geopolimerler, düşük sıcaklıklarda, genellikle 100 °C'nin altında üretilen seramik benzeri inorganik polimerlerdir. Kovalent bağlarla alakalı mineral moleküllerinin ağları veya zincirlerinden oluşmaktadırlar. Araştırmacılar tarafından polimer olduğundan seramik bilimciler tarafından kullanılan polimer terminolojinden çok farklı bir polimer terminoloji ile anılması gerektiğini savunmaktadırlar.

Geopolimerler aşağıdaki moleküler birimler veya kimyasal gruplardan oluşmaktadır:

– Si-O-Si-O- silokso, poli(silokso)

– Si-O-Al-O- sialat, poli(sialat)

– Si-O-Al-O-Si-O- sialat-silokso, poly(sialate-silokso)

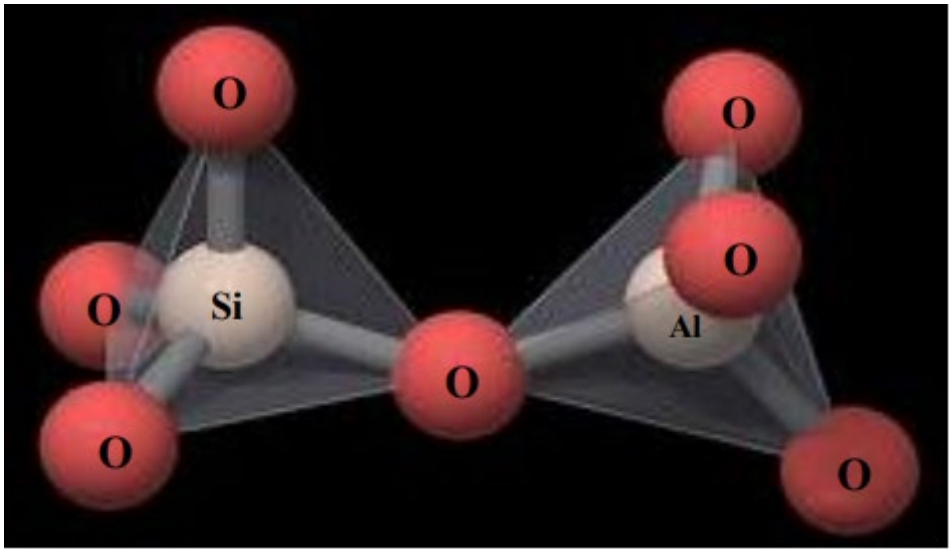
– Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialat-disilokso, poli(sialatedisilokso)

– (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-silokso, poli-silikon

– Al-O-P-O- alumino-fosfo, poli(alumino-fosfo)

– Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O- ferro-sialat, poli(ferro-sialat)

Geopolimerlerin kimyasal yapısını tartışmak için, silikon okso alüminat teriminin kısaltması olan sialat terimi Si ve Al arasında oksijen köprüsü kurarak oluşan bağları tanımlamak için kullanılmıştır. Ayrıca polisialat terimi ise malzeme tipinin siliko-alüminat tanımlayıcısı olarak kullanılmıştır. Amorftan yarı kristale kadar 3 boyutlu sialat ağı temel polimerik Si-O-Al bağları oluşturmak için oksijenlerin hepsini dönüşümlü paylaşarak kullanan SiO_4 ve AlO_4 dört yüzlü(tetrahedral)'den oluşur. Al^{3+}'nın negatif yükünü 4 kat koordinasyonunda dengelemek için pozitif iyonlar sodyum (Na^+), potasyum (K^+), lityum (Li^+), kalsiyum (Ca^{2+}), baryum (Ba^{2+}), amonyum (NH^{4+}), yapısal boşluklarda hidronyum (H_3O^+) bulunmalıdır (Çakmak, 2022).



Şekil 2. Sialat Si-O-Al-O ‘nin dörtyüzlü (tetrahedral) gösterimi (Thang, 2016)

Geopolimerizasyon aşağıda ifade edilen (3) 4-5 katlama koordinasyonunda çeşitli alüminosilikat oksitler Al^{3+} ile polimerik Si-O-Al-O sialat bağları veren silikatlar arasındaki kimyasal reaksiyonu içerir (Thang, 2016).

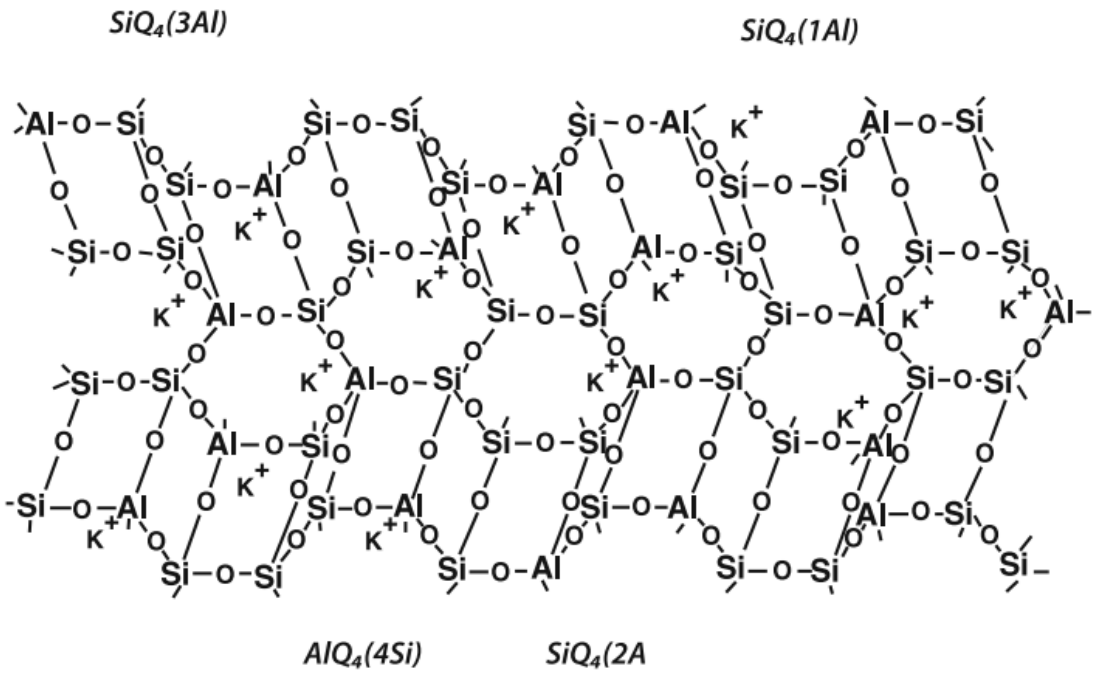
$2(Si_2O_5,Al_2O_2)+K_2(H_3SiO_4)_2 +Ca(H_3SiO_4)_2 \rightarrow (K_2O,CaO)(8SiO_2, 2Al_2O_3, nH_2O)$ (3)

Poli(sialatlar) aşağıdaki ampirik formül ile tanımlanabilir:

$Mn[– (SiO2)z – AlO2]n. wH_2O$, burada M bir tek değerlikli potasyum gibi katyon (K+) veya sodyum (Na+) , n çoklu yoğunlaşma derecesi ve z, 1, 2, 3 veya >> 3'tür.

Poli(sialat), amorftan yarı kristal aralığındaki oksijenli 4-kat koordinasyonundaki Si^{4+} ve Al^{3+}zincir ve halka polimerleri olarak tanımlanır (Thang, 2016).

Ayrıca Joseph Davidovits tarafından geopolimerizasyon sonrası tamamen reaktif K-poli(sialat—silokso) ‘nun yapısı görülmektedir (Davidovits, 2017).



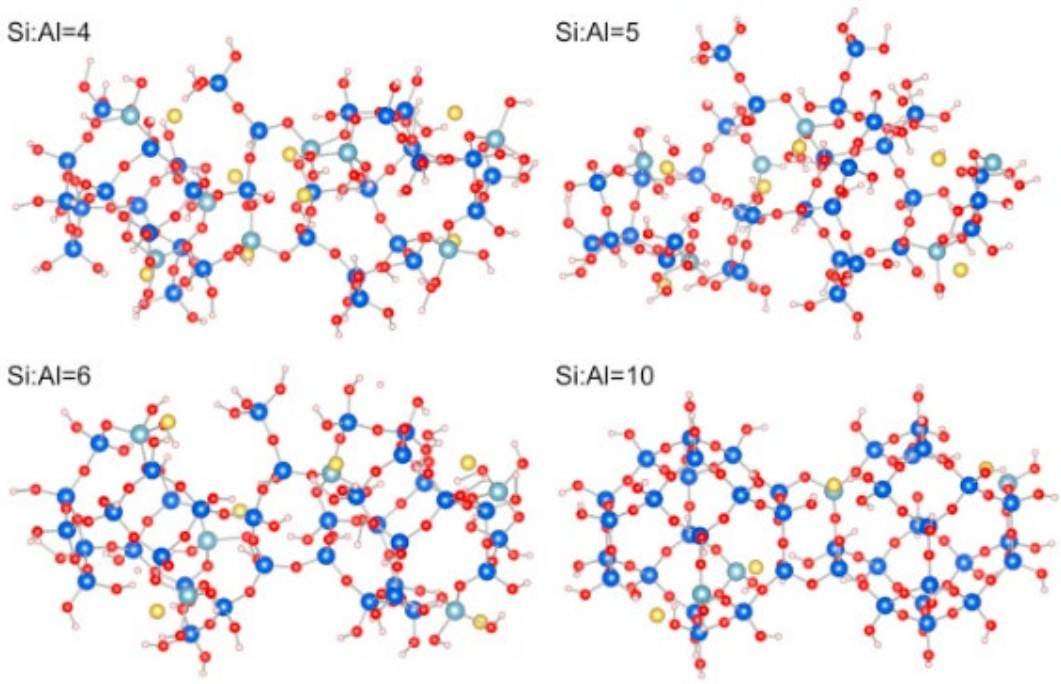
Şekil 3. Tamamen reaktif K-poli(sialat-silokso) 3D-yapısal modeli (Davidovits, 2017)

Geopolimerizasyon işleminde, Si-Al türü bağ, uygun alkalin koşulların varlığında büyük ölçüde hızlı bir kimyasal reaksiyona girerek amorf ila yarı kristalli polimerler zinciri ve Si-Al-O ve Si-O-Si bağlarından oluşan zincir ve halka yapısı verir (Dimas, Giannopoulou ve Panias, 2009). Aslında, geopolimerizasyon, alüminyum iyonlarının dörtlü veya altılı koordinasyondaki kristal yapıyı, silis yapısındaki kimyasal değişiklikleri tetikleme yeteneğine bağlıdır (Davidovits, 2008).

Geopolimerler değişken yapı, bileşim ve morfolojiye sahip çok karmaşık, tanımlanması zor nanokompozitler olarak düşünülmelidir. Genel olarak geopolimerizasyonun, küçük moleküllerin (oligomerler) bir araya gelerek 3D ağ oluşturduğu bir süreç olduğu varsayılır. Sonuç olarak, doğru bir şekilde tarif edilmesi çok zor olan yoğun amorf bir yapı elde edilir. Buna rağmen, esas olarak NMR (Singh, Bastow ve Trigg, 2005) veya FT-IR (Mozgawa ve Deja, 2009) gibi spektroskopik yöntemlerle elde edilen sonuçların yorumlanmasına dayanan geopolimer malzemelerin yapısını açıklamak için çok sayıda girişimde bulunulmuştur.

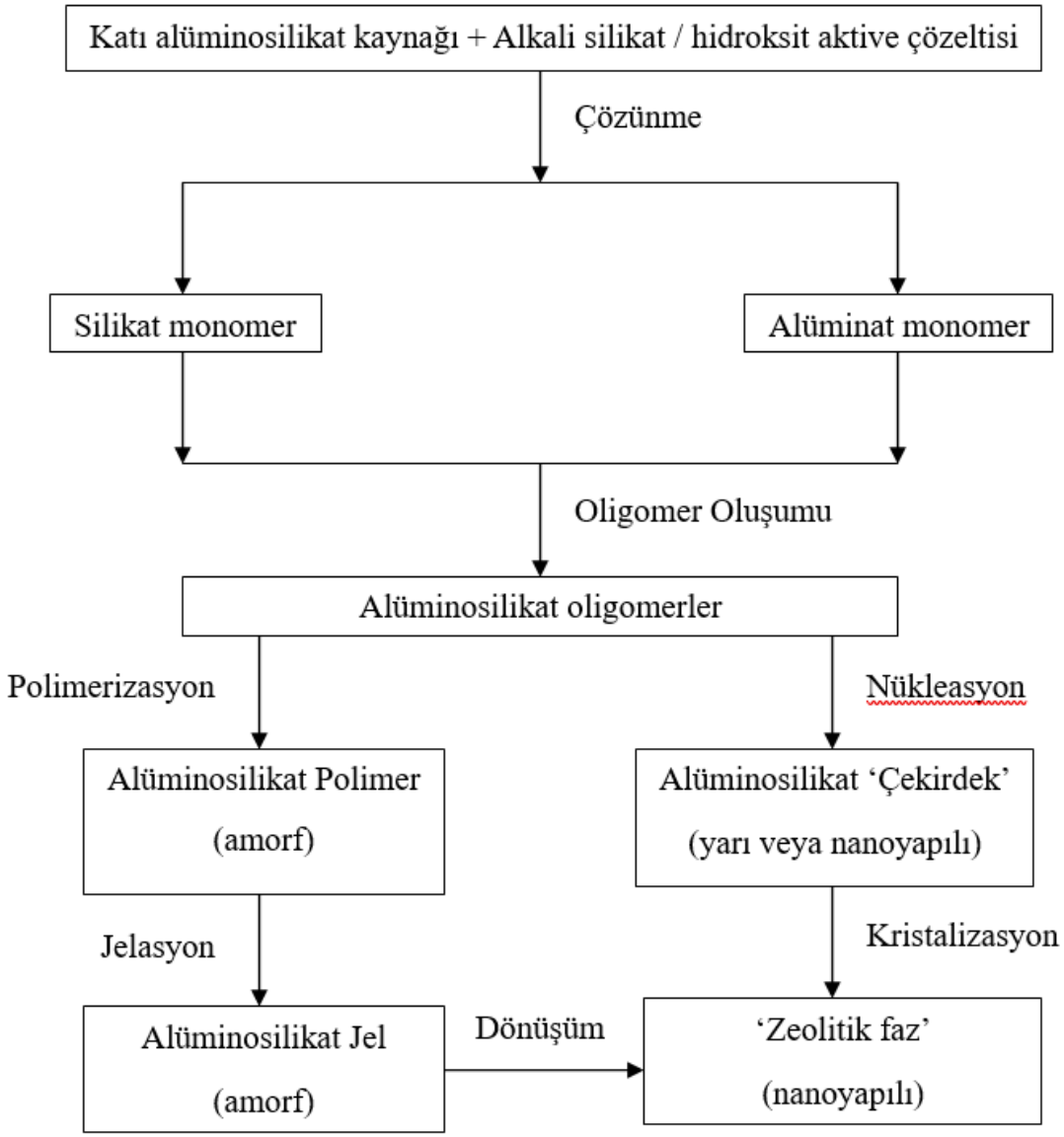
Deneysel çalışmalara nazaran geopolimerizasyonun teorik altyapısını açıklamak için yapılan çalışmalar oldukça nadirdir (White vd., 2012; Bell, 2008). Bu durumu oluşturan ana sebep geopolimerlerin karmaşıklığıdır (yalnızca yerel düzene

sahip amorf yapı) ki bu durum makul ve kesin teorik yapı modellerinin oluşturulmasında büyük zorluklara sebep olmaktadır. Sonuç olarak, geopolimer yapı hakkında kesin bilgi elde etmek pratik olarak imkansızdır. Bununla birlikte, model yapılarını basitleştirmek için - oldukça iyi olmasına rağmen (en azından iyi niteliksel sonuçlar sağlar) - nispeten basit ve küçük kalan ve bu nedenle şu anda mevcut olan teorik hesaplamalar aracılığıyla incelenmesi mümkün olan bazı yaklaşık stratejiler uygulanmaya çalışılabilir. Örneğin, camlar için tipik olarak uygulanan moleküler mekanik veya moleküler dinamik yöntemleri kullanılarak (biraz başarılı bir şekilde) veya büyük, periyodik üst yapılardan başlayarak ve önceden tanımlanmış algoritmalar kullanarak yapısal bileşenlerin bazılarını rastgele yok ederek, bu tür amorf yapıyı modellemeye çalışılabilir. Ancak bilinmelidir ki bu yöntemler son derece zaman alıcıdır ve sonuçlar genellikle tatmin edici olmaktan uzaktır. Aşağıdaki şekilde yapılan çalışma sonucu belirli Si/Al oranına bağlı olarak atomsal yapı verilmiştir (Koleżyński, Król ve Żychowicz, 2018).



Şekil 4. Değişen Si/Al oranlarına bağlı olarak geopolimerin yapısal modeli (Koleżyński, Król ve Żychowicz, 2018)

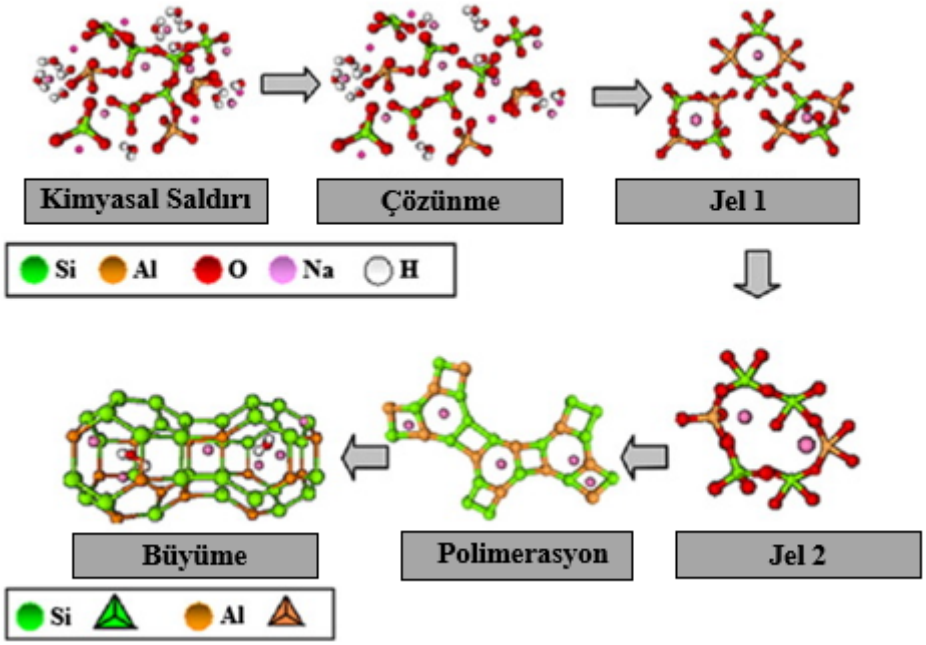
Geopolimerizasyon için temel bir kavramsal model, Provis vd. 2005 tarafından oluşturulmuştur. Şekil 5'te gösterilen model başlangıçta metakaolinin geopolimerizasyonuna uygulanmıştır, ancak diğer malzemeler içinde kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5. Geopolimerizasyonun kimyasal şematik taslağı (Van Deventer, 2007)

Geopolimerizasyon işlemi süresince; Si-O-Si ve Si-O-Al kovalent bağları alkaliler ile reaksiyona geçince kolloid fazlar oluşur. Çözünen ürünler pıhtılaşan yapının oluşmasına sebebiyet verir (Duxson vd., 2007). Reaksiyon ilerledikçe, yüksek Al içeriğine sahip ara ürün (Jel 1), daha fazla Si içeriğine sahip Jel 2'ye dönüşür. Sonunda jel büyür ve üç boyutlu çerçeveler oluşturur. Burada reaksiyon, jelin üç

boyutlu geopolimer ağlara doğru sürekli olarak düzenlenmesini içerir (Liew, Heah ve Kamarudin, 2016).



Şekil 6. Geopolimerlerin alkalileşmesinin grafik modeli (Duxson vd., 2007)

1.4. Geopolimerlerin Avantajları ve Dezavantajları

Geopolimerlerin bazı spesifik avantajları aşağıda sıralanmaktadır:

1) Hızlı priz alma ve yüksek dayanıma sahiptir. Geopolimer malzemelerin üç boyutlu ağ yapısının, yüksek polimerizasyon hızı nedeniyle oluşturulması nispeten kolaydır. Örneğin, metakaolin bazlı geopolimerin basınç dayanımı, oda sıcaklığında 4 saat kürlendikten sonra 15–30 MPa'ya ulaşabilir (ki bu dayanım değeri hemen hemen normal beton dayanımıdır) ve geçen süre boyunca artmaya devam eder (Duxson vd., 2007; Burciaga-Díaz ve Escalante-García, 2012).

2) İyi derecede ısı dengesi ve yüksek sıcaklık direncine sahiptir. Kompakt oksit ağ sistemi sayesinde havayı izole edebilir ve iç malzemeyi oksitlenmeye karşı koruyabilir. 800 °C'de, geopolimerin doğrusal rötresi %0,2-%2'dir ve %60'tan fazla başlangıç mukavemetini korur, yüksek sıcaklıkta Portland çimentosundan daha mekanik ve ısı performansı gösterir. Geopolimerin termal iletkenliği 0,24–0,38W/(m·K) olup, geleneksel ateş tuğlalarının performansıyla karşılaştırılabilir (ateş tuğlalarının termal iletkenliği 0,3–0,4w/(m·K)) (Ali, Sanjayan ve Guerrieri, 2017; Nazari vd., 2019).

3) Güçlü bir malzeme arayüzey bağ kapasitesine sahiptir. Sıradan portland çimentosu, kalsiyum hidroksitin zenginleşmesine ve agrega ile birleştiği ara yüzeyde tercih edilen oryantasyon geçiş bölgesine eğilimlidir ve bu da zayıf arayüzey bağlama kuvveti ile sonuçlanır. Geopolimer malzemelerde kalsiyum silikatın hidrasyon reaksiyonu yoktur ve nihai ürün, güçlü bağlanma kabiliyeti ile agrega arayüzüne yakından bağlı olan kovalent bağlı üç boyutlu bir ağ jelidir (Peng ve Yan, 2014).

4) İyi derecede korozyon direnci ve dayanıklılığına sahiptir. Priz alma sürecinde etrenjit gibi sülfat mineralleri üretilmediğinden, geopolimer sülfat korozyonuna karşı daha iyi bir dirence sahiptir. Asit koşulları altında da iyi bir stabilite göstermektedir, örneğin, %5'lik sülfürik asit veya hidroklorik asit çözeltisinde geopolimerin ayrışma oranı, aynı koşul altında Portland çimentosunun oranının sadece yaklaşık 1/13'ü veya 1/12'sidir. Geopolimer, iyi bir geçirimsizlik ve dayanıklılık ile sonuçlanan kompakt bir yapı oluşturabilmektedir (Weng ve Song, 2005; Khale ve Chaudhary, 2007).

5) Düşük CO_2 salınımı Davidovits, 2002 (Örneğin, 1 kg geopolimer çimentonun üretim sürecinde sadece 0,18 kg CO_2 salınımı olmaktadır ki bu miktar normal portland çimentosunun yaklaşık 1/5'i kadardır ve sıradan betona kıyasla, geopolimer betonun üretim sürecinde CO_2 emisyonu yaklaşık %26-45 oranında azalmaktadır) ile birlikte içeriğine katılan birçok sanayi atığı malzemenin depolanma sorununu ortadan kaldırmaktadır (Türkmen vd., 2017).

Geopolimerlerin birçok iyi yönü ve avantajı olmasına rağmen hala çözülmeyi bekleyen bazı sorunları ve zor noktaları vardır. Bu dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Zhao vd., 2021):

1) Geopolimer üretmek için metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, atım cam, pirinç külü, volkanik tüf gibi doğal ve yapay birçok hammadde kullanılabilmesine rağmen katı atıklar arasındaki farklılık ve kararsızlık geopolimer üzerinde büyük oranda farklılıklar yaratmaktadır.

2) Geopolimerin hızlı reaksiyon hızı ve yüksek karışım viskozitesi, zayıf işlenebilirlik ve kontrol edilemez priz süresine sebep olmakta iken bu durum da geopolimerin çalışmasını ve uygulanması önünde engeller oluşturabilmektedir

3) Geopolimer malzemelerin gevrekliği ve tokluk modifikasyonu da geliştirilmesi gereken dezavantajları arasında yer almaktadır.

4) Geopolimer için kullanılan aktivatörler, sınırlı ve pahalı olan NaOH ve Na_2SiO_3 gibi alkali aktivatörlerdir, bu da geopolimer malzemenin maliyetinin artmasına sebep olmaktadır.

5) Geopolimerlerin priz alması için içeriğinde büyük oranda alkali bulunmaktadır. Bu alkalilerin zaman içinde yüzeye çıkıp karbonik asit ile tepkimeye girmesi malzemelerin yüzeyinde çiçeklenme adı verilen probleme sebep olmaktadır.

6) Geopolimerin ürün ve teknoloji değerlendirme sistemi henüz kurulmamıştır ve tatmin edici standartlar ve spesifikasyonlar bulunmamaktadır. Bu durum standart bir geopolimer malzeme üretiminin uygulanmasını büyük ölçüde engellemektedir.

1.5. Lifler

Lifler, enerji sönümlemek ve eğilme dayanımını artırmak gibi amaçlarla geopolimer kompozitlerde takviye olarak iplik, tel, kılımsı ve nanoparçacık gibi formlarda kullanılabilmektedir. Prensip olarak, çimentolu ve geopolimer kompozitlerde takviye olarak elyaf seçiminde dikkate alınması gereken üç ana gereklilik vardır: (1) malzeme özelliklerinin uygulama ile uyumluluğu, (2) gerilmeleri iletmek için yeterli elyaf-matris etkileşimi ve (3) çatlama sonrası etkili davranışı sağlamak için optimum en boy oranı (Ranjbar ve Zhang, 2020).

Lif türleri, liflerin mekanik özellikleri, geometrik özellikleri ve uzaması ile yakından ilişkilidir ve lifli geopolimer kompozitlerin özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Lifli geopolimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılan güçlendirilmiş lifler arasında organik polimer lifler, selüloz lifler, çelik lifler, karbon lifler ve bazalt lifler bulunmaktadır (Liu ve Lv, 2022; Merta vd., 2022). Tablo 4'te lif türlerine göre bazı mekanik özellikleri verilmektedir. Farklı lif türlerinin özelliklerinin büyük ölçüde farklı olduğu görülebilir ve geopolimerlerin güçlendirilmesindeki etkisi farklıdır. Organik polimer lifler geleneksel inorganik liflere benzer şekilde yüksek çekme mukavemeti ve iyi özellikler sergilemektedir. Ancak, selüloz liflerinin elastik modülü ve çekme mukavemeti diğer liflere göre düşük seviyede kalmaktadır (Guo vd., 2022).

Tablo 4. Liflerin Mekanik Özellikleri (Guo vd., 2022)

Lif Türü	En-Boy Oranı	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Boyuna Uzama (%)
Bazalt	750	45	1360	2.7	1.2
Çelik	50	210	850	-	4.2
Polivinil Alkol	308	40	1600	1.30	6.42

Alkali ile aktifleştirilmiş geopolimer malzemeler genellikle büyük kırılganlık ve zayıf tokluk gibi dezavantajlara sahiptir. Bu kusurların üstesinden gelmek için, genellikle fiber sertleştirme ve organik polimer toklaştırma yoluyla geopolimer malzemelerin tokluk özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. İyileştirme için genelde geopolimer matrikse polipropilen lifi, polivinil alkol (PVA) lifi, bazalt lifi, karbon lifi ve vb. lifleri eklenmektedir. Şekil 7'de bazalt, çelik ve polivinil alkol lifler görülmektedir. Bazalt lifler 24 mm'lik kırpılmış olarak, çelik lifler ise 40 mm uzunluğunda olan türden kullanılmıştır.

Şekil 7.a

Şekil 7.b

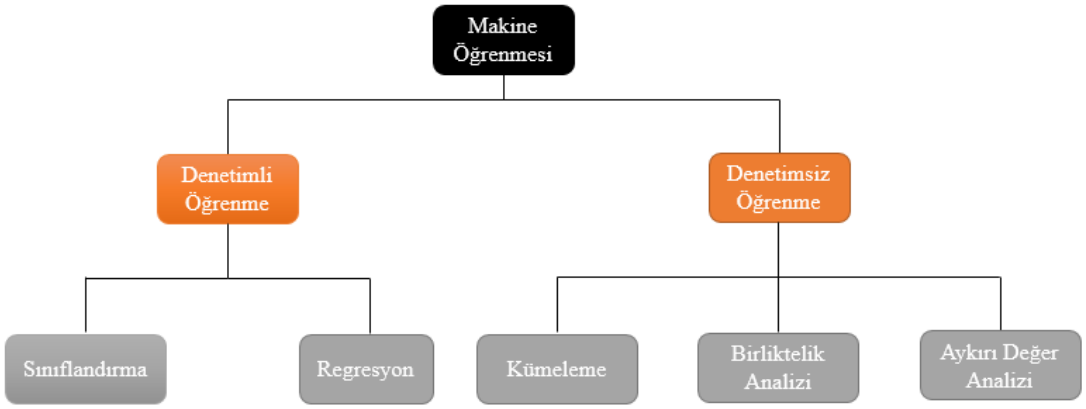
Şekil 7.c

Şekil 7. Lifler: a) Bazalt Lif, b) Çelik Lif ve c) Polivinil Alkol Lif (URL-1, 2023; URL-2, 2023; URL-3, 2023)

1.6. Makine Öğrenmesi İle Dayanımların Tahmininde Kullanılan Algoritmalar

Makine öğrenmesi, bilgisayarların matematik ve istatistik bilimlerini kullanarak herhangi bir şekilde elde edilmiş verinin işlenerek elde olmayan yeni verilerin elde edilmesi işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Makine öğrenmesi ile bilgisayarlar sonuçları doğrudan elde eden algoritmalar kullanmadan öğrenme süreci yoluyla öğrenme yeteneği kazanabilir. Makine öğrenmesi temelde ikiye ayrılmaktadır: denetimli ve denetimsiz öğrenme. Denetimli öğrenmede makinenin öğrenmesi bir

etiketlenmiş veri seti yardımıyla gerçekleşir. Ancak, denetimsiz öğrenme metodunda veriler benzer alt sınıflara ayrılır (Altay, 2020). Şekil 8'de makine öğrenmesine ait alt sınıflar gösterilmektedir.



Şekil 8. Makine Öğrenmesinin Alt Türleri (Altay, 2020)

Makine öğrenimi tabanlı modeller, görsel tanıma ve sınıflandırmaya uygulanır ve özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde eşikleme, kenar algılama, kümeleme gibi geleneksel görüntü bölümleme tekniklerinden daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmıştır (Jaglan, Dass ve Duhan, 2019; Sofuoğlu, 2022).

Makine öğrenimi modeli, mevcut verilerde bir dereceye kadar değişkenlik beklendiğinde, kabul edildiğinde ve açıkça tanımlanmış bir strateji mevcut olmadığında bir çözüm sağlamak için belirli bir duruma uygulanabilir. Maliyetli deneysel araştırmalar yapmak yerine, hesaplamalı zeka modelleri kullanılarak plastik kompozit yapı malzemelerinin özelliklerini doğru bir şekilde tahmin etmek mümkündür. Standart ve yeni modellere güvenmek yerine, malzemelerin özelliklerini yüksek doğruluk ve güvenilirlikle tahmin etmek için bilgi işlem zekası modelleri kullanılabilir. Bu, tekrarlayan, maliyetli ve zaman alıcı deneysel sorgulama ihtiyacını ortadan kaldırır. Bir tahmin modeli, RMSE, MSE, MAE ve R^2 kullanılarak değerlendirilir ve sonuçlar, K kat çapraz doğrulama kullanılarak doğrulanır. Bir regresyon modelinde, yüksek doğruluk, düşük MAE, MSE ve RMSE değerleri ve yüksek bir R^2 değeri ile gösterilir (Jain, Bhadauria ve Kushwah, 2023).

Bu tezin amacı deney verilerinin rastgeleliğini dikkate alarak kullanılacak makine öğrenmesi algoritmalarının kullanılabilirliğini ve performansını ölçmektir. Bu algoritmaların içerisinde lineer regresyon, karar ağaçları, k en yakın komşu, Rastgele

orman, karar ağaçları gibi algoritmaların beton ve geopolimer gibi yapı malzemelerinin dayanımlarını daha hızlı, daha düşük maliyetle yeterli doğrulukta tahmin edebileceği açıktır.

Tez çalışması kapsamında 13 farklı kombinasyon halinde üretilen geopolimer harç numunelerine 6 adet basınç, 3 adet eğilme testi uygulanarak elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması kullanılarak bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri setinde 156 adet basınç ve eğilme değeri, 5 adet girdi (Obsidiyen miktarı, Yüksek Fırın Cürufu miktarı, Metakaolin miktarı, Kırım günü ve Kür sıcaklığı) ve 1 adet çıktı (Basınç ve Eğilme Dayanımı) kullanılmıştır. Veri seti 5 farklı algoritma kullanılarak (Lineer Regresyon, Rastgele Orman, Karar Ağacı, Derin Sinir Ağları, kNN en yakın komşu) tahmin edilmiş, kullanılan algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır.

1.6.1. Değerlendirme Metrikleri

1.6.1.1. Determinasyon Katsayısı (R^2)

Deneysel verilerin lineer bir doğruya ne kadar yaklaştığının göstergesi R^2 katsayısıdır ki $R^2=1$ olduğunda deney verilerinin lineer bir doğrunun tam üzerine düştüğünü gösterir.

En küçük kareler yöntemi kullanılarak R^2 aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$R^2=1-(\sum(Y_j-Y_1)^2/\sum(Y_j-Y_2) \quad (4)$$

Bağıntıda yer alan Y_j deneysel verileri, Y_1 regresyon bağıntısından hesaplanan veriler, Y_2 ise deneysel verilerin ortalamasını ifade etmektedir (Sofuoğlu, 2022).

1.6.1.2. Ortalama Kare Hatası (MSE)

Ortalama kare hatası (MSE), bir ölçümün hassasiyetini nicelleştirir. En temel haliyle bu işlev, hedef ve öngörülen değerler arasındaki kare farkların ortalamasını hesaplar. Diğer bir deyişle, MSE, hedefi tahmin etmek için bir regresyon modeli kullanıldığında ortaya çıkan sonuçtur.

Ortalama kare hatası, (5) nolu bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{MSE}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{N}(yi-yj)^2 \quad (5)$$

Bağıntıda yer alan N veri sayısını, yi temel gerçek değerini ve yj ise regresyon modelinden tahmin edilen değeri ifade etmektedir (Sofuoğlu, 2022).

1.6.1.3. Ortalama Mutlak Hata (MAE)

Ortalama mutlak hata (MAE), temel gerçek ile belirli bir süre boyunca beklenen değerler arasındaki farkın ortalaması olarak tanımlanır. MAE farkın mutlak değerine dayalı olduğundan, hatanın yönünü göstermez, yani deneyin sonuçlarını az mı yoksa fazla mı tahmin ettiğimize ve MAE'nin türevlenebilir olmadığına dair bir gösterge sağlamaz. Ortalama mutlak hata (6) nolu bağıntı ile hesaplanabilir.

$$\text{MAE}=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{N}|yi-yj| \quad (6)$$

Burada, N veri sayısını, yi temel gerçek değerini ve yj ise regresyon modelinden tahmin edilen değeri göstermektedir (Sofuoğlu, 2022).

1.6.1.4. Karesel Ortalama Hata (RMSE)

Karesel ortalama hata (RMSE), hedef değer ile regresyon modeli tarafından öngörülen değer arasındaki kare farkının ortalamasının kareköküdür. Bağıntı (7) ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{RMSE}=\sqrt{1}/\text{N}*\sum_{j=1}^{N}(yi-yj)^2 \quad (7)$$

Burada, N veri sayısını, yi temel gerçek değerini ve yj ise regresyon modelinden tahmin edilen değeri ifade etmektedir.

Bir regresyon modelinin yüksek oranda doğruluğa sahip olduğu, yüksek bir R^2 ve düşük MAE, MSE ve RMSE değerine bağlıdır (Jain, Bhadauria ve Kushwah, 2023).

1.6.2. Algoritmalar

1.6.2.1. Lineer Regresyon

Regresyonun en basit hali olan lineer regresyonda y x'in doğrusal bir fonksiyonunu ifade eder.

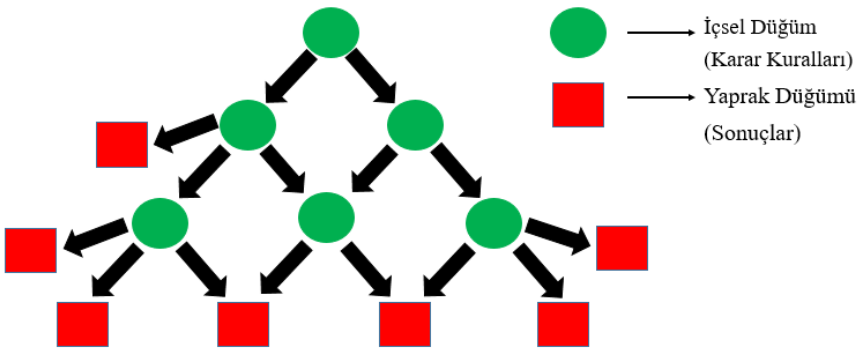
$$y=ax+b \quad (8)$$

Bağıntı (8) 'de a doğrunun eğimini yani bağımsız değişkenin ağırlık değerini, b çıktı değerini kontrol edebilmeyi sağlayan sabit değeri, y ise bağımlı değişkeni ifade

etmektedir. Algoritma çözüm için başlangıçta rastgele a ve b değerleri ile başlamakta, sonrasında hesaplanan hataların kare oranlarına göre düzenlenmektedir. Lineer regresyon modeli genel olarak tek değişkene bağlı cevap değişkenleri için kullanılmaktadır (Han, Kamber ve Pei, 2011).

1.6.2.2. Karar Ağaçları

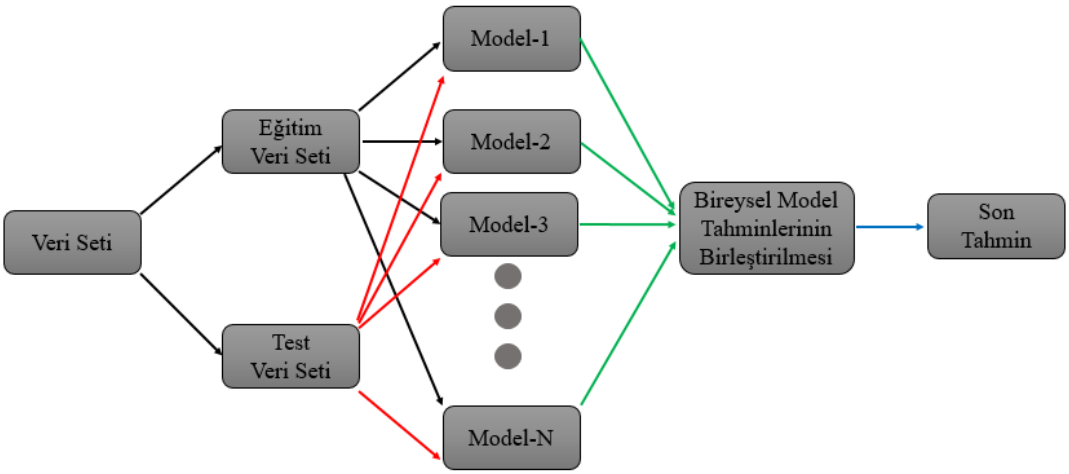
Karar ağaçları herhangi bir regresyon problemini kategorize etmek için sıklıkla kullanılan bireysel bir makine öğrenmesi algoritmasıdır ve ayrıca zorlukları sınıflandırmak için de kullanılabilmektedir. Ağacın içinde belirli sınıflar vardır, fakat sınıf olmadığı durumda bağımsız değişkenler kullanılması ile birlikte sonucun tahmini için regresyon yöntemleri kullanılabilmektedir. Genel olarak bir karar ağacı, iç düğümlerin veri tabanı özniteliklerini temsil ettiği hiyerarşik bir sınıflandırıcıdır. Sistemdeki her dal bir sonuç kurallarını, her yaprak düğümü ise sonucu belirtmektedir. Bir karar ağacı, karar düğümü ve yaprak düğümünden oluşur. Karar düğümlerinin birkaç adet dalı vardır ve dallar herhangi bir karar verme durumuna sahip iken yaprak düğümlerin dalları yoktur ki karar sonucu oluşan çıktıları ifade ederler. Kök düğümden başlayarak dal sayısına bağlı olarak büyümesi ağacı benzer bir yapıyı andırdığı için karar ağacı ismini almıştır. Karar ağaçları veri örneklerini çoklu segmentlere böler. Her karar noktasında, yürütülen algoritma gerçek ve tahmin arasındaki farkı belirler. Aynı zamanda her karar noktasında hatalar hesaplanır ve uygunluk fonksiyonu için en düşük değere sahip değişken bölme noktası olarak seçilir. İşlem defalarca tekrarlanır (Karbassi vd., 2014; Erdal, 2013; Chaabene, Flah ve Nehdi, 2020; Ahmad vd., 2022). Şekil 9'da karar ağaçlarına örnek olacak bir şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 9. Karar Ağaçları Mekanizmasının Şematik Gösterimi (Song vd., 2021)

1.6.2.3. AdaBoost Algoritması

Topluluk tekniği, ortak bir öğrenme algoritması kullanarak birden fazla modelin eğitilmesini sağlayan bir makine öğrenme yaklaşımıdır. Topluluk, çoklu sınıflandırıcılar olarak adlandırılan birden çok algoritmadan oluşur. Sorunu çözmek için, ortak bir hedefe doğru çalışan yüzlerce veya binlerce alt gruptan oluşan bir grup bir araya gelir. AdaBoost, topluluk öğreniminden yararlanan denetimli bir makine öğrenimi tekniğidir. Ağırlıklar her örneğe yeniden uyarlandığından ve yanlış sınıflandırılan örneklere artan değerlerde ağırlıklar atandığından, uyarlamalı güçlendirme olarak da adlandırılabilir. Güçlendirme teknikleri, yanılma ve varyansı düşürmek için denetimli makine öğreniminde sıklıkla kullanılır. Bu topluluk teknikleri, zorluk çeken öğreniciyi güçlendirmek için kullanılır. Giriş verileri için eğitim kısmında, sonsuz sayıda karar ağaçları kullanılır. Başlangıç karar ağacı modeli oluşturulurken, ilk model boyunca yanlış sınıflandırılmış kayıtlı verilere yüksek öncelik verilir. Bu veri kayıtları, başka bir model için girdi olarak kullanılan tek kayıtlardır. Buraya kadar anlatılan süreç, istenen temel öğrenen sayısı elde edilinceye kadar tekrarlanmalıdır. İkili sınıflandırma problemlerinde kullanılan AdaBoost regresörü, karar ağaçlarının performansını iyileştirme açısından diğer tüm regresörlerden daha iyi performans gösterdiği bilinmektedir. Ayrıca, diğer makine öğrenimi algoritmalarının performansını geliştirmek için de kullanılabilir. Topluluk algoritmaları en çok inşaat mühendisliği alanında, özellikle beton ve geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için kullanılabilmektedir (Wang vd., 2022). Şekil 10'da AdaBoost algoritmasına ait işleyiş şeması gösterilmektedir.



Şekil 10. AdaBoost Algoritması Süreç İşleyişi Şeması (Ahmad vd., 2022)

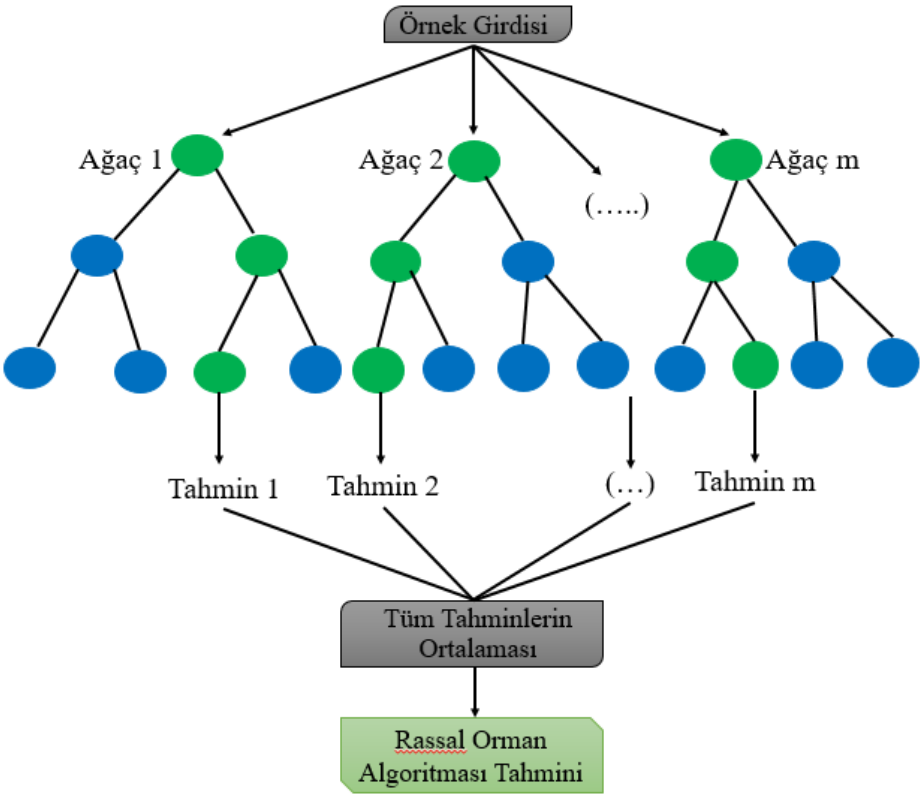
1.6.2.4. Rastgele Orman Algoritması (RF)

Breiman tarafından geliştirilen RF, bir değişkenin değerini tahmin etmek veya karakterize etmek için çok çeşitli karar ağacı tekniklerini içeren bir regresyon yaklaşımıdır (Liaw ve Wiener, 2002). Diğer bir deyişle, RF, belirli bir eğitim seti için karakteristik değerlerden oluşan girdi vektörünü aldıktan sonra regresyon ağaçları oluşturur ve sonuçların ortalamasını dikkate alır (Hastie, Tibshirani ve Friedman, 2001). Birkaç eğitim verisi alt kümesinden ağaçlar geliştirerek RF, farklı karar ağaçları arasındaki korelasyonu kaldırarak torbalamadaki (bagging) varyansı azaltır. RF modeli, orijinal veri setini değiştirme ile yeniden örnekleyerek torbalama yaklaşımını kullanarak eğitim verileri üretir. Belirli rastgele verilerin eğitim sırasında birden fazla kullanılabileceğini, diğer verilerin ise hiç kullanılmayabileceğinin unutulmaması gerekir. Bu tür bir paketleme özelliği, RF algoritmasının artan öngörülebilirliğine ve kararlılığına yardımcı olur. Genelleme yeteneğini daha da geliştirmek ve genelleme hatasını azaltmak için RF, bir ağaç büyütürken rastgele seçilmiş bir kanıtlayıcı özellik alt kümesindeki en iyi bölünmüş değişkenleri kullanır (Breinman, 2001). Torbalama işlemi eğitimi için seçilmeyen numuneler, poşet dışı numuneler olarak bilinir. Rastgele seçilen ve tek bir karar ağacının her bölümünde kullanılan değişken sayısı (m) ve ağaç sayısı (B) RFA oluşturmada iki önemli hiperparametredir. Bu iki parametre sıklıkla bir ızgara araması ve çapraz doğrulama kullanılarak bulunur (Liaw ve Wiener, 2002). Bir RFA modeli oluşturmak için prosedürlerin aşağıdaki gibi olduğunu belirtir:
1)Her b=1'den B'ye kadar olan değerler için;

a) Eğitim verilerinden, N boyutunda bir önyükleme örneği çizilir.
b) Aşağıdaki adımlar, ağacın her terminal düğümü için, minimum düğüm boyutu nmin olana kadar yinelemeli olarak tekrarlanmalıdır. Bir RF ağacı, Tb büyütmek için önyükleme verilerine göre elde edilir.
   i)Toplam p değişkenlerinden m değişkenleri rastgele olarak seçilir.
   ii)m değişkenleri arasından en iyi olan seçilir.
   iii)Düğüm ikiye bölünerek iki alt bölge oluşturulur.

2) Ağaçlar topluluğunun çıktısı alınır, {Tb}i, i=1,2,…,B.

Regresyon problemi için karşılık gelen tahmin, $\hat{y}=\frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} T_b(x)$ verilen yeni bir x girdisi ile ifade edilebilir. Şekil 11'de Rastgele orman algoritması için kullanılan işlem adımları gösterilmektedir.



Şekil 11. Rastgele Orman Algoritması İşleyiş Örneği (Zeini vd., 2023)

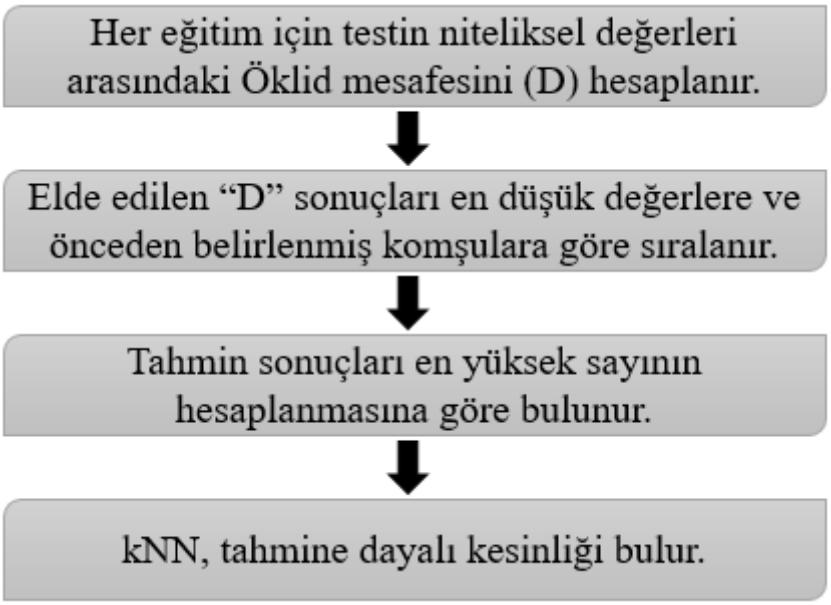
1.6.2.5. K En Yakın Komşu Algoritması (kNN)

K en yakın komşu algoritması hem regresyon hem de sınıflandırma yapmak için kullanılabilen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Altman, 1992; Tanyildizi, 2021). kNN algoritması, eğitim aşamasında tespit edilen k sınıf merkezini hesapta dikkate alır. Daha sonra test değerlerini bu sınıf merkezlerinden uzaklıklarına göre sınıflandırır (Tanyildizi, 2021; Yao ve Ruzzo, 2006). Sınıf merkezlerine yakınlığın bir ölçüsü olarak Öklid, Minkowski ve Manhattan mesafelerini kullanır. Bir test örneği xtest ile bir eğitim örneği xeğitim arasındaki mesafe, aşağıdaki denklemle Öklid mesafesi kullanılarak bulunur (Tanyildizi, 2021; Zhang, 2020).

$$D=\sqrt{\sum_{n=1}^{h}\left(x_{test,n}-x_{eğitim,n}\right)^2} \quad (9)$$

(9) nolu bağıntıda yer alan ifadede D mesafeyi, h hata boyutunu göstermektedir.

k en yakın komşu algoritmasında genel olarak 4 aşama vardır. Bu aşamalar Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 12. k en yakın komşu algoritması işlem adımları (Tanyildizi, 2021; Kurniadi vd., 2018)

1.7. Literatür Özeti

Geopolimer konusunda birçok puzolanik ve atık malzemeye dair mekanik özellikler, karışım oranları, alkali bağlayıcı molaritesi, kür süresi ve sıcaklığı, lif etkisi ve yapay zeka algoritmaları ile tahmin konularında çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, geopolimer harç ve betonların optimum üretim ve tahmin ile mekanik özelliklerinin belirlenmeye çalışıldığı gözlenmiştir. Bu çalışmaların bir kısmının kısa özeti aşağıda yer almaktadır.

Kuranlı, 2020; çalışmasında farklı bağlayıcı, lif ve lif oranları ile geopolimer betonlar üreterek mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Ana bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu külü, lif türü olarak polipropilen, çelik ve poliamid lifler tercih edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre 28 günlük dayanımda ortalama olarak 57 MPa, 90 günlük dayanımlarda ise 90 MPa değerine ulaşarak kontrol numunesine göre yaklaşık %14 iyileştirme sağlamışlardır. Uçucu kül ikamesinin mekanik olarak daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Basınç dayanımında en büyük kayıp polipropilen lifli numunelerde görüldüğünü ifade etmişlerdir. Eğilme dayanımları incelendiğinde cüruflu numunelerin performansının daha iyi seviyede olduğu belirtilmiştir. Kuranlı, 2020; ayrıca yüksek dayanımlı portland çimentolu harçların kullanıldığı karışımların 600 °C'de %50 dayanım kaybı yaşadığını, geopolimer beton

numunelerinde ortalama olarak %33 dayanım kaybı yaşandığını ve bu noktada geopolimer betonların yüksek sıcaklığa yüksek direnç gösterdiğini ifade etmiştir. Aynı zamanda, genel olarak hacimce % 0,4 ve 0,8 olarak ilave edilen liflerde eğilme dayanımında ortalama %11 azalma olduğunu tespit etmiştir.

Chakkor, 2021; çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak metakaolin, kırmızı çamur, dolgu malzemesi olarak dere kumu ile oluşturulan numunelere, dere kumu yerine %25, %50, %75 oranında kireçtozu, mermer tozu ve bazalt tozu ile yer değiştirerek geopolimer harçlar üretmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Geopolimer harçların durabilite özellikleri 200, 400, 600 ve 800 ℃'de yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bazalt tozu ile üretilen numunelerde diğer numunelere göre daha yüksek mukavemet özellikleri elde edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde mermer tozu ile üretilen numunelerin kontrol numunelerine kıyasla daha zayıf mekanik ve dayanıklılık performansı gösterdiği tespit edilmiştir.

Aydın, 2010; çalışmasında farklı kür şartları (standart su, buhar ve otoklav), alkali aktivatör oranlarının (SiO_2/Na_2O ve Na_2O) yüksek fırın cüruflu geopolimer numunelere etkisini incelemiştir. Aynı zamanda cüruf yerine silis dumanı, alçı, metakaolin, uçucu kül ikame ederek ve bazı kimyasal katkılar (köpük önleyici, hava sürükleyici) ilave edilerek oluşan değişiklikleri elde etmeye çalışmışlardır. Elde edilen mekanik özelliklere göre, silis dumanının en etkin atık madde olduğunu belirtmişlerdir. Çelik lif kullanımı için % 3 oranında kısa kesilmiş lif yerine %1,5 oranında uzun kesilmiş lif kullanımının malzeme tokluğunu geliştirmek açısında daha uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Otoklav kürü geleneksel betonda daha iyi sonuçlar verirken, geopolimer betonda buhar kürünün daha iyi performansa sahip olduğu ifade edilmiştir. Cüruf yerine %30 silis dumanı ikamesi basınç dayanımı maksimum değerini elde ettirirken, %20 ikame oranı ise maksimum eğilme dayanımını sağladığı tespit edilmiştir.

Akbulut, 2020; çalışmasında Erzurum Pasinler yöresinden elde ettiği perliti bağlayıcı olarak %10, %20, %30 oranlarında yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur ile yer değiştirerek geopolimer üretiminde kullanmıştır. Alkali aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit (NaOH) kullanmıştır. Kür sıcaklığı ve süresi olarak 90 ℃ ve 72 saat tercih edilmiştir. Durabilite özelliklerinin belirlenebilmesi için numuneler %5 HCI ve

$MgSO_4$ çözeltilerine ve 300,500 ve 700 ℃ yüksek sıcaklık değerlerine maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en düşük basınç dayanımı 16,2 MPa ile 7 günde %100 perlit içeren numunelerden elde edilmiş, maksimum basınç dayanımı ise 40,7 MPa ile 28 günde %30 kırmızı çamur ve %70 perlit içeren numunelerden elde edilmiştir. 3 gün ısıl kür uygulanan numunelerin basınç dayanımı 7 günlük basınç dayanımlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiş, aktivatör olarak sadece NaOH kullanılan çalışmalarda ısıl kürden sonra laboratuvar ortamında meydana gelen dayanım kaybından dolayı ileri yaş dayanımı tespiti için minimum 7 güne göre belirlenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. 4 hafta boyunca %5'lik HCI ve $MgSO_4$ çözeltilerine maruz bırakılan numunelerde maksimum dayanım kaybı sırasıyla %38,8 ve %60,5'tir. Yalnızca perlit kullanılan numunelerin dayanımlarını yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur ikamesinin artırdığı belirtilmiştir.

Kalaycıklı, 2020; çalışmasında %95 yüksek fırın cürufu ve %5 silis dumanı karışımı, %65 yüksek fırın cürufu, % 30 uçucu kül ve %5 silis dumanı karışımı, %15 yüksek fırın cürufu, %80 uçucu kül ve %5 silis dumanı olacak şekilde üç farklı karışım reçetesi ile geopolimer beton üretmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum bileşimleri tercih etmişlerdir. Sonuç olarak, basınç dayanımı olarak %95 yüksek fırın cüruflu numuneler ortalama 42 MPa, %65 yüksek fırın cüruflu numuneler 25 MPa, %15 yüksek fırın cüruflu numuneler ise yaklaşık 15 MPa basınç dayanımı değerine ulaşmıştır. Yüksek fırın cürufu değeri azaldıkça asit etkisinden dolayı basınç dayanımındaki azalmanın arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufu ağırlığı arttıkça ağırlık kaybı değerinin azaldığı ifade edilmiştir.

Güzelküçük, 2020; çalışmasında perlitin geopolimer harçlarda alkali aktivatör olarak farklı oranlarda sodyum hidroksit ile birlikte aktive edilerek kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ardından genleştirilmiş perliti standart kum yerine ikame ederek geopolimer numuneler üzerinde bazı testler gerçekleştirmiştir. Kür sıcaklığı 90, 100, 110 ℃, kür süresi ise 24 ve 48 saat tercih edilmiştir. Alkali aktivatör molarite değeri olarak 7-15 arasındaki değerlerden optimum sonuç belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, genel olarak 90 ve 100℃'de kür süresi 24 saatten 48 saate çıkarıldığından basınç dayanımlarının arttığı, ancak 110 ℃'de 48 saat kür için ise basınç dayanımlarının 24 saate kür süresine göre azaldığı tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarında maksimum değeri 24 saat kür süresi, 15,45 molarite değeri, 110 ℃

kür sıcaklığı şartları için yaklaşık 46,8 MPa olurken; minimum değer 48 saat kür süresi, 7,72 molarite değeri sahip 90 ℃ kür sıcaklığı altındaki numunede yaklaşık 7,4 MPa olarak elde edildiğini belirtmiştir.

Hassan Sarkaz, 2020; çalışmasında yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimer betonlarda 1-4 mm boyutlarında 4 farklı atık lastik tipi için %5, %10 ve %15 oranlarında kullanarak kontrol grubu dahil olmak üzere 13 farklı numune hazırlamıştır. Hazırladığı numunelere taze, sertleşmiş hal (yayılma çapı, yoğunluk, su emme oranı, eğilme ve basınç dayanımı) ve yüksek sıcaklık etkisi (300, 600 ve 900℃) testleri uygulamıştır. Elde edilen bulgulara göre, artan atık lastik miktarının işlenebilirliği azalttığı tespit edilmiştir. Maksimum basınç dayanımı için ise yaklaşık 3 günde 50,2 MPa, 7 günde 52,9 MPa ve 28 günde 56,2 MPa değerlerini 1-2 mm boyutlara sahip %5 katkı oranı durumunda elde etmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi incelendiğinde 900 ℃'de dayanım değerleri bozulmadan dolayı elde edilememiş, en yüksek basınç dayanımı 300 ℃'de 39,6 MPa ile 0-1 mm boyutlarıda %5 katkı oranı için elde edilmiştir. Sıcaklık değeri arttıkça dayanımın azaldığını belirtmiştir.

Topal, 2020; çalışmasında yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimer betonlara geri dönüştürülmüş agregayı %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame ederek yangına karşı dayanıklılığına etkisini araştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) tercih etmiştir. Numunelere çeşitli su emme, basınç dayanımı vs. deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri verileri görsel ve mikro yapı analizleri ile desteklemişlerdir. Yangın etkisi için numuneler 100, 200, 400, 600 ve 800 ℃ maruz bırakılmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, normal şartlar için geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımı azalmış, su emme oranı artmıştır. Yangına maruz bırakıldıktan sonra suda soğumaya bırakılan numunelerin dayanımı, havada ve fırında soğumaya bırakılan numunelere göre daha düşük çıktığını belirtmiştir.

Bilal, 2019; çalışmasında yüksek fırın cürufu yerine %0, %5, %10 ve %15 oranında pirinç kabuğu külü; %0, %10, %20 ve %30 oranında seramik tozunun ikamesi ile geopolimer harçlar üretmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH 12, 14, 16 ve 18 molalite cinsinden kullanmayı tercih etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, basınç dayanımı üzerinde pirinç kabuğu külünün seramik tozundan daha etkili olduğu, 70 MPa üzeri dayanım elde edilebilmesi için 14-16 molalite ile %2 pirinç kabuğu külü

veya %15 seramik tozu oranının geçilmemesi gerektiğini belirtmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde ise seramik tozu kullanımının pirinç kabuğu kullanımına göre daha avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir. Optimum sonuçlar, basınç dayanımı için seramik tozu %20, pirinç kabuğu tozu %0 ve molalite 18 için elde edilmiştir.

Çelik, 2019; çalışmasında metakaolin tabanlı bor atığı katkılı geopolimerlere lif ekleyerek yüksek sıcaklık etkisi altında davranışlarını incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı tercih etmişlerdir. Polivinil alkol lifli numunelerin kontrol grubuna göre yaklaşık %415 eğilme tokluğu artışı sağladığını belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklık etkisi altında polivinil alkol ve bazalt liflerinin eğilme davranışında poliamid ve poliolefin liflere göre daha iyi performans gösterdiklerini ifade etmiştir. Örnek vermek gerekirse, geopolimerlere hacimce %1,2'lik polivinil alkol lif eklenmesi 3 günde %32,9; 7 günde ise %27,3 eğilme mukavemetini artırmıştır.

Köker, 2019; çalışmasında 1.2-2.5 mm dane çapına sahip kuvars agregasını uçucu kül ile %0, %10, %20, %25, %30, %40, %50, %75 ve %100 oranında ikame ederek geopolimer harçlar üretmişlerdir. Alkali aktivatör olarak 12 molar NaOH ile 1/ 2.5 oranını sağlayacak şekilde Na_2SiO_3 karışımı tercih etmiştir. Kür sıcaklığı ve süresi 100 ℃ ve 24 saat olarak uygulanmıştır. Deney sonuçlarından, %25 'e kadar uçucu kül ikamesi fiziksel özellikler için olumlu yönde etki yaratırken, özellikle %40 ve üzeri oranlarda ikame edilen uçucu kül kontrol numunesine göre olumsuz özellikler teşkil ettiği ifade edilmiştir.

Arslan, 2019; çalışmasında metakaolin ve kolemanit malzemelerini bağlayıcı, bazalt ve polivinil alkol lifi katkı olarak kullanarak geopolimer harçlar üreterek mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yüksek sıcaklık etkisi için numuneler 200, 400 ve 600℃ sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Kür etkisi için ıslatma ve kurutma kürü kullanılmıştır. Bu kür sisteminde bazı numunelere 3 gün etüvde 60 ℃ kür uygulandıktan sonra deney gününe kadar plastik kapta saklanıken, diğer numuneler 3 gün suda bekletilmiş, ardından 3 gün etüvde 60 ℃'de tutulmuş, nihai olarak da deney gününe kadar plastik kapta muhafaza edilmiştir. Bu şekilde 7 seri numune üretilirken, karışım olarak tüm serilerde %90 metakaolin ve %10 kolemanit kullanılmıştır. Serilere kütlece %0,8; %1,6 ve %2,4 oranında polivinil alkol ve bazalt lif eklenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde lif oranının artışı basınç ve eğilme dayanımına olumlu etki yaratmış,

ayrıca ıslanma ve kuruma çevrimi ile uygulanan kür sadece sıcaklık kürüne göre daha olumlu yanıt verdiği tespit edilmiştir. Bu durum, 28 günde çevrimli kür uygulanan lifli numunelerin kontrol grubuna göre yaklaşık %14-24 arasında daha fazla basınç dayanımına sahip olmasından anlaşılmaktadır.

Aygörmez, 2018; çalışmasında metakaolini silis dumanı ve kolemanit ile %40 oranına kadar ikame ederek geopolimer harçlar üretmiş, üretilen liflere polipropilen liflerin etkisini araştırmıştır. Yüksek sıcaklık etkisini incelemek için numuneleri 300, 600 ve 900 ℃ sıcaklığa maruz bırakmıştır. Elde edilen sonuçlara göre polipropilen liflerin eğilme dayanımı ve aşınma üzerinde olumlu etkileri olurken, basınç dayanımı üzerinde önemli bir fark yaratmadığını ifade etmiştir. 28 günde %10 kolemanit ve %20 silis dumanı eklenen numunelerde eğilme dayanımı yaklaşık %15 ile %29 arasında artmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde metakaolin tabanlı geopolimer harçların Portland çimentolu harçlara göre daha iyi dayanım özelliklerine sahip olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda %100 metakaolinli geopolimer numuneler 57.2 MPa dayanıma sahip olurken, lif eklenmiş numunede 56.5 MPa dayanım elde edilmiştir. Eğilme dayanımı için ise lifsiz numune 10.4 MPa dayanıma sahip iken, lifli numunede 11.9 MPa dayanım elde edilmiştir.

Maraş, 2013; çalışmasında Elazığ ferrokrom cürufunu geopolimer beton üretiminde kullanarak 0,5; 0,6 ve 0,7 oranlarında Si ve %4, %7, %10 ve %12 Na_2O modülü, 0,30; 0,35 ve 0,40 su/bağlayıcı oranı olmak üzere optimum çözümün ne olduğuna cevap aramıştır. Sonuç olarak en optimum alkali aktivatör oranının Si modülü için 0,7; Na_2O oranı için %7 olduğunu ifade etmiştir. En yüksek dayanımı su/bağlayıcı oranı 0,30 olduğunda elde ederken, geopolimer beton üretiminde kür süresi arttıkça dayanımın arttığını belirtmiştir.

Turhan, 2020; çalışmasında perlit tabanlı geopolimer harçlara uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında ikame edilerek 10 farklı deney seti hazırlamıştır. Üretilen numuneler sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı ile aktive edilmiş, 3 gün boyunca 90 ℃'de kür edilmiştir. Perlit ile üretilen numunelere atık malzemelerin katkısı dayanım olarak geopolimer harçların iyileşmesini sağladığını ifade etmişlerdir.

Nawar, 2018; çalışmasında metakaolin tabanlı harçlara ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında kolemaniti ikame etmiştir. Lifsiz ve bazalt lifli numunelerin mekanik

özelliklerini 10 molar NaOH ve Na_2SiO_3/NaOH oranı 1 olacak şekilde hazırlanan karışım ile aktive ederek araştırmışlardır. Numuneler Davidovits'in önerdiği şekilde 24 saat oda sıcaklığında bıraktıktan sonra 3 gün boyunca 60 ℃'de kür etmiştir. Ulaştığı bulgular incelenildiğinde, %10 kolemanit ikamesi dayanım açısından olumlu etkiler yaratırken, aynı oranda kolemanit kullanımı durumunda bazalt lif takviyesinin eğilme dayanımını büyük oranda iyileştirdiğini ifade etmiştir.

Başçik, 2019; çalışmasında kalsine ettikleri tras ve zeoliti geopolimer harç üretmek için kullanmıştır. Gerçekleştirdiği deneylerden sonra en uygun kalsinasyon sıcaklığı ve süresini tras için 550 ℃ ve 6 saat, zeolit için 850 ℃ ve 2 saat olarak bulmuştur. Geopolimer harçların optimum silis modülü Ms (SiO_2/Na_2O) ise 1,6; en uygun kür sıcaklığı ve süresi 90℃ ve 3 gündür. Kalsinasyon işlemi uygulanmış zeolit ve trasla üretilen geopolimer harçların basınç dayanımının kalsinasyon uygulanmamış numunelerin basınç dayanımının yaklaşık olarak iki katı olduğunu ifade etmiştir.

Kalkan, 2017; çalışmasında Elazığ ferrokrom cürufunu 45 mikron altında öğüterek dere agregasıyla birleştirerek geopolimer beton numuneler üretmiştir. Alkali aktivatör olarak silis modülü (Ms) 1,25; 1,50 ve 1,75 olarak tercih edilmiştir. Bağlayıcı madde olan cüruf yerine aynı zamanda ağırlıkça %10 ve %20 oranında silis dumanı ikame etmiştir. Numunelerin kür sıcaklığı 23, 40, 60, 80 ve 100 ℃ ve kür süresi 24, 48, 72 ve 96 olacak şekilde seçilerek etkileri incelenmeye çalışılmıştır. Elde ettikleri deney verilerinden, optimum basınç dayanımı olan 20,2 MPa değeri, Ms=1.25, kür süresi 96 saat ve kür sıcaklığı 100℃ olması durumunda elde edildiğini belirtmiştir.

Örklemez, 2019; çalışmasında F sınıfı uçucu küle ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında diatomit ikame ederek geopolimer harçlar üretmiştir. Alkali aktivatör %10 Na^+ içerecek şekilde oluşturulmuş ve NaOH olarak belirlenmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,31 ve kum/bağlayıcı oranı 3'tür. Kür seçenekleri ise 60 ℃, 75 ℃ ve 90 ℃ olmak üzere farklı sıcaklık ve 24, 48, 72 saat olacak şekilde farklı süre olarak tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda diatomit ikamesinin %3 değerine kadar dayanımı iyileştirdiğini ifade etmiştir.

Balun, 2019; çalışmasında Bitlis yöresi pomzasına ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 Portland çimentosu ekleyerek Na_2SiO_3 / KOH oranı 1, 2 ve 3 olacak şekilde alkali aktivatörler ile aktive ederek geopolimer numuneler üretmiştir. Alkali çözelti/bağlayıcı oranı 0,47; 0,50 ve 0,53 olarak kullanılmıştır. Numuneler 20, 40, 60,

80, 100 ve 120 ℃'de 24, 48, 72 ve 96 saat kür şartlarına tabi tutulmuştur. Dayanımların elde edilmesi için 3, 28 ve 90 gün beklenilerek basınç dayanımını testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numuneler 200, 400, 600, 800 ve 1000 ℃'de yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Elde edilen bulgular Bitlis yöresi pomzasının puzolanik malzeme olarak kullanılabileceğini, kullanılan Na_2SiO_3'ün oranının artmasının priz sürelerini artırdığını, elde edilen en yüksek basınç dayanımının 60 ℃'de 24 saat kür şartı altında %20 Portland çimentosu içeren karışımda 53,4 MPa olduğunu, en uygun kür sıcaklığının pomza içeren karışımlarda 100℃, pomza içermeyen hamurlarda ise 80℃ olduğu, en uygun kür süresinin ise 72 saat olduğunu, 100 ℃'de 72 saat kür edilen hamurların 28 günlük dayanımının 91,1 MPa olarak elde edildiğini, yüksek sıcaklık etkisinin basınç dayanımlarını düşürdüğünü ve 1000 ℃'de basınç dayanımı kaybının yaklaşık %86 olduğunu göstermiştir.

Naenudon vd., 2023; çalışmalarında atık seramik elektrik yalıtkan malzemesinden geri dönüştürdükleri agregayı geopolimer betonda kullanarak doğal iri agrega ile performansını karşılaştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat/sodyum hidroksit (NS/NH) sırasıyla 1,5; 2; 2,5; NH konsantrasyonu ise 10, 15 ve 20 molar olarak seçilmiştir. Kür sıcaklığı 60, 80 ve 100 C°, kür süresi ise 48, 96 ve 144 saat olacak şekilde deneyleri yürütmüşlerdir. Doğal agrega ile üretilen, 20 molar NH konsantrasyonu ve NS/NH oranı 2 olan numunede basınç dayanımı 56,0 ± 1,6 MPa elde edilirken, aynı şartlarda atık elektrik yalıtkan malzemesi ikame edilerek üretilen numunelerde 62,1 ± 2,0 MPa dayanım elde edilmiştir. Doğal agregalı numunelerde bahsedilen şartlar altında 6,19 MPa eğilme dayanımı elde edilirken, atık malzeme ikameli numunelerde 6,91 MPa olarak elde edilmiştir. Genel olarak NH konsantrasyonu ve NS/NH oranı, kür sıcaklığı ve kür süresinin artması basınç dayanımını artırdığını ifade etmişlerdir.

Mashri vd., 2023; çalışmalarında, istatistiksel tasarım programı Taguchi yardımıyla geopolimer harç üretiminde yüksek oranda ultra ince palmiye yağı yakıt külü, düşük oranda yumurta kabuğu külü ve silika dumanı kullanımının etkisini araştırmışlardır. Araştırma parametreleri NaOH konsantrasyonu, Na-silikat/NaOH oranı, yumurta kabuğu külü miktarı ve silika dumanı miktarı olmak üzere 4 farklı parametrenin her birinde 3 farklı değer içermektedir. Taguchi methodunun önerdiği 3x4 matrise uygun olarak 9 farklı kombinasyon için geopolimer harçlar üretmişlerdir.

Maksimum basınç dayanımını 10 molar NaOH konsantrasyonu, Na_2SiO_3/NaOH=2, ağırlıkça %11,5 silika dumanı ve ağırlıkça %11,5 yumurta kabuğu külü içeren harç numunesi 28 günde 125.4 MPa basınç dayanımı kazanmıştır.

Xu vd., 2023; çalışmalarında, geri dönüştürülmüş inşaat atığı ikame ettikleri geopolimerleri atık su tutucu bazalt fiberler ekleyerek güçlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar %0,6 oranında ikame ettikleri atık su tutucu bazalt fiber ekledikleri numunelerin kontrol grubuna göre basınç ve eğilme dayanımını yaklaşık olarak sırasıyla %60 ve %85 oranında arttırdığını göstermiştir.

Kim vd., 2023; çalışmalarında, Ca açısından zengin cüruf tabanlı ultra yüksek performanslı lif ile güçlendirilmiş geopolimer betonlar üretmişlerdir. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla 0,16'dan 0.8'e kadar çeşitli kum/bağlayıcı oranlarını denemişlerdir. Ayrıca ikame ettikleri silika dumanı dolgu etkisi ve cürufun reaktifliğini arttırarak dayanıma katkı sağlamıştır. Kum/bağlayıcı oranı 0,8 olduğu numunelerin basınç dayanımı 160,7 MPa, çekme dayanımı ise 10,3 MPa olarak elde edilmiştir.

Zhang vd., 2022; çalışmalarında, cüruf ve metakaolin tabanlı ultra yüksek dayanımlı geopolimer betonlar üretmişlerdir. Üretilen geopolimer betonlara NaOH molaritesi ve çelif lif ikamesinin oluşturduğu etkileri incelemeyi hedeflemişlerdir. Ürettikleri geopolimer betonlar çelik lif ikame edilmeden 100 MPa basınç dayanımına sahip olurken, %2 çelik lif ikamesi durumunda 140 MPa dayanım kazanmıştır. Ayrıca 4, 8 ve 12 molar NaOH kullandıkları karışımlarda optimum değer olarak 12 molar değeri bulunmuştur.

Tan vd., 2020; çalışmalarında, kimyasal aktivitesi düşük olan karışık geri dönüştürülmüş agrega kullanarak ürettikleri geopolimer harçların basınç dayanımına metakaolin, mikro dalga kürü ve ortam sıcaklığı kürünün etkisini araştırmışlardır. Mikro dalga kürünün basınç dayanımını arttırdığını, ayrıca metakaolin ikamesinin mikro dalga kür yönteminin etkinliğini artırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca optimal mikrodalga kür süresinin 40 saniye olduğunu, mikro dalga kürden önceki ortam sıcaklığı kürünün 3 günü aşmaması gerektiğini belirtmişlerdir.

Dao vd., 2019; çalışmalarında, agrega olarak kalın ve ince atık çelik cürufu kullandıkları geopolimer betonların basınç dayanımının tahmininde uyarlayıcı bulanık mantık sonuç çıkarımı (ANFIS) ve yapay sinir ağı kullanarak algoritmaların

performansını karşılaştırmışlardır. Çalışmada kullanılan beton karışımlarında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen toplam 210 numune için 28 günlük hedeflenen basınç dayanımı değerleri 25, 35 ve 45 MPa'dır. Algoritma sonuçları göstermiştir ki ANFIS algoritması, ki performans metrikleri MAE=1.655 MPa, RMSE=2.265 MPa ve R^2= 0.879'dir, ANN algoritmasının, ki performans metrikleri MAE =1.989 MPa, RMSE = 2.423 MPa ve R^2 = 0.851'dir, performasından daha iyi bir performans sergilemiştir.

Toufigh ve Jafari, 2021; çalışmalarında, uçucu kül tabanlı geopolimerlerin kimyasal bileşimlerindeki bileşenlere dayalı olarak basınç dayanımlarını tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışma kapsamında 2000-2020 yıllarında gerçekleştirilmiş olan 162 karışım tasarımı dikkate alınmıştır. Girdi ve çıktılar arasındaki korelasyonun belirlenmesi için Bayesian lineer regresyon algoritması kullanılmıştır. Yapılan girdi önem analizinde en önemli bileşenler uçucu kül ve sodyum silikat olduğunu belirtmişlerdir.

Liang vd., 2019 çalışmalarında, metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlere %40'a kadar pirinç kabuğu külü ikamesinin mekanik ve iç yapılara etkisini araştırmışlardır. Pirinç kabuğu külünün metakaolin tabanlı geopolimer pastalarda, optimum ikame miktarının %30 olduğunu ve referans numunelerine göre yaklaşık %57 arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca numunelerde oluşan Al/Si oranının 0,66-0,81 arasında değiştiğini göstermişlerdir.

Li vd., 2022; çalışmalarında, nehirdeki siltli sediment malzemesinin geopolimer üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada sodyum silikat çözeltisi, sönmemiş kireç, sodyum sülfat karışımı, cüruf içeriği, uçucu kül içeriği, silika dumanı içeriği, kür şartları ve numune kırım gününün basınç dayanımına etkileri parametreler olarak seçilmiştir. Çalışmanın sonuçları göstermiştir ki %10 silika dumanı kullanıldığında basınç dayanımı çalışma için maksimum değer olan 33,25 MPa değerine ulaşmıştır. Ayrıca bu sonuçlar hidrolik yapılarda bulunan ve kapasitenin düşmesine sebep olan birikinti malzemenin geopolimer üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir.

Kürklü, 2016; çalışmasında, uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara %25, %50, %75 ve %100 oranında yüksek fırın cürufu ikamesinin farklı L/B oranları, farklı kür süreleri değişkenleri altında etkisini incelemişlerdir. Çalışmada NaOH konsantrasyonu

14 molar ve kür sıcaklığı 60 C° olarak sabit tutulmuştur. Çalışmanın sonuçları %25 yüksek fırın cürufu ikamesi ve 5 saat kür süresi için maksimum eğilme dayanımının 3,6 MPa, 100 yüksek fırın cürufu ve 48 saat kür süresi için ise en büyük basınç dayanımını 27,3 MPa olarak elde etmiştir. Ayrıca optimum L/B oranı 0.7 olduğunu ifade etmiştir.

Prabha vd., 2022; çalışmalarında, yüksek Ca içeriğine sahip uçucu kül tabanlı geopolimer harç ve betonlara ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 dolomit tozu ikamesinin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada alkali aktivatör olarak 8, 10, 12 ve 14 molar NaOH ve Na_2SiO_3/NaOH oranı 2.5 olacak şekilde cam suyu karışımı tercih edilmiştir. Ayrıca sıvı/bağlayıcı oranı 0,5'tir. Mekanik test sonuçları göstermiştir ki 28 günlük maksimum basınç dayanım değeri olan 41,95 MPa, 14 molar NaOH ve %20 dolomit tozu ikamesi sonucunda elde edilmiştir.

Kanagaraj vd., 2023; çalışmalarında, kullanıcı ve çevre dostu metodolojiye sahip, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu muhteva eden, akışkanlaştırıcı kullanılmadan kendiliğinden yerleşen geopolimer üretmişlerdir. Çalışmada kullanılan su/bağlayıcı oranı 0,45-0,65 aralığındadır. Çalışma sonuçları bildirmiştir ki 0,45 su/bağlayıcı oranına sahip karışımların 28 günlük basınç dayanımı 46 MPa iken, 0,65 su/bağlayıcı oranına sahip karışımların basınç dayanımı 39 MPa mertebesindedir. Ayrıca kendiliğinden yerleşen geopolimer karışımların bir yönetmelik ve şartnamesi olmadığından, çalışmada bir rehber olabilecek esaslar tavsiye etmişlerdir.

Haily vd., 2023; çalışmalarında, fosfat çamuru, metakaolin ve kum içeren geopolimer karışımlara gevrek yapısını iyileştirmek veya sünekliğini artırmak amacıyla sentetik lifler yerine çam kozalağı ve cam gibi doğal lifler ikame etmişlerdir. Mekanik özellikler göstermiştir ki beklenildiği gibi basınç dayanımı artarken, eğilme dayanımı oldukça artmıştır. Ayrıca kum ağırlığının %50'si, ki bu çalışmada lif oranı kum ağırlığının %50'sini aştığında işlenebilirlik ve akışkanlık oldukça zorlaştığından %50 ile sınırlandırılmıştır, kadar doğal çam kozalağı kullanılan numunelerin basınç dayanımı kontrol grubuna göre çok az miktarda düşerken, sentetik lif olan cam liflerin kullanıldığı numunelerin basınç dayanımı yaklaşık %48 düşmüştür. Eğilme testleri sonucunda, camsı sentetik lif içeren geopolimer karışımların dayanımı 10,2 MPa olurken, doğal çam kozalağı lifi içeren numunelerin eğilme dayanımı 9,6 MPa seviyesindedir. Dayanımlar göz önüne alındığında, yazarlar çevresel tahribatların

giderilmesi açısından doğal çam kozalağı liflerinin fosfat çamuru ve metakaolin muhteva eden geopolimer karışımlarda kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Öz vd., 2023; çalışmalarında, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren geopolimer kompozitlerin taşıma dayanımı ve deformasyon kapasitesini uçucu kül, çimento, su, polivinil alkol lif, silika kumu ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak bilinen literatürde M45 olarak bilinen geopolimer kompozitlerin özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada %70 uçucu kül ve %30 yüksek fırın cürufu; 0,25; 0,33 ve 0,50 olmak üzere üç farklı sıvı/bağlayıcı oranı ve sırasıyla 1000, 1250, 1500, 1650 ve 1720 kg/m^3 olmak üzere 4 farklı toplam alkali ve bağlayıcı oranı parametre olarak kullanılmıştır. Numunelerin üretiminin ardından 24 saat ortam sıcaklığında, sonrasında ise kırım gününe kadar 60 C°'deki suda kür edilmiştir. Çalışma sonuçları göstermiştir ki M45 kompozitler 7 ve 28 gün için daha fazla eğilme dayanımına sahipken, uçucu külve yüksek fırın cüruflu geopolimer kompozitlerin deformasyon kapasitesi M45 kompozitlere göre benzer veya daha yüksektir.

Oluwafemi vd., 2023; çalışmalarında, yüksek fırın cürufu ve inek kemiği tozunu ağırlıkça %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 kullanarak ürettikleri geopolimer betonların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Alkali aktivatör olarak 12 molar NaOH ve 2.5/1 olacak şekilde Na_2SiO_3 tercih edilmiştir. Numuneler 7, 14, 28, 56 ve 90 gün ortam şartları altında kür edilmiştir. Mekanik dayanım sonuçları göstermiştir ki ağırlıkça %40'a kadar kullanılan inek kemiği külü kontrol grubunun basınç ve eğilme dayanımından daha fazla dayanım vermiştir. Ayrıca yapılan güvenilirlik analizi sonucunda, ağırlıkça %40 inek kemiği külü kullanılan numunelerin servis ömrü geleneksel betondan fazla çıkmıştır.

Lin vd., 2023; çalışmalarında, geopolimer kompozitlerin gevrekliğini gidermek veya daha sünek bir malzeme üretmek amacıyla ağaç liflerini karışımlara ikame ederek mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın çıktıları göstermiştir ki ağaç lifi kullanmak gevrek davranışı düşürmüş, kırılma tokluğunu artırmıştır. Ancak, yazarlar tarafından ağaç lif ikamesi geopolimer karışımların priz ve dayanım alma davranışı, reaksiyon derecesi ve basınç dayanımı açısından önerilmemektedir.

Zakira vd., 2023; çalışmalarında, çeşitli atık malzemelerden yüksek basınç dayanımı elde edebilecekleri geopolimerler üretmişlerdir. Bu amaçla öncül olarak

kırmızı çamur, cüruf ve silika dumanı kullanmışlardır. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 tercih etmişlerdir. Çeşitli SiO_2/Al_2O_3, SiO_2/Na_2O, Na_2O/Al_2O_3 ve CaO/SiO_2 değerleri için basınç dayanımlarını elde etmişlerdir. Çalışmanın sonuçları sonucunda yazarlar maksimum basınç dayanımını 68,79 MPa olarak kırmızı çamurun ağırlıkça %10 ikame edildiği ve SiO_2/Al_2O_3, SiO_2/Na_2O, Na_2O/Al_2O_3 ve CaO/SiO_2 değerlerinin sırasıyla 4,405; 4,020; 1,096; 0,781 olduğu numunelerden elde etmişlerdir.

Huo vd., 2022; çalışmalarında, kalsiyum bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını tahmin etmek için etkili, güvenilir ve yorumlanabilir bir makine öğrenimi (ML) modeli geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada tahmin için oluşturulan girdiler ya da özellikler karışım tasarımı, kür sistemi ve ham malzemelerin molar oranlarıdır. Basınç dayanımını tahmin etmek için geleneksel ML algoritmaları, entegre ağaç tabanlı ML algoritmaları ve derin sinir ağı algoritması olmak üzere üç tipte toplam sekiz algoritma kullanılmış ve bunların farklılıkları, avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen sekiz model arasında, XGB modelinin en yüksek tahmin doğruluğuna (%91) ve en düşük kök ortalama karesel hataya (RMSE) (3,85 MPa) sahip olduğunu göstermektedir. Önem analizi sonuçları göstermiştir ki, basınç dayanımı üzerinde en büyük etkiye sahip olan parametreler kür yaşı, $n(H_2O)/n(Na2O)$, kür sıcaklığı, $n(SiO_2)/n(CaO)$ ve kütledir.

Shen vd., 2022; çalışmalarında, alkali ile etkinleştirilen inşaat yıkım atığı geopolimerlerinin (CDWG) basınç dayanımını tahmin etmek için temel olarak rastgele orman (RF), gradyan artırma (GB) ve aşırı gradyan artırma (XGBoost) algoritmalarını kullanmışlardır. Çalışmada ayrıca üç topluluk bazlı makine öğrenimi (ML) modelinin performansları değerlendirilmiş ve sekiz farklı giriş özelliğinin CDWG'nin basınç dayanımı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, yüksek tahmin kesinliği ($R2 > 0.9$) ile CDWG için basınç dayanımı tahmini açısından RF (Rastgele orman), GB (gradient artırma) ve XGB (aşırı gradient artırma) algoritmalarının uygulanabilirliğinin geçerli olduğunu göstermektedir. Ayrıca sonuçlara göre, alkali-bağlayıcı oranı (L/S), CDWG'nin basınç dayanımı ile negatif bir korelasyona sahipken, ön işlem sıcaklığı, kür işlemi süresi ve dayanım yaşı, CDWG'nin basınç dayanımı ile pozitif bir korelasyona sahiptir.

Alakara vd., 2022; çalışmalarının iki farklı amacı vardır: (i) perlit içeren cüruf bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını (CS) etkileyen parametreleri araştırmak ve (ii) deneysel çalışmalardan elde edilen CS değerlerini tahmin etmek. Bu kapsamda, farklı ham perlit tozu (RPP) ikame oranları, farklı sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonları, farklı kür süreleri ve farklı kür sıcaklıkları içeren toplam 180 karışım grubu için 540 adet kübik geopolimer numunesi üretilmiş ve bunların CS sonuçları deneysel olarak incelenmiştir. Ardından deneysel olarak elde edilen bu veri setini kullanarak, geopolimerlerin CS sonuçlarını tahmin etmek için geleneksel regresyon analizi (CRA), çok değişkenli uyarlanabilir regresyon çizgileri (MARS) ve TreeNet yöntemleri ile yapay sinir ağı (ANN) algoritmaları kullanılarak algoritmaların performanslarını karşılaştırmışlardır. Yöntemlerin basınç dayanımı tahmin yeteneklerini değerlendirmek için kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE), dağılım indeksi (SI) ve Nash-Sutcliffe (NS) performans istatistikleri göstergeler olarak kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları olarak, optimum molaritenin 14 M, kür süresinin ve kür sıcaklığının sırasıyla 14 M, 24 saat ve 110 ℃ olduğu ve 48 saatlik ısıl kürün geopolimerlerin basınç dayanımını arttırmada önemli bir etkiye sahip olmadığı gözlemlenmiştir. Regresyon tabanlı modellerde en yüksek performans MARS yönteminden elde edilmiştir. Ancak YSA yöntemi, regresyon tabanlı yöntemlere göre daha yüksek tahmin performansı göstermiştir. RMSE değerlerine bakıldığında YSA yönteminin eğitim, doğrulama ve test setlerinde MARS yöntemine göre sırasıyla %24,7, %2,1 ve %13,7 oranında iyileştirme sağladığı görülmüştür.

Bai vd., 2022; çalışmalarında, farklı kür teknikleri kullanarak daha iyi mekanik özelliklere sahip, karbonize yüksek titanyum cürufu (CHTS) bazlı geopolimer üretmişlerdir. 8 farklı kür tipi için yapılan çalışmanın sonuçları göstermiştir ki kombine ön kür yöntemiönce 60°C'de 6 saat fırında ısıtmada ön kürleme ve ardından 210 W'de 15 dakika mikrodalga radyasyonu) tek başına mikrodalga veya fırında kürlemeden çok daha etkili olmuştur. Ayrıca optimum kür koşulu altında, CHTS bazlı geopolimerlerin optimum basınç dayanımı 76.33 MPa olarak elde edilmiştir.

Ganesh ve Muthukannan, 2021; çalışmalarında alkali çözeltinin molaritesini, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ve geopolimer betonda cam elyafının farklı kürleme koşullarında kullanımını optimize etmek için kapsamlı deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir. Geopolimer matrisin mikro yapısını anlamak için Taramalı Elektron

Mikroskobik analizi ve Enerji Dağılım Spektroskopisi analizi yoluyla daha fazla mikroyapı araştırması yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları, sodyum hidroksitin optimum molaritesini 13M olarak ve cürufun optimum ikame oranını ortam kürü altında %100 ve ısı kürü altında % 20 olarak bildirmiştir. Ayrıca çalışma, cam elyaf kullanımıyla geopolimer betonun kırılganlığında önemli bir azalma olduğunu göstermiştir.

Sherwani vd., 2022; çalışmalarında, uçucu kül (FA) bazlı kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun (SCGC) taze, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine çeşitli kürleme koşullarının ve cüruf ikamesinin etkilerini araştırmışlardır. Optimum kür yöntemini belirlemek için farklı kür koşullarının ve cüruf içeriğinin FA bazlı SCGC'nin basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sabit bağlayıcı içeriği (450 kg/m^3) ve alkali/bağlayıcı oranı 0,5 olan dört SCGC karışımı serisi parametrik bir çalışma yapmak üzere belirlenmiştir. FA, bağlayıcının toplam ağırlığının %0, %30, %50 ve %100'ü dahil olmak üzere dört farklı ikame yüzdesinde cüruf ile ikame edilmiştir. Çalışma sonuçları maksimum basınç dayanımını sağlayan optimum kür sıcaklığı ve süresinin 24 saat boyunca 85 °C olduğunu göstermiştir.

Bheel vd., 2021; çalışmalarında, metakaolin ve yer fıstığı kabuğu külünü uçucu küle %5'lik artışlarla %5'ten %20'ye kadar ikame ederek uçucu kül bazlı SCGC geopolimer karışımları üretmişlerdir. Bu araştırma çalışmasında çökme akışı, V-Funnel ve T50 akışı; J-Ring, L-box gibi geçme yeteneği testleri, yarmada çekme ve eğilme dayanımları ve su geçirgenliği testleri gerçekleştirilmiştir. 28 günde toplam 260 beton numune üretilmiş ve test edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, metakaolin ve yer fıstığı kabuğu külü ilavesinin SCGC karışımlarında uçucu külün kısmi ikamesi olarak ayrı ve birleştirilmiş olarak işlenebilirlikte bir azalmaya neden olduğunu, SCGC'nin sertleştirilmiş özelliklerinin ise metakaolin kullanılarak önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermektedir. Ayrıca, SCGC'nin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, 28 günde %5 yer fıstığı kabuğu külü ve metakaolin içeren karışım için sırasıyla 56,42 MPa, 4,68 MPa ve 5,12 MPa olarak elde edilmiştir.

Darvish vd., 2021; çalışmalarında, çimento ve geopolimer harçlarda geleneksel kumun tamamen yerine ikame edilen hurma yağı klinker kumunun (POCS) derecelendirilmesine odaklanmışlardır. Uçucu kül (FA) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) bağlayıcı olarak kullanılmış ve geopolimer karışımlarında Na_2SiO_3/NaOH oranı 1,5 olacak şekilde alkali aktivatör kullanılmıştır. Maksimum

boyutları 4,75; 2,36; 1,18 ve 0,60 mm olan dört farklı POCS derecesi ve madencilik kumu (MS) kullanılan bir kontrol karışımı, çimento ve geopolimer harçlar için toplam 10 adet karışımın dökümü için kullanıldı. POCS'nin mikro yapısı analiz edilmiş ve harçların mühendislik özellikleri akış tablosu testi, basınç ve eğilme dayanımları, yoğunluk, kuruma büzülmesi, su emme ve geçirimlilik testleri ve SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Sonuçlar, daha ince POCS partiküllerinin dahil edildiği karışımların daha iyi sıkıştırma, eğilme ve su emme değerleri ürettiğini, kuruma büzülmesi açısından ise bunun tam tersi durumlarının yaşandığını göstermiştir. Genel olarak, POCS içeren karışımların yoğunluğu %20'ye kadar azaltıldı ve POCS geopolimer harçları, çimentodan daha yüksek dayanımlar üretmiştir. 26–28 °C ortam sıcaklığında geopolimer harçta POCS kullanılarak 28 günde 55–65 MPa basınç dayanımı üretilmiştir.

Alomayri vd., 2021; çalışmalarında, farklı miktarlarda nano-silika içeren mikro çelik elyaf takviyeli uçucu kül geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Sabit miktarda mikro çelik lifler ağırlıkça %0,5 ve %0, %1, %2 ve %3'ten oluşan dört farklı miktarda nano silika dioksit (SiO_2) kullanılarak dört farklı uçucu kül bazlı geopolimer kompozit (GPC) hazırlamışlardır. %0,5 mikro-çelik liflere sahip %0 nano SiO_2 içeren GPC, kontrol karışımı olarak dikkate alınmıştır. Üretilen GPC'lerin farklı mekanik ve mikroyapısal özellikleri, gerilim-gerinim davranışları, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, tokluk modülü, elastisite modülü, sertlik ve elektron mikroskobu taraması (SEM) incelenmiştir. Testlerin sonuçları, nano SiO_2 ilavesinin, daha yoğun bir matris üreterek ve arayüz bölgelerini iyileştirerek mikro çelik fiber takviyeli GPC'nin mekanik özelliklerini ve mikro yapısını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, optimum davranış için GPC'de kullanılması önerilen nano SiO_2 miktarı %2 olduğunu ifade etmişlerdir.

Kocot vd., 2021; çalışmalarında, konu olarak doğal agrega için kısmi bir ikame (%5) olarak PET pullarının eklenmesiyle alkali ile etkinleştirilen cüruf kompozitlerinin oluşturulmasına odaklanmıştır. Oluşturulan deney mekanizmasında, aktivatör miktarı ağırlıkça %10 ve %20, kür sıcaklığı 20 ila 80°C olarak düzenlenmiştir. Mekanik sonuçlar incelendiğinde, sırasıyla 29,3 ila 68,4 MPa ve 3,5 ila 6,1 MPa arasında değişen basınç ve eğilme dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca,

mekanik test sonuçları, daha yüksek içeriğe sahip olan aktivatörün mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir.

Oyebisi vd., 2020; çalışmalarında, geopolimer beton üretimi için mısır koçanı külü ve öğtülmüş yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Mısır koçanı 600 °C'de dehidroksile edilmiştir. Ayrıca, kısmen %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında cürufun yerine ikame edilmiştir. Tercih edilen alkali aktivatörler, sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) iken, SH'nin molar konsantrasyonları 12 M, 14 M ve 16 M olarak değişmiştir. Yazarlar elde ettikleri sonuçlara göre, %40'a kadar mısır koçanı külü ikamesinin Portland çimentolu betondan (PCC) daha yüksek dayanımlar sergilediğini ifade etmişlerdir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Tezin Amacı

Tezin ana amacı obsidiyen tozunun geopolimer harç ve betonların basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Ayrıca elde edilen dayanım verilerinin uygun yapay zeka algoritmaları ile tahmin edilerek zahmetli ve uzun süren deneysel çalışmaların azaltılarak iş gücü ve zamandan tasarruf etmektedir.

2.2. Çalışma Hakkında Genel Bilgiler

Yüksek fırın cürufu ve metakaolin geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan toz malzemelerdir. Ancak obsidiyen tozunun geopolimer üretiminde kullanımına ilişkin literatürde fazla sayıda çalışmanın olmadığı görülmektedir. Yapılan bu çalışma ile obsidiyen taşı tozunun geopolimer harç ve betonlarda kullanımı araştırılmış, ayrıca obsidiyen tozunun yüksek fırın cürufu ve metakaolin ile birlikte kullanımının uygunluğu irdelenmiştir. Çalışmada her bir malzemenin saf ve birbirleriyle ağırlıkça %25 değişimini içeren 13 farklı kombinasyon kullanılarak eğilme ve basınç dayanımları birbirleri ile kıyaslanmıştır. Geopolimer üretiminde genellikle kür sıcaklığı ortam sıcaklığı ila 100 °C arasında sıcaklıklar seçilmektedir. Ancak yapılan çalışmaların sonuçları incelendiğinde optimum kür sıcaklığı 90 °C olarak belirlenmiştir. Literatür araştırması sonucunda, literatürün verdiği bilgileri de kullanmak amacıyla 75, 90, 105 ve 120 °C olmak üzere 4 farklı kür sıcaklığı seçilmiştir. Geopolimer üretiminde 12 molar NaOH alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Çalışmanın başlangıcında yapılan literatür araştırması sonucunda birçok çalışma da 12 molar konsantrasyonun optimum değer olduğu gösterilmiştir [174-178]. Karışım hazırlanırken obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren 450 gr bağlayıcı 1350 gr CEN standart kum ile karıştırılmıştır. Ardından 0,45 alkali aktivatör/bağlayıcı oranını sağlayacak şekilde toplamda 202,5 gr çözelti kullanılmıştır. Hazırlanan çözelti yavaşça kum+bağlayıcı karışımına eklenmiş, karıştırıcı yardımıyla karışım hazırlanmıştır. Tablo 5'te isimlendirmesi verilen 13 farklı kombinasyona göre hazırlanan karışımlar TS EN 196-1, 2002'e göre 40x40x160 mm'lik prizmatik kalıplara sarsma tablası kullanılarak yerleştirilmiştir. Tablo 1'de verilen karışımlarda

OB kısaltması obsidiyen tozunu, YF kısaltması yüksek fırın cürufunu, MT ise metakaolini ifade etmektedir. Ayrıca karışımlarda yer alan %100, %75, %50, %25 ve %0 sayısal ifadeleri bağlayıcıya katılan malzemenin kütlece oranını göstermektedir. Örneğin, Tablo 5'te verilen OB75YF25MT0 gösterimi 450 gr'lık karışımın %75'inin obsidiyenden, %25'inin yüksek fırın cürufundan, %0'ının ise metakaolinden oluştuğunu anlatmaktadır. Etüvde 72 saat kürde bırakılmalarının ardından numuneler etüvden çıkarılarak ortam sıcaklığına inene kadar bekletilmişlerdir. Ortam sıcaklığına (20 ± 2 C°) inen numuneler poşetlerde basınç ve eğilme testine tabi tutulacağı 7, 28 ve 90 güne kadar muhafaza altına alınmıştır.

Çalışmanın 2. bölümünde liflerin geopolimer harçların mekanik özelliklerine etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Yalnızca obsidiyenin bağlayıcı olarak kullanıldığı numunelerde; çelik, polivinil alkol ve bazalt lifler kullanılmıştır. Numunelerde bağlayıcı ağırlığının %1,5, %2 ve %2,5'u kadar çelik, polivinil alkol ve bazalt lifler harç karışımına ikame edilmiştir. Elde edilen numuneler 90 C°' de kür edilerek 28. günde eğilme ve basınç testine tabi tutulmuştur.

Çalışmanın 3. bölümünde beton numuneler hazırlanmıştır. Obsidiyenin geopolimer betonların mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan beton numunelere 28. günde basınç dayanımı testi yapılmıştır.

Çalışmanın 4. bölümünde geopolimer harçlardan elde edilen eğilme ve basınç dayanımı değerleri uygun makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 5. Geopolimer numunelerin bağlayıcıya bağlı olarak isimlendirilmesi

OB100YF0MT0 (%100 obsidiyen tozu)
OB0YF100MT0 (%100 yüksek fırın cürufu)
OB0YF0MT100 (%100 metakaolin)
OB75YF25MT0 (%75 obsidiyen tozu + %25 yüksek fırın cürufu)
OB75YF0MT25 (%75 obsidiyen tozu + %25 metakaolin)
OB50YF50MT0 (%50 obsidiyen tozu + %50 yüksek fırın cürufu)
OB50YF0MT50 (%50 obsidiyen tozu + %50 metakaolin)
OB25YF75MT0 (%25 obsidiyen tozu + %75 yüksek fırın cürufu)
OB25YF0MT75 (%25 obsidiyen tozu + %75 metakaolin)
OB25YF25MT50 (%25 obsidiyen tozu+%25 yüksek fırın cürufu+%50 metakaolin)
OB25YF50MT25 (%25 obsidiyen tozu+%50 yüksek fırın cürufu+%25 metakaolin)
OB0YF25MT75 (%25 yüksek fırın cürufu + %75 metakaolin)
OB0YF75MT25 (%75 yüksek fırın cürufu + %25 metakaolin)

Bu çalışma ile birlikte obsidiyen+yüksek fırın cürufu+metakaolin içeren farklı kombinasyonlarda hazırlanan harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. Harç numunelerin malzeme karakterizasyonunun sağlanması için X ışını difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizleri yapılmıştır. Elde edilen mekanik dayanımlar makine öğrenmesi ile işlenerek tahmin edilmiştir. Ardından obsidiyen tozu ile lifli harçlar üretilerek, liflerin obsidiyen tozlu harçların basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son kısımda ise obsidiyen tozu ile beton numuneler üretilerek mekanik dayanımları (basınç+eğilme) ve malzeme karakterizasyonu için XRD, SEM-EDS ve FTIR analizleri yapılmıştır.

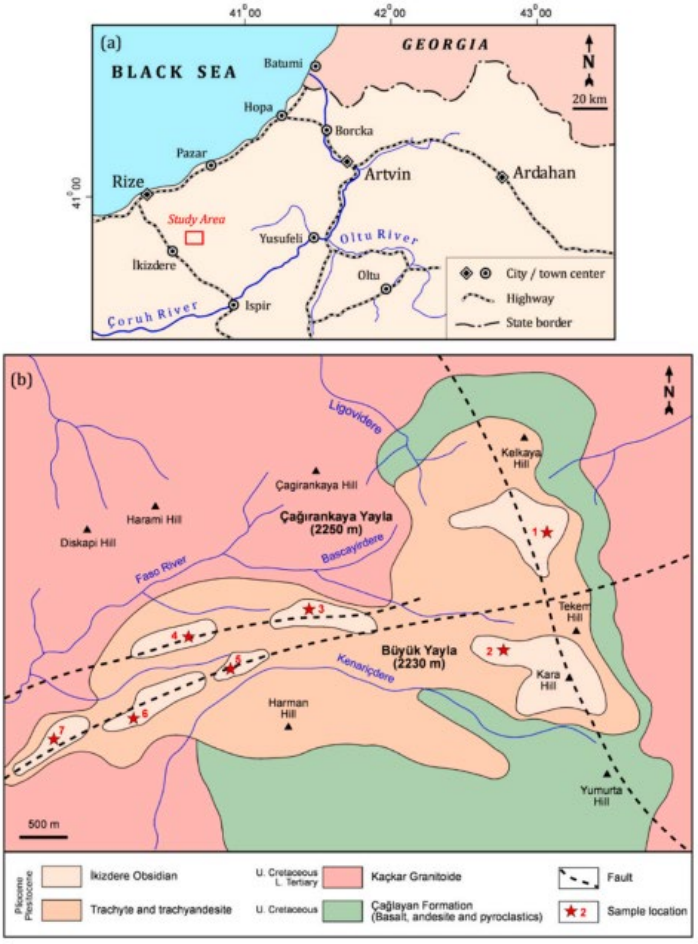
2.2.1. Malzemeler

Çalışma kapsamında Rize-İkizdere Çağırankaya mevkiinden elde edilen obsidiyen taşı, Karçimsa (Karabük) firmasından elde edilen yüksek fırın cürufu, AVS mineral (İstanbul) firmasından temin edilen metakaolin kullanılmıştır. Harç oluşumu için ayrıca Limak firmasından temin edilen CEN standart kum, alkali aktivatör için ise Karen Kimya firmasından elde edilen NaOH peletler halinde kullanılmıştır.

2.2.1.1. Obsidiyen

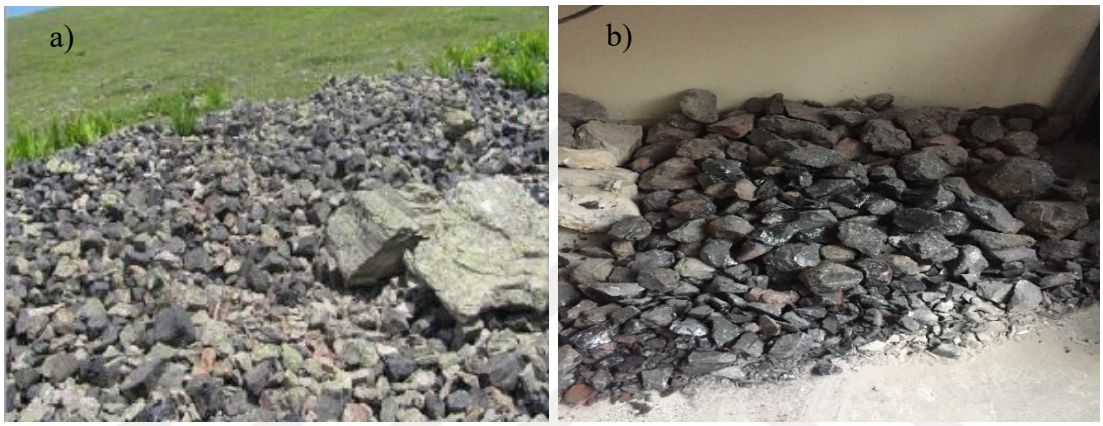
Obsidiyen, insanların mağaralarda yaşadığı eski çağlardan beri avcılık, savaş, yırtıcılardan korunma gibi faaliyetlerde bıçak, mızrak gibi kesici ve delici aletler olarak kullanılabilen bir kaya mineralidir (Fauzi, 2017; Fauzi, Intan ve Wibowo, 2019;

Solihin, Rizqiadi ve Handayani, 2020). Ayrıca volkanik cam olarak bilinen doğal bir taş olan obsidiyen, erimiş magmanın hızla ergimesiyle oluşur. Bu noktada obsidiyenin yüksek Si kaynağı ile birlikte amorf camsı bir yapı göstermesi yüksek mekanik özelliklere sahip olabileceğini düşündürmektedir (Ercan, Yegingil ve Bigazzi, 1989). Jeolojik ve arkeolojik araştırmalar, Endonezya, Malezya, Filipinler ve Papua Yeni Gine gibi ülkelerde daha özele indirgenirse, Kuzeydoğu Asya, Avrupa ve Amerika gibi kıtalarda obsidiyen rezervlerinin olduğunu göstermiştir (Spriggs vd., 2011; Kuzmin, 2017; Hughes, Werra ve Sulgostowska, 2018; Godfrey-Smith ve Haywood, 1989; Fernández, Stern ve Leal, 2015; Campbell, Stern, ve Peñaloza, 2017). Ustabaş ve Kaya, 2018; deneysel çalışmaları sonucunda obsidiyenin puzolanik bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Çalışmada ana malzeme olarak kullanılan obsidiyen taşlarının bölgedeki lokasyonu Şekil 13'te verilmektedir.



Şekil 13. Obsidiyenin bölgedeki yerleşimi , a) Lokasyon haritası, b) Çağırankaya yerleşimi (Duran vd., 2022)

Şekil 14 a)'da belirtilen yataktan alınan obsidiyen taşları puzolanik özellik gösterebilmesi için yeterli incelikte öğütülmesi gerekir. Taşlar RTEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında öncelikle çeneli kırıcıda çakıl boyutunda agrega haline getirilmiş, ardından bilye değirmende öğütülerek toz haline getirilmiştir. Bilyeli değirmende yer alan bilyelerin ağırlığı yaklaşık 48 kg'dır. Öğütme işlemi esnasında malzeme 2 kg olarak değirmene konulmuş, işlem 1 saat sürmüştür. Malzeme ağırlığı /bilye ağırlığı 1/24 olmaktadır. Şekil 15'te öğütme işlemi için kullanılan makinalar görülmektedir.



Şekil 14. Obsidiyen görüntüleri: a) Çağırankaya mevkii obsidiyen yatağı, b) obsidiyen taşı

Şekil 15. Öğütme işlemi esnasında kullanılan makineler: a)çeneli Kırıcı, b) bilyeli değirmen ve c) öğütülmüş obsidiyen tozu

Tablo 6'da obsidiyene ait kimyasal içerik analizi (XRF)'in sonuçları görülmektedir. Analiz sonucu %73,62 oranında silisyum, %138 alüminyum ve %1,26 oranında demir bileşiklerine sahip olduğu görülmektedir. Yönetmeliklerde belirtilen puzolanik özellik gösterme şartı $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 70,00$ 'tir [192-195]. Yapılan hesaplamada bu oranın obsidiyen için yaklaşık %88,66 olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Obsidiyen taşı tozunun XRF analizi sonuçları

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	Lol	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$
Obsidiyen	1,04	73,62	13,78	1,26	0,08	5,30	3,96	0,51	88,66

2.2.1.2. Yüksek Fırın Cürufu

Çelik endüstrisi, yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan erimiş halde, esas olarak kalsiyum, silika ve alkan içeren metalik olmayan özelliklere sahip kalıntı verir (Alekhya ve Aravindan, 2014; Paruthi vd., 2022). Bazen cüruf geopolimer geliştirmede kaynak malzeme olarak kullanılır ve yeterli dayanım ve moment sonuçları verir (Rajamane, 2012). Ayrıca, cüruf kullanımı yüksek kalsiyum içeriği nedeniyle çökme değerini düşürür (Venu ve Rao, 2017), bu da Ca-Al-Si jel oluşumuna neden olur ve geopolimerizasyonu artırır (Cheah vd., 2017).

Yüksek fırın cürufu, geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılan bir sanayi atığıdır (Amer vd., 2021; Fu vd., 2021). Yüksek fırında demirin bir yan ürünü olan bu malzeme, geleneksel çimentoya göre daha ekonomik ve daha yeşil bir alternatif olarak kabul edilir (Salehi ve Mazloom, 2019). Demir yapımı sırasında, yoğunluğu demirinkinden daha düşük olduğu için atık erimiş cüruf, sıvı demirin üzerine çöker. Erimiş cüruf, sıvı demirden çıkarılır ve ardından su ile söndürülür. Son olarak, yüksek fırın cürufu, soğutulmuş cürufun öğütülmesiyle elde edilir (Amer vd., 2021; Fu vd., 2021). Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi esas olarak CaO, SiO_2, Al_2O_3 ve MgO'dan oluşur (Pacheco-Torgal vd., 2014). Bu bileşikler, yüksek fırın cürufunu güçlü oranda puzolanik malzeme haline getirdiğinden, geopolimerlerin üretiminde potansiyel bir malzeme olmaktadır.

Çalışmada kullanılan cüruf Karçimsa (Karabük) firmasından temin edilmiş, özgül ağırlığı 2,56 ve yüzey alanı 0,589 m^2/g'dır (Şekil 16). Tablo 7'de çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi görülmektedir.

Şekil 16. Çalışmada kullanılan yüksek Fırın cürufu

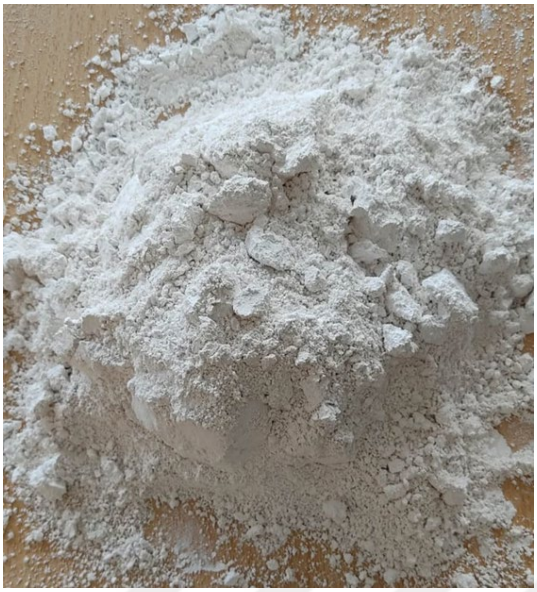
Tablo 7. Yüksek fırın cürufu XRF analizi sonuçları

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	Lol	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$
Yüksek Fırın Cürufu	32,88	40,00	12,27	0,80	6,77	0,91	0,35	0,20	53,07

2.2.1.3. Metakaolin

Metakaolin, susuz kalsine kil formunda bir kil minerali kaolinittir. Geleneksel olarak, çin kili veya kaolin olarak bilinen kaolinit açısından zengin mineraller, kaolini (600C–800 °C) arasında ısıtarak metakaolin yapımında hammadde olarak kullanılır. Ortalama parçacık boyutu (1-2) μm arasındadır, Portland çimentosu parçacıklarından daha küçük ve silis dumanı parçacıklarından daha büyüktür (Assi vd., 2020). Son yıllarda geopolimer üretiminde metakaoline olan ilgi oldukça artmıştır. Bu ilginin çoğu, çimentonun hidrasyonu ile üretilen ve zayıf dayanıklılık ile ilişkili olan CaOH'nin dayanım kazanan ürüne dönüştürülmesi için puzolanların kullanılmasından kaynaklanmaktadır. CaOH gideriminin sülfat atağına ve alkali silika reaksiyonuna (ASR) karşı direnç üzerinde büyük bir etkisi vardır ve ayrıca CaOH'nin metakaolin ile reaksiyonuyla üretilen ilave çimentolu fazlardan elde edilen arttırılmış mukavemet sağlar. Metakaolin, orta sıcaklıklarda (650–800°C) kalsinasyon yoluyla yüksek saflıkta kaolin kilinden işlenir. CaOH ile reaksiyona girecek aktif formda silika ve alümina içerir. Kil bazlı puzolanların harç ve betonda kullanılmasının başlıca nedenleri, malzeme bulunabilirliği ve dayanıklılığın arttırılması olmuştur. Ayrıca, kalsinasyon sıcaklığına ve kil tipine bağlı olarak, özellikle kürleşmenin ilk aşamalarında mukavemet artışı elde etmek de mümkündür (Sabir, Wild ve Bai, 2001).

Çalışmada kullanılan metakaolin AVS mineral (İstanbul) firmasında temin edilmiş olup, metakaolinin özgül ağırlığı 2,6 g/cm^3, pH değeri 5,5-7 ve özgül yüzey alanı 8,72 m^2/g'dır. Şekil 17'de kullanılan metakaoline ve Tablo 8'de metakaolinin kimyasal içeriğine yer verilmektedir.



Şekil 17. Çalışmada kullanılan metakaolin

Tablo 8. Metakaolinin XRF analizi sonuçları

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	Lol	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$
Metakaolin	0,11	54,28	42,14	0,49	0,01	0,13	0,08	1,12	96,91

2.2.1.4. Standart Kum

Çalışmada üretilen geopolimer harçlarda Limak firmasının Kırklareli fabrikasında ortalama 1350 gr olarak ürettiği CEN kumu kullanılmıştır. Kullanılan standart kum Şekil 18'de gösterilmektedir.

Şekil 18. Harçlarda kullanılan standart kum

2.2.1.5. Alkali Aktivatör (NaOH)

Geopolimer üretiminde, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksitin (NaOH) kullanımı oldukça yaygındır (Abbass ve Singh, 2023; Isa ve Awang, 2023). O nedenle çalışmada 12 molar konsantrasyona sahip NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Harçlarda yapılan araştırmalar sonucu alkali/bağlayıcı oranının 0,35-0,65 arasında değişebildiği gözlemlenmiş, fakat başlangıç olarak 0,40 değeri seçilmiştir (Sharma, Singh ve Kapoor, 2022; Singh ve Kapoor, 2022). Ancak yapılan deneme numuneleri sonucunda karışımların kalıplara yerleşemeyecek kadar kuru kıvamda kaldığı gözlemlenince tüm harç numunelerde alkali/bağlayıcı oran 0,45 olarak kullanılmıştır. NaOH peletler halinde Karen Kimya firmasından alınarak çözelti haline getirilmiştir. NaOH'ın pelet ve çözelti haline getirilmiş hali Şekil 19'da gösterilmektedir. Ayrıca, alkali aktivatörün firma tarafından sağlanan bazı kimyasal özellikleri Tablo 9'da verilmektedir.

Şekil 19. Kullanılan NaOH: a) Pelet, b) Çözelti

Tablo 9. Sodyum Hidroksit (NaOH)'ın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Konsantrasyon (Molar)	Mol Ağırlığı (g/mol)	Yoğunluk (20 C°) (g/cm^3)	Saflık (%)	Na_2CO_3 (%)
12	40	2,13	≥ 98	< 0,5

2.2.1.6. Agrega

Geopolimer beton üretiminde kullanılan agregalar Rize ilinde faaliyet gösteren Cevahir Beton firmasından temin edilmiştir. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında iki tip kalın agrega ve

tek tip ince agrega kirli olduğundan dolayı yıkanmıştır. Şekil 20'de yıkanan ve kurumaya bırakılan agregalar görülmektedir.

Şekil 20. Yıkanan Agregalar

Agregalar yıkandıktan sonra, agregaların özgül ağırlık ve su emme değerlerinin belirlenmesi için fiziksel testler gerçekleştirilmiştir. Agregaların özgül ağırlıklarının ve su emme değerlerinin belirlenebilmesi için aşağıda verilen bağıntılardan yararlanılmıştır. Tablo 10' da fiziksel testlerin sonuçları verilmektedir.

Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı: $W_2/(W_2-W_3)$

Kuru özgül ağırlık: $W_1/(W_2-W_3)$

Görünen özgül ağırlık: $W_1/(W_1-W_3)$

Su Emme Oranı: $(W_2-W_1)/W_1*100$

W_1: İri agreganın etüv kurusu ağırlığı (gr)

W_2: İri agreganın doygun kuru yüzey durumdaki ağırlığı (gr)

W_3: İri agreganın su içinde tartılan ağırlığı (gr)

C: Doygun kuru yüzey haldeki ince agrega ağırlığı (gr)

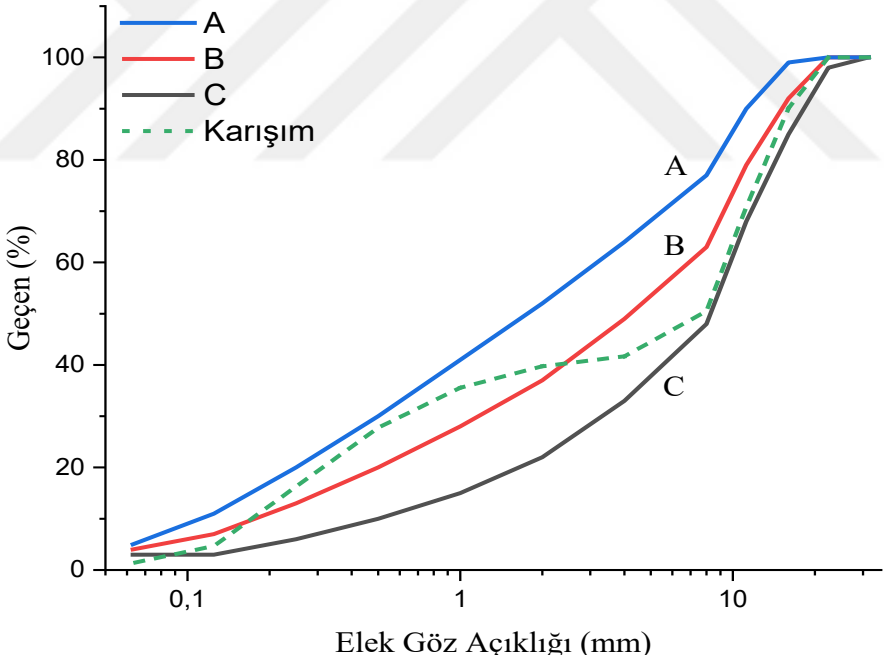
E: Balon joje+su ağırlığı (gr)

D: Balon joje+doygun kuru yüzey haldeki agrega+ su ağırlığı (gr)

Tablo 10. Agregalara ait özgül ağırlıklar, su emme kapasiteleri ve nem içerikleri

Agrega Türü	Doygun Kuru Yüzey Özgül Ağırlığı (gr/cm^3)	Kuru Yüzey Özgül Ağırlığı (gr/cm^3)	Görünen Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Su Emme Kapasitesi (%)	Nem İçeriği (%)
İri 1	2,62	2,59	2,68	1,2	0,68
İri 2	2,63	2,60	2,68	1,1	0,66
İnce	2,44	-	-	4,4	2,3

Beton üretiminde kullanılacak agregaların TS 802, 2016 standardında önerilen agrega granülometrisine uygun olması gerekmektedir. Belirtilen agrega granülometrisini elde etmek için agregalar %20 İri 1, %35 İri 2 ve %45 ince agrega karıştırılmıştır. Şekil 21'de kesikli çizgi olarak görülen karışım agregasının granülometrisidir.



Şekil 21. Kullanılan Agregalara Ait Granülometri Eğrileri (TS 802, 2016)

2.3. Geopolimer Harçların Üretim Süreci

Çalışmanın deneysel sürecinde toz malzemelerin ağırlıkça %25 olacak şekilde değiştiği 13 farklı kombinasyon halinde harçlar hazırlanmıştır. Bu kombinasyonlar kullanılan malzemelerin birbiri ile etkileşimi incelenebilecek şekilde tüm varyasyonlar

dikkate alınmaya çalışılarak elde edilmiştir. 13 farklı kombinasyon için 7, 28 ve 90 gün olacak şekilde üç farklı test günü ve 75, 90, 105 ve 120 C° olarak seçilen 4 farklı kür sıcaklığı için toplamda 468 adet harç numune 40x40x160 mm'lik standart prizmatik kalıplarda üretilmiştir. Harç numunelerin üretiminde alkali aktivatör türü ve konsantrasyonu, kür süresi, alkali/bağlayıcı oranı sabit olurken, toz malzeme ve aktivatör miktarları Tablo 11'deki gibi dikkate alınmıştır.

Tablo 11. Geopolimer Harçlarda Dikkate Alınan Toz Malzeme ve Alkali Aktivatör Miktarları (gram)

Numune İsmi	Obsidiyen	Yüksek Fırın Cürufu	Metakaolin	Bağlayıcı Toz Malzeme	Standart Kum	Su	Sodyum Hidroksit (NaOH)
OB100YF0MT0	450	0	0	450	1350	97,2	105,3
OB75YF25MT0	337,5	112,5	0	450	1350	97,2	105,3
OB75YF0MT25	337,5	0	112,5	450	1350	97,2	105,3
OB50YF50MT0	225	225	0	450	1350	97,2	105,3
OB50YF0MT50	225	0	225	450	1350	97,2	105,3
OB25YF25MT50	112,5	112,5	225	450	1350	97,2	105,3
OB25YF50MT25	112,5	225	112,5	450	1350	97,2	105,3
OB25YF75MT0	112,5	337,5	0	450	1350	97,2	105,3
OB25YF0MT75	112,5	0	337,5	450	1350	97,2	105,3
OB0YF75MT25	0	337,5	112,5	450	1350	97,2	105,3
OB0YF25YF75	0	112,5	337,5	450	1350	97,2	105,3
OB0YF100MT0	0	450	0	450	1350	97,2	105,3
OB0YF0MT100	0	0	450	450	1350	97,2	105,3

Harçların aktive edilmesi için NaOH pelet halinde tartılarak konsantrasyonu 12 molar olacak şekilde kavanozlarda birleştirilerek dökülmüş, ardından 24 saat beklenerek egzotermik tepkimeden açığa çıkan ısının geçmesi beklenmiştir. Tablo 11'e göre tartılan bağlayıcı malzeme önce karıştırıcıda düşük devirde 30 sn karıştırılarak homojen bir yapıya gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra standart kum karışıma eklenerek düşük hızda tekrar 30 sn daha karıştırılmıştır. Ardından alkali aktivatör çözeltisi oldukça yavaş şekilde karışıma eklenerek homojen şekilde karıştırılmıştır (Şekil 22).

Şekil 22. Karıştırılan bağlayıcı malzemeler

Aktivatör ile 60 sn daha karıştırılan karışım kalıplara dökülmek için hazır hale gelmiştir. 40x40x160 mm'lik standart kalıplar sarsma tablasına yerleştirilmiş, karışım iki seferde toplamda titreşimli makinede 120 sn kalacak şekilde kalıplara 3 numune olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 23).

Şekil 23. Kalıp aşaması: a) Titreşimli makine, b) Kalıba yerleştirilmiş numuneler

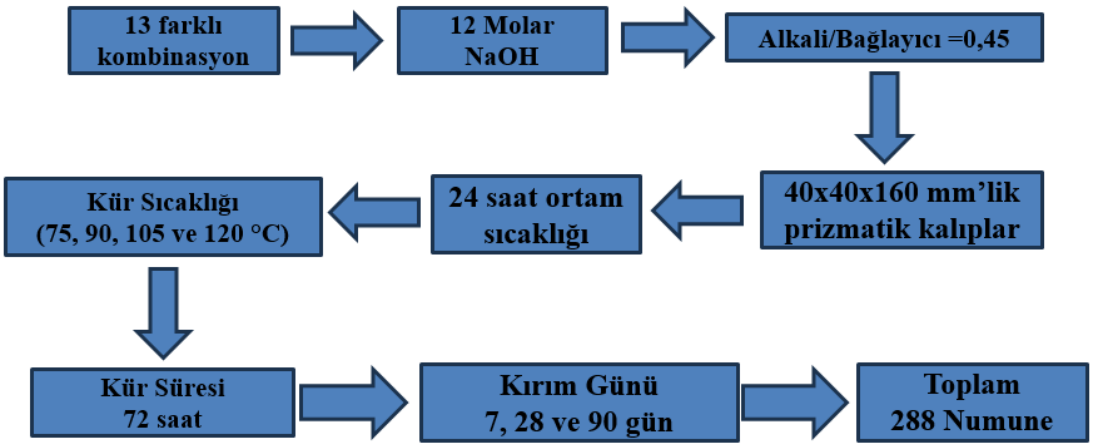
Numuneler 1 gün kalıpta bekletildikten sonra, kalıptan alınarak seçilen 75, 90, 105 ve 120 C° kür sıcaklıklarında 72 saat boyunca sıcaklık kürüne maruz bırakılmıştır (Şekil 24).

Şekil 24. Numunelerin bekletildiği etüv ve etüvden çıkarılmış numuneler

Kür işleminin ardından numuneler poşetlenerek kırılacağı 7., 28. ve 90. güne kadar çevresel etkilere maruz kalmaması için numaralandırılarak hava geçirmeyen poşetlerde muhafaza edilmişlerdir (Şekil 25).

Şekil 25. Numara verilerek poşetlenmiş numune örneği

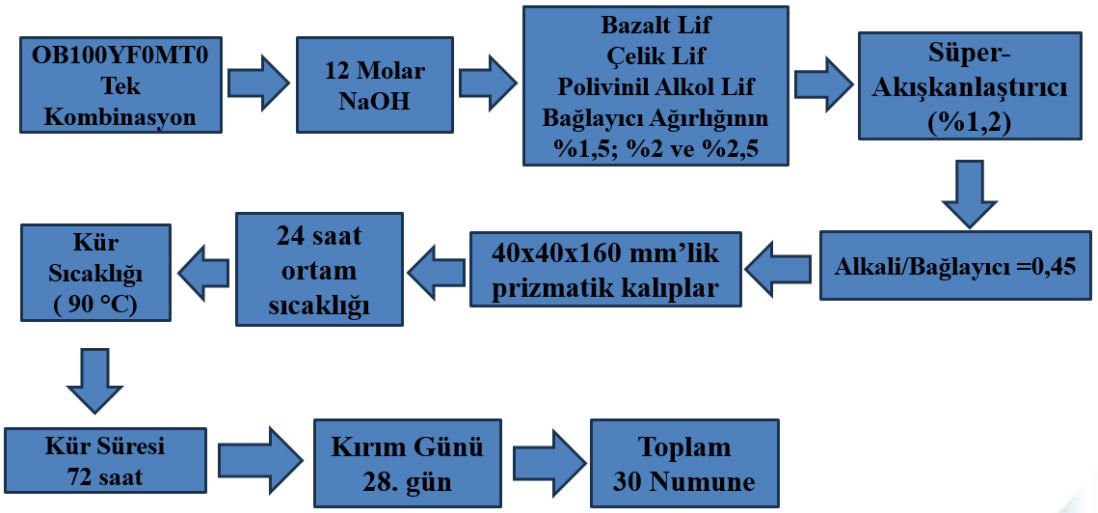
Geopolimer harçların üretimine ait akış diyagramı Şekil 26' da gösterilmektedir.



Şekil 26. Geopolimer harçların üretimi için kullanılan akış diyagramı

2.4. Lifli Harç Numunelerin Üretim Süreci

Lifli numuneler için Tablo 5'te verilen kombinasyonlardan bağlayıcı olarak yalnızca obsidiyen taşı tozunun yer aldığı OB100YF0MT0 numuneleri üretilmiştir. Üretimde yapılan literatür araştırması sonucu polivinil alkol, çelik ve bazalt lifler bağlayıcı ağırlığının %1,5, %2 ve %2,5'u oranında karışıma katılmıştır (Wang vd., 2020; Tanyildizi ve Yonar, 2016; Liu vd., 2020). Ayrıca harçlar üretilirken Ekan süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı bağlayıcı ağırlığının %1,2'si oranında (üretici firmanın tavsiyesi) ikame edilmiştir. Optimum kür sıcaklığı üretimde yalnızca 90 C° olarak dikkate alınmıştır. Testler lifli harç numuneler için 28. günde gerçekleştirilmiştir. Diğer üretim koşulları geopolimer harçların üretimiyle tamamen aynı kalmıştır. Lifli geopolimer harçların üretiminde kullanılan akış diyagramı Şekil 27'de gösterilmektedir.



Şekil 27. Lifli geopolimer harçların üretiminde kullanılan akış diyagramı

Üretimi yapılıp numaralandırılan ve kırım gününe kadar poşet içerisinde bekletilen bir lifli harç numunesi Şekil 28'de görülmektedir.

Şekil 28. Poşetlenen lifli harç numunesi

2.5. Harç ve Beton Numuneler İçin Gerçekleştirilen Mekanik Testler

2.5.1. Eğilme Dayanımı Testi

Şekil 29'da fotoğrafı verilen deney makinesinde TS EN 196-1, 2002 'e göre eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneyde numunenin kırılmasına neden olan kuvvet dikkate alınarak, Denklem 9'da verilen bağıntı kullanılarak göre eğilme dayanımları hesaplanmıştır.

$$Rf=1.5*F*l/b^3 \quad (9)$$

Bağıntıda verilen Rf eğilme dayanımı değerini MPa cinsinden, b prizmatik numunenin taban kenar uzunluğunu (4 cm), F numuneye uygulanan kuvveti kN cinsinden, l ise numunenin mesnetlendiği ayakların eksenleri arasındaki mesafeyi (10 cm) ifade etmektedir.

Şekil 29. Harç Numuneler İçin Eğilme Dayanımı Test Cihazı

2.5.2. Basınç Dayanımı Testi

Eğilme dayanımı testi uygulanan numuneler kırıldıktan sonra ikiye ayrılan parçaları basınç dayanımı test cihazına (Şekil 30) yerleştirilerek her kombinasyonda 6 numune için Denklem 10'da verilen bağıntıya göre basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür.

$$R=F/b^2 \quad (10)$$

Denklem 10'da yer alan bağıntıda R basınç dayanımı değerini MPa cinsinden, b basınç aparatının kenar uzunluğunu (4 cm), F ise kırılma anında numuneye uygulanmış olan kuvveti ifade etmektedir.

Şekil 30. Harç numuneler için basınç dayanımı test cihazı

2.5.3. Yarmada Çekme Dayanımı Testi

Her kombinasyon için 100x100x100 mm boyutlarına sahip 3 adet küp numune test cihazına yerleştirilerek (Şekil 31) Denklem 11'de verilen bağıntıya göre yarmada çekme dayanım değerleri belirlenmiştir.

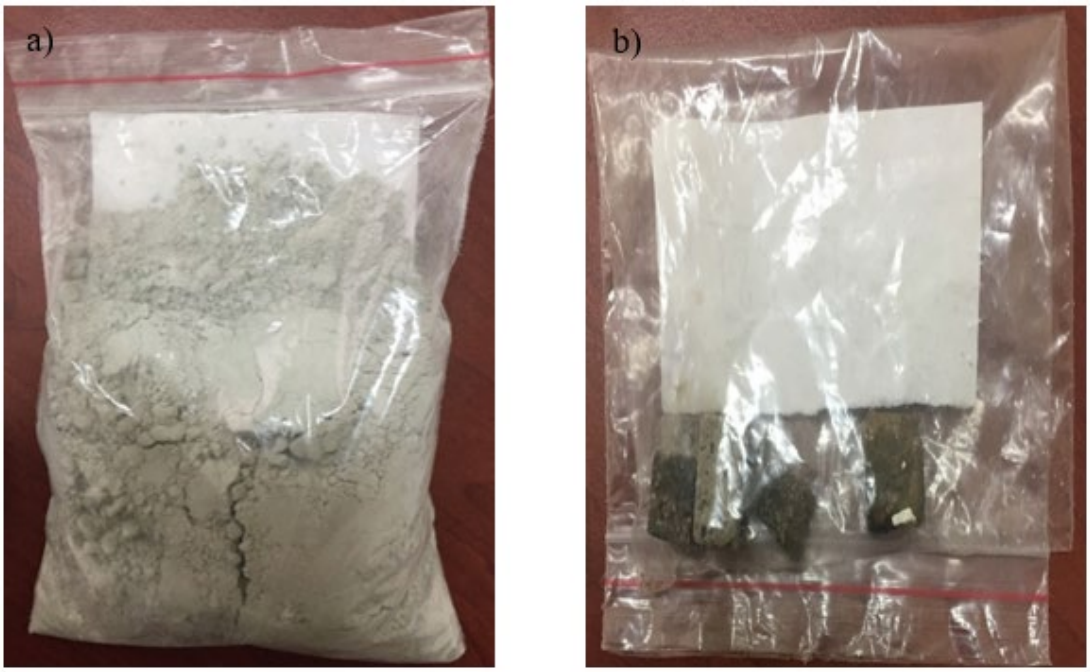
$$\sigma_{Nc}=2P_c/\pi bd \quad (11)$$

Denklem 11'de yer alan bağıntıda σ_{Nc} yarmada çekme dayanımı değerini MPa cinsinden, b ve d küp numunenin en kesiti ve yüksekliğini, P_c kırılma yükünü (kN) ifade etmektedir.

Şekil 31. Küp beton numuneler için yarmada çekme dayanımı test cihazı

2.6. Geopolimer Harçlar için İç Yapı Analizleri

Çalışmadaki malzemelerin kimyasal içeriği toz formda XRF analizi ile belirlenmiştir. XRD analizi ile oluşan kimyasal fazlar, FTIR analizi ile oluşan kimyasal bağlar 5 farklı kombinasyon için toz formda RTEÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yaptırılmıştır. Ayrıca RTEÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi 'nde 1 cm'lik prizmatik numuneler kullanılarak yapılan SEM-EDS analizi ile geopolimer matrisin iç yapısı araştırılmıştır. Şekil 32'de XRD ve SEM –EDS analizlerinde kullanılan toz ve parça numune örnekleri görülmektedir.

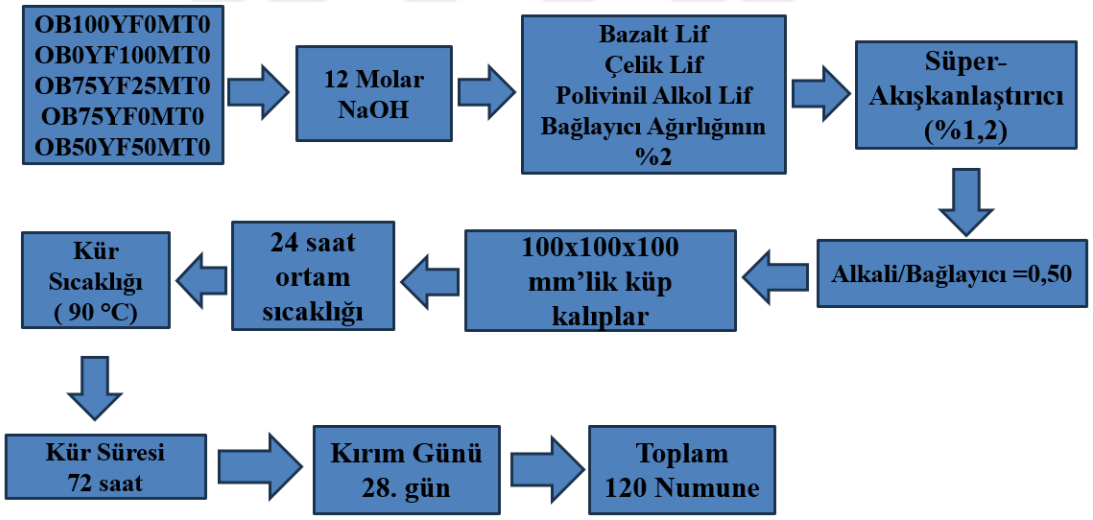


Şekil 32. İç yapı analizleri için kullanılan numune örnekleri: a) Toz, b) Prizmatik

2.7. Geopolimer Betonların Üretim Süreci

Çalışmanın geopolimer beton üretiminde bağlayıcıların ağırlıkça %25 oranlarında değiştiği, harç numunelerin mekanik testleri sonucu en yüksek dayanım değerlerine sahip olan 5 farklı kombinasyon (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) dikkate alınarak beton numuneler hazırlanmıştır. 5 farklı kombinasyon halinde için üretilen beton numunelerde kullanılan agrega ve alkali aktivatör miktarları Tablo 11'de görülmektedir. Beton numuneler 100x100x100 mm'lik kalıplarda üretilmiştir. Geopolimer beton üretilirken ilk olarak, bağlayıcı malzeme ince agrega ile 2-3 dakika süre için betoniyerde karıştırılmıştır. Ardından İri 2 agrega karışıma katılarak 2-3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışımda segregasyon oluşumunun engellenmesi amacıyla İri 1 agrega ve son aşamada çelik, polivinil alkol ve bazalt türü lifler katı karışıma katılmış ve 2-3 dakika süre için betoniyerde karıştırılmıştır. Son işlem olarak alkali aktivatör ve süperakışkanlaştırıcı betoniyere eklenerek 3-4 dakika boyunca karıştırılmıştır. Üretilen taze geopolimer betonlar kalıpların yarısını doldurulacak şekilde konulup titreşimli makine ile üç dört dakika titreşime maruz bırakılmıştır. Sonra kalıbın diğer yarısı doldurulup tekrar titreşim uygulanarak betonlar kalıbına

yerleştirilmiştir. Kalıplar 24 saat boyunca ortam sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Ardından, kalıptan alınmadan önce numunelerin bozulmadan kalıptan çıkarılması için 2-3 saat boyunca 90 °C'de etüve yerleştirilmiştir. Belli bir miktar dayanım kazanan numuneler kalıplardan çıkarılarak 90 °C'de etüvde 72 saat boyunca sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Isıl kür ardından poşetlere yerleştirilen numuneler 28 gün sonunda eğilme ve basınç deneylerine tabii tutulmuşlardır. Şekil 31'de numaralandırılarak poşet içerisinde bekletilen geopolimer beton numuneler görülmektedir. Beş farklı seri halinde toplamda 120 adet 100x100x100 mm'lik geopolimer küp beton numunesi üretilmiştir. Beton numunelerin üretiminde alkali aktivatör türü NaOH, konsantrasyonu 12 molar, alkali/bağlayıcı oranı 0,50; lif ağırlığı/bağlayıcı ağırlığı 0,02 olarak kullanılmıştır. Geopolimer betonların üretiminde kullanılan akış diyagramı Şekil 33'te verilmektedir. Şekil 34'te ise poşetlenen beton numuneler görülmektedir.



Şekil 33. Geopolimer betonların üretimi için kullanılan akış diyagramı

Tablo 12. Geopolimer Beton Numunelerde Kullanılan Malzeme Miktarları (kg/m^3)

Numune ismi	Bağlayıcı	Lif	İri 1	İri 2	İnce	Alkali Aktivatör	Süper Akışkanlaştırıcı
OB100YF0MT0	450	9	309	545	636	225	4,5
OB0YF100MT0	450	9	309	545	636	225	4,5
OB75YF25MT0	450	9	309	545	636	225	4,5
OB75YF0MT25	450	9	309	545	636	225	4,5
OB50YF50MT0	450	9	309	545	636	225	4,5

Şekil 34. Poşetlenen Beton Numuneler

3. BULGULAR

3.1. Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımları

Tablo 13'te verilen değerler geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. Tablo 13'te en yüksek eğilme dayanımının OB100YF0MT0 numunesinde 120 °C kür sıcaklığı için 13,55 MPa, eğilme dayanımının ise metakaolinin ağırlıkça %25'ten fazla olduğu 5 farklı numunede tüm kür sıcaklıkları için dayanım elde edilememiştir. Tablo 13'te ortalama dayanım ise OB25YF75MT0 numunesinde 105 °C kür sıcaklığı için 6,20 MPa' tır.

Tablo 13. Geopolimer Harçların 7 Günlük Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune ismi	Eğilme Dayanımı			
	(75 °C)	(90 °C)	(105 °C)	(120 °C)
OB100YF0MT0	11,25	10,80	8,10	13,55
OB0YF100MT0	8,85	8,90	9,35	9,25
OB0YF0MT100	-	-	-	-
OB75YF25MT0	10,75	8,45	7,30	4,50
OB75YF0MT25	11,70	3,50	0,00	3,40
OB50YF50MT0	8,40	8,05	5,80	5,80
OB50YF0MT50	-	-	-	-
OB25YF75MT0	5,25	5,70	6,20	4,70
OB25YF0MT75	-	-	-	-
OB25YF25MT50	-	-	-	-
OB25YF50MT25	5,05	-	-	6,00
OB0YF25MT75	-	-	-	-
OB0YF75MT25	3,85	2,15	0,65	2,20

(OB:Obsidiyen, YF:Yüksek Fırın Cürufu, MT: Metakaolin, 7:Kırım Günü; 75, 90, 105 ve 120: Uygulanan Kür Sıcaklığı)

Tablo 14'te geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı 28 günlük dayanımlarda, OB100YF0MT0 numunesinde 90 °C kür sıcaklığı için 21,40 MPa, , ortalama dayanım için ise OB75YF0MT25 numunesinde 75 °C kür sıcaklığı için 10,25 MPa olarak elde edilmiştir. %50, %75, %100 metakaolin içeren numunelerde tüm kür sıcaklıkları için dayanım elde edilememiştir.

Tablo 14. Geopolimer Harçların 28 Günlük Eğilme Dayanımları (MPa)

Numune ismi	Eğilme Dayanımı			
	(75 °C)	(90 °C)	(105 °C)	(120 °C)
OB100YF0MT0	12,45	21,40	13,75	11,75
OB0YF100MT0	9,50	9,90	10,65	15,40
OB0YF0MT100	-	-	-	-
OB75YF25MT0	7,90	5,60	5,40	7,55
OB75YF0MT25	10,25	4,15	3,95	5,35
OB50YF50MT0	6,60	5,90	6,85	7,20
OB50YF0MT50	-	-	-	-
OB25YF75MT0	6,25	8,70	5,75	7,95
OB25YF0MT75	-	-	-	-
OB25YF25MT50	-	-	-	-
OB25YF50MT25	5,40	3,95	5,05	5,20
OB0YF25MT75	-	-	-	-
OB0YF75MT25	4,60	6,75	6,00	5,00

(OB:Obsidiyen, YF:Yüksek Fırın Cürufu, MT: Metakaolin, 28:Kırım Günü; 75, 90, 105 ve 120: Uygulanan Kür Sıcaklığı)

Tablo 15'te 90 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımları görülmektedir. En büyük eğilme dayanımı 90 günlük dayanımlarda, OB100YF0MT0 numunesinde 75 ve 90 °C kür sıcaklığı için sırasıyla 17,00 ve 16,90 MPa, ortalama dayanım ise OB100YF0MT0 numunesinde 105 °C kür sıcaklığı için 8,20 MPa olarak elde edilmiştir. %50, %75, %100 metakaolin içeren numunelerde tüm kür sıcaklıkları için dayanım elde edilememiştir.

Tablo 15. Geopolimer Harçların 90 Günlük Eğilme Dayanımları

Numune ismi	Eğilme Dayanımı			
	(75 °C)	(90 °C)	(105 °C)	(120 °C)
OB100YF0MT0	17,00	16,90	8,20	9,20
OB0YF100MT0	9,10	9,80	8,10	11,20
OB0YF0MT100	-	-	-	-
OB75YF25MT0	7,25	6,30	5,25	6,55
OB75YF0MT25	4,95	3,10	2,35	1,50
OB50YF50MT0	5,45	4,70	5,25	4,75
OB50YF0MT50	-	-	-	-
OB25YF75MT0	3,50	4,45	5,45	4,60
OB25YF0MT75	-	-	-	-
OB25YF25MT50	-	-	-	-
OB25YF50MT25	7,30	6,00	3,00	2,65
OB0YF25MT75	-	-	-	-
OB0YF75MT25	5,50	4,65	4,45	5,50

(OB:Obsidiyen, YF:Yüksek Fırın Cürufu, MT: Metakaolin, 90:Kırım Günü; 75, 90, 105 ve 120: Uygulanan Kür Sıcaklığı)

3.2. Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları

Çalışmanın ilk bölümünde dökülen geopolimer harçların basınç dayanımı testinden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 16, Tablo 17 ve Tablo 18'de verilmiştir. Tablo 16'da geopolimer harçların 75, 90, 105 ve 120 ^{o}C' ta 72 saat ısıl kür uygulandıktan sonra 7. günlerinde ölçülen basınç dayanımı değerleri görülmektedir.

Tablo 16. Geopolimer Harçların 7 Günlük Basınç Dayanımları (MPa)

Numune ismi	Basınç Dayanımı			
	(75 °C)	(90 °C)	(105 °C)	(120 °C)
OB100YF0MT0	36,98	39,70	38,44	36,84
OB0YF100MT0	78,48	69,55	92,43	66,38
OB0YF0MT100	-	-	-	-
OB75YF25MT0	64,38	68,78	53,35	52,95
OB75YF0MT25	10,15	12,87	6,43	4,88
OB50YF50MT0	59,68	60,45	56,78	52,43
OB50YF0MT50	-	-	-	-
OB25YF75MT0	52,95	60,48	54,80	48,95
OB25YF0MT75	-	-	-	-
OB25YF25MT50	-	-	-	-
OB25YF50MT25	56,20	58,75	46,38	45,25
OB0YF25MT75	-	-	-	-
OB0YF75MT25	62,45	62,43	52,15	49,38

(OB:Obsidiyen, YF:Yüksek Fırın Cürufu, MT: Metakaolin, 7:Kırım Günü; 75, 90, 105 ve 120: Uygulanan Kür Sıcaklığı)

Tablo 16'da görülen basınç dayanımları 6 adet numunenin basınç dayanımı ortalamasıdır. Tablo 16'da verilen değerlerde en yüksek basınç dayanımı 105 °C'lik kür sıcaklığı uygulanan %100 cüruf içeren numunelerde 92,43 MPa, OB0YF0MT100, OB50YF0MT50, OB25YF0MT75, OB0YF25MT75 serisi harç numunelerde 7. günlerinde basınç dayanımı değerleri ölçülememiştir. Ortalama basınç dayanımı ise %50 obsidiyen ve %50 cüruf içeren numunelerin 105 °C kür sıcaklığında 56,78 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 17'de geopolimer harçların 28. günlerinde 6 adet numuneden elde edilen basınç dayanımı ortalamaları görülmektedir. Tablo 14'te en yüksek basınç dayanımı OB0YF100MT0 numunesinde 90 °C kür sıcaklığı için 93,68 MPa olduğu, ortalama dayanımın ise OB25YF50MT25 numunesinde 46,03 MPa olduğu görülmektedir.

Tablo 17. Geopolimer Harçların 28 Günlük Basınç Dayanımları (MPa)

Numune ismi	Basınç Dayanımı			
	(75 °C)	(90 °C)	(105 °C)	(120 °C)
OB100YF0MT0	39,27	42,10	41,38	40,86
OB0YF100MT0	82,84	93,68	86,40	80,10
OB0YF0MT100	-	-	-	-
OB75YF25MT0	65,28	69,71	58,86	56,43
OB75YF0MT25	20,70	20,48	20,48	18,18
OB50YF50MT0	60,05	65,10	52,60	53,73
OB50YF0MT50	-	-	-	-
OB25YF75MT0	56,25	63,83	57,30	55,80
OB25YF0MT75	-	-	-	-
OB25YF25MT50	-	-	-	-
OB25YF50MT25	59,20	66,03	49,63	45,38
OB0YF25MT75	-	-	-	-
OB0YF75MT25	63,43	64,65	56,85	45,08

(OB:Obsidiyen, YF:Yüksek Fırın Cürufu, MT: Metakaolin, 28:Kırım Günü; 75, 90, 105 ve 120: Uygulanan Kür Sıcaklığı)

Tablo 18'de geopolimer harçların 90 günlük basınç dayanımları görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı OB0YF100MT0 numunesinde 105 °C kür sıcaklığı için 83,80 MPa; ortalama dayanım ise OB25YF75MT0 numunesinde 120 °C kür sıcaklığı için 49,68 MPa olduğu görülmektedir.

Tablo 18. Geopolimer Harçların 90 Günlük Basınç Dayanımları (MPa)

Numune ismi	Basınç Dayanımı			
	(75 °C)	(90 °C)	(105 °C)	(120 °C)
OB100YF0MT0	42,17	43,21	36,80	35,70
OB0YF100MT0	85,66	86,80	83,80	86,00
OB0YF0MT100	-	-	-	-
OB75YF25MT0	59,12	60,12	52,87	51,44
OB75YF0MT25	13,78	15,65	13,98	9,38
OB50YF50MT0	49,40	60,70	56,03	54,70
OB50YF0MT50	-	-	-	-
OB25YF75MT0	56,68	59,43	51,20	49,68
OB25YF0MT75	-	-	-	-
OB25YF25MT50	-	-	-	-
OB25YF50MT25	58,50	60,60	48,43	43,28
OB0YF25MT75	-	-	-	-
OB0YF75MT25	61,58	63,30	51,05	49,23

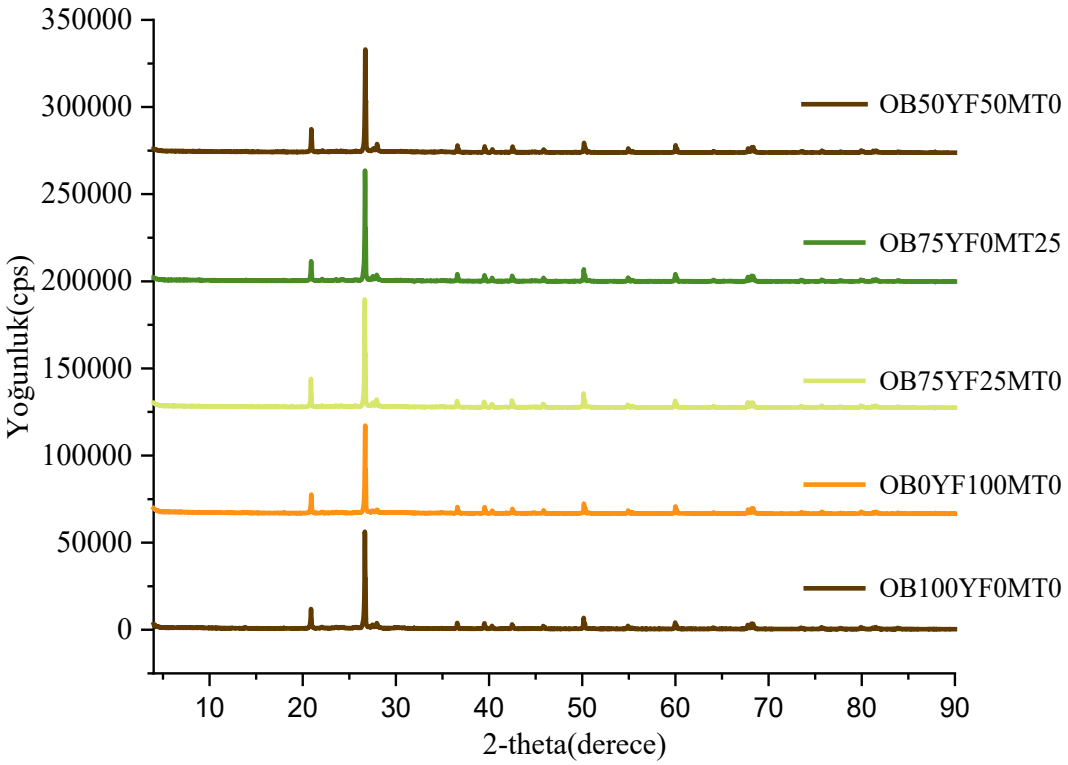
(OB:Obsidiyen, YF:Yüksek Fırın Cürufu, MT: Metakaolin, 90:Kırım Günü; 75, 90, 105 ve 120: Uygulanan Kür Sıcaklığı)

3.3. Geopolimer Harçların XRD Analizi

Geopolimer harçların malzeme karakterizasyonunu belirlemek amacı ile en yüksek eğilme ve basınç dayanımını veren 5 kombinasyona (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB50YF50MT0 ve OB75YF0MT25) ait numuneler toz haline getirilerek Merkezi Araştırma Laboratuvarında XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

X-Ray difraktometrik toz yöntemi (XRD), monokromatik dalga boyu λCu-K-beta olan PW1830 model cihaz ile 4°–90° 2Θ° açı aralığında otomatik veri tabanı ile taranmıştır. Farklı tipte harç karışımlarını temsil eden XRD spektrumu Şekil 35' te gösterilmektedir. Geopolimer harcın mineralojik bileşimini temsil eden ana reaksiyon fazları Qualx programı (Bouaissi vd., 2019; Ahmari vd., 2012) kullanılarak tanımlanmıştır.

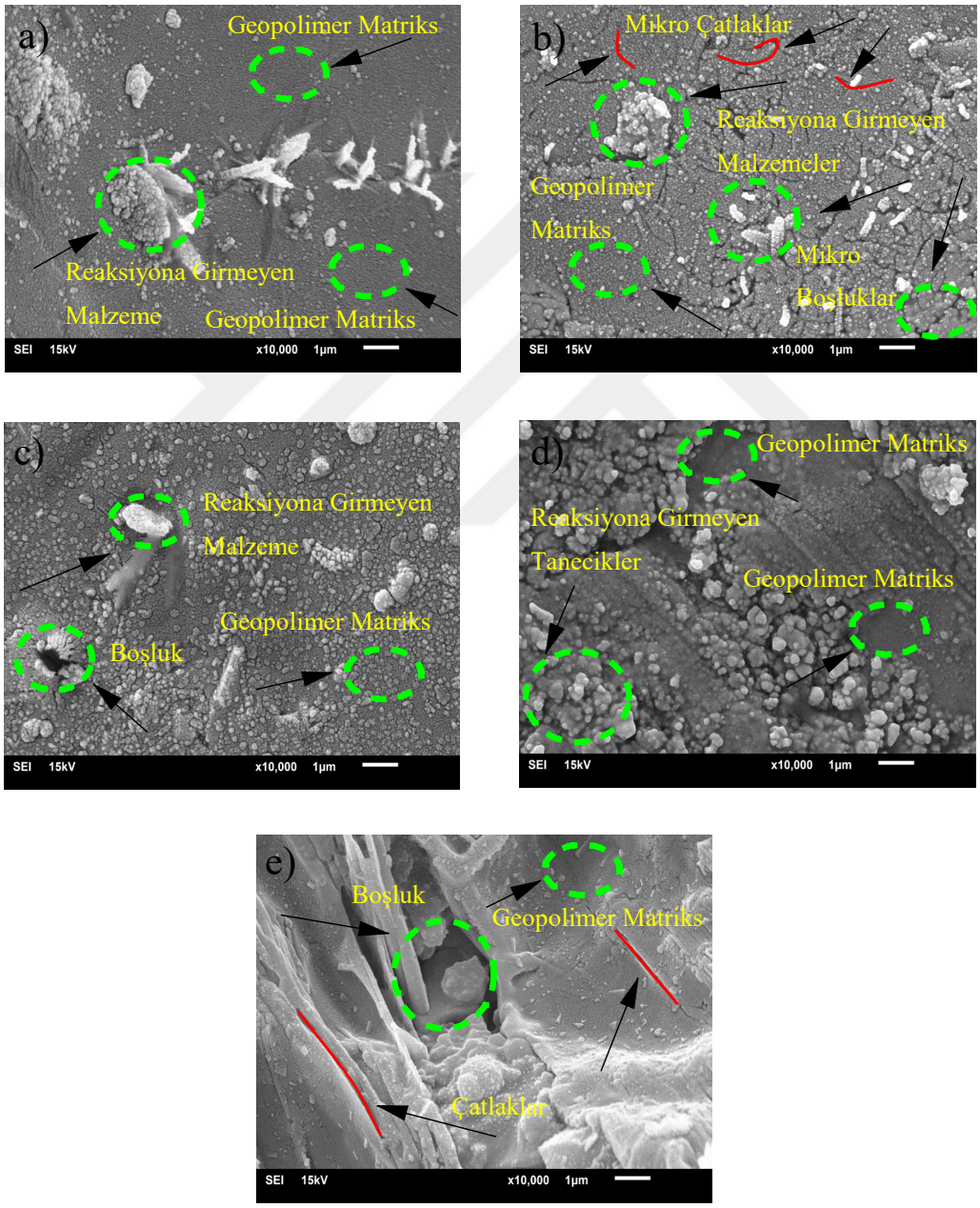
Geopolimer harçların reaksiyon fazları kuvars (20,88; 26,66; 36,58; 39,55 ve 54,90 2Θ), Albit (27,94; 42,48 ve 68,52 2Θ) ve Berlinittir (60,16; 64,06 2Θ). Alkali kimyasallar ile aktive edilmiş örneklerden elde edilen XRD dokularında 25-35 2Θ derece arasında görünen tümsekler, C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H gibi amorf jellerin varlığına işaret etmektedir (Şekil 35).



Şekil 35. Beş farklı geopolimer harç karışımı için XRD spektrumu (Kurt, Ustabas ve Cakmak, 2023)

3.4. Geopolimer Harçların SEM-EDS Analizi

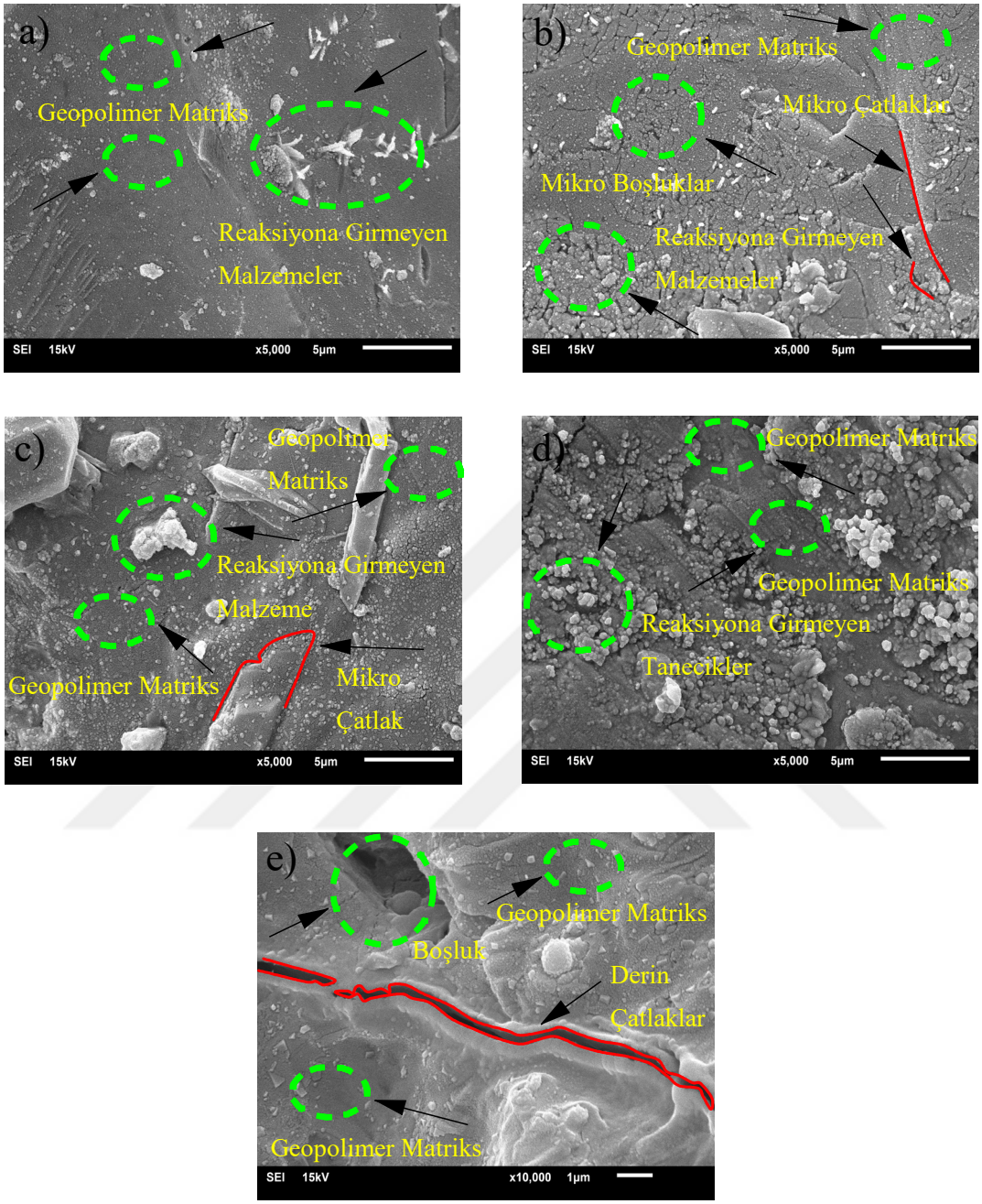
Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38'de OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB50YF50MT0, OB100YF0MT0 ve OB75YF0MT25 serisi geopolimer harçlarda SEM analizleri görülmektedir. Aynı zamanda geopolimer matrisin elemental kompozisyonu hakkında bilgi sahibi olmak için belirtilen numunelere EDS analizi yapılmıştır. Şekil 36'da 5 farklı karışım için x10000 kez yakınlaştırılmış SEM fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 36. 5 farklı geopolimer karışımın x10000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25

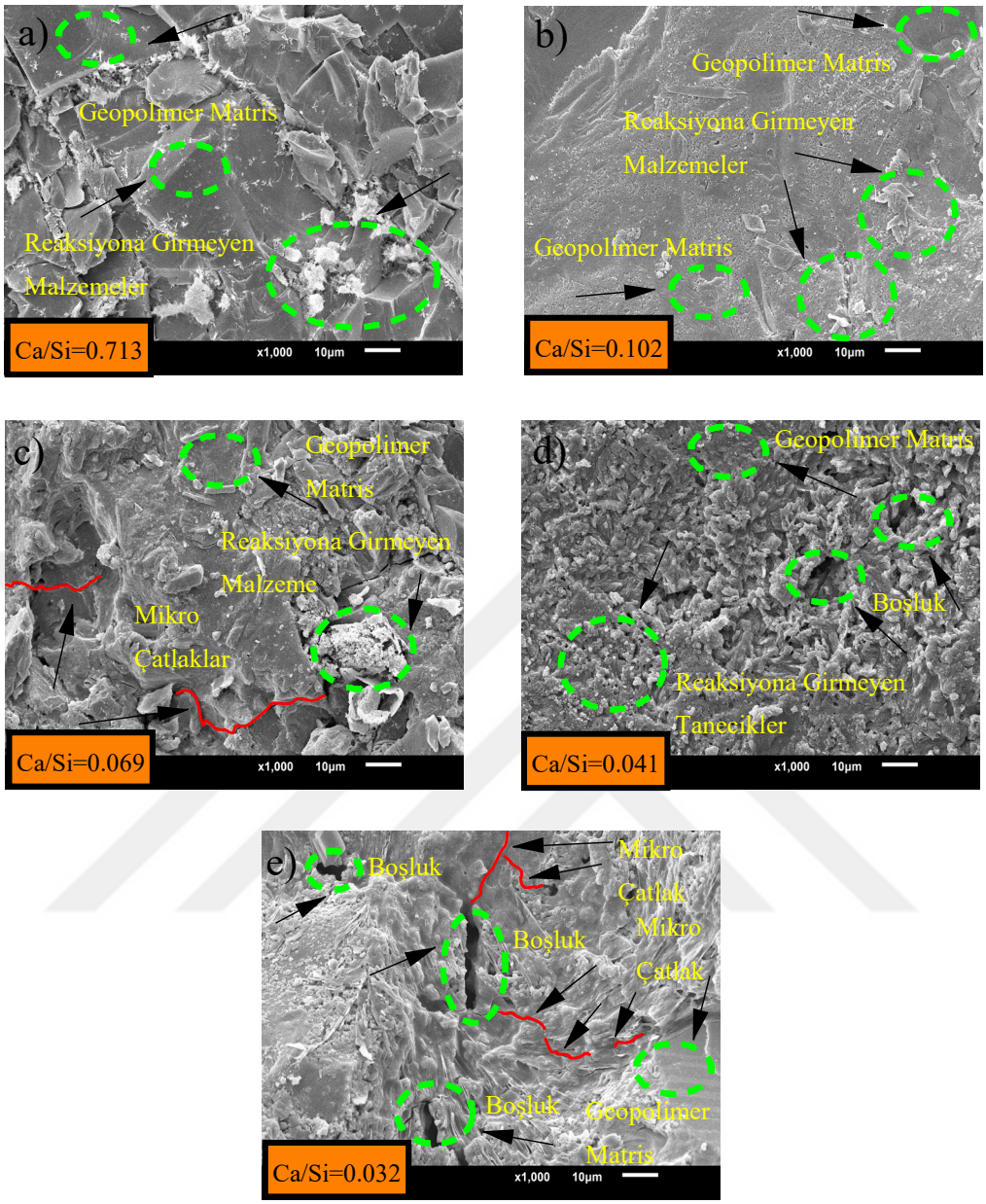
Şekil 36 (a)'da oldukça kompakt bir yapı ve az miktarda reaksiyona girmeyen parçacık görünmektedir. Şekil 36 (b)'de oluşan geopolimer jel, reaksiyona girmeyen malzemeler ve mikro çatlaklar vardır. Şekil 36 (c)'de reaksiyona katılmayan malzeme, oluşan geopolimer jel (NASH veya CSH) ve boşluklu yapı, Şekil 36 (d)'de geopolimer jel, reaksiyona katılmayan parçacık, Şekil 36 (e)'de ise çatlaklar, geopolimer jel ve derin boşluklar olduğu görülmektedir.

Şekil 37'de 5 farklı geopolimer harcın 5000 kez büyütülmüş SEM analizleri görülmektedir. Görüntülerde reaksiyona girmeyen malzemeler, mikro ve makro çatlak ve boşluklar, geopolimer matrise ait yapılar mevcuttur.



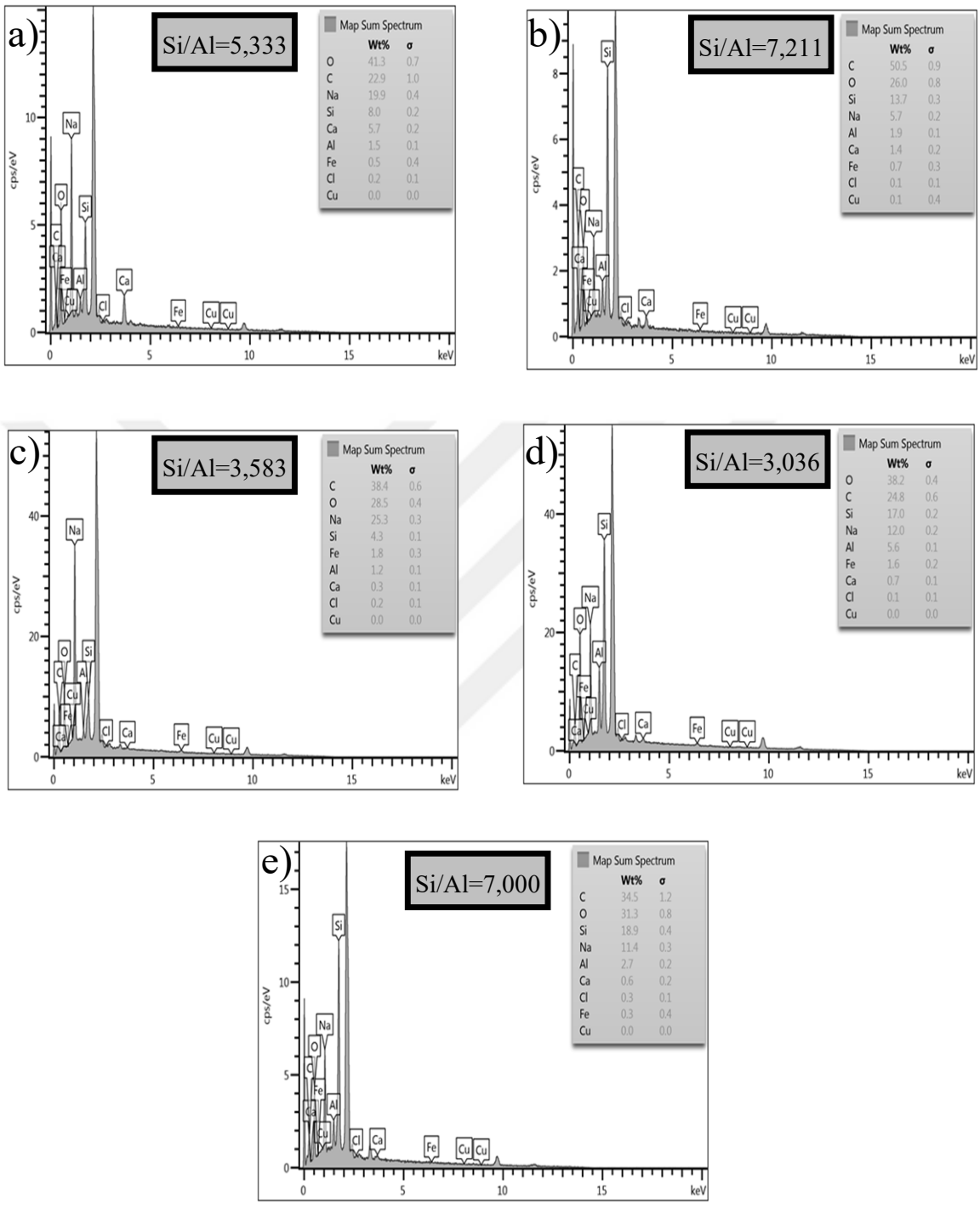
Şekil 37. 5 farklı geopolimer karışımın x5000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25

Şekil 38'de beş farklı karışım için 1000 kez büyütülmüş SEM analizleri ve numunelerden elde edilen Ca/Si oranları görülmektedir. Şekil 38'de reaksiyona girmeyen malzemeler, mikro ve makro çatlak ve boşluklar, geopolimer matrise ait yapılar mevcuttur.



Şekil 38. 5 farklı geopolimer karışımın x1000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Ca/Si Oranları

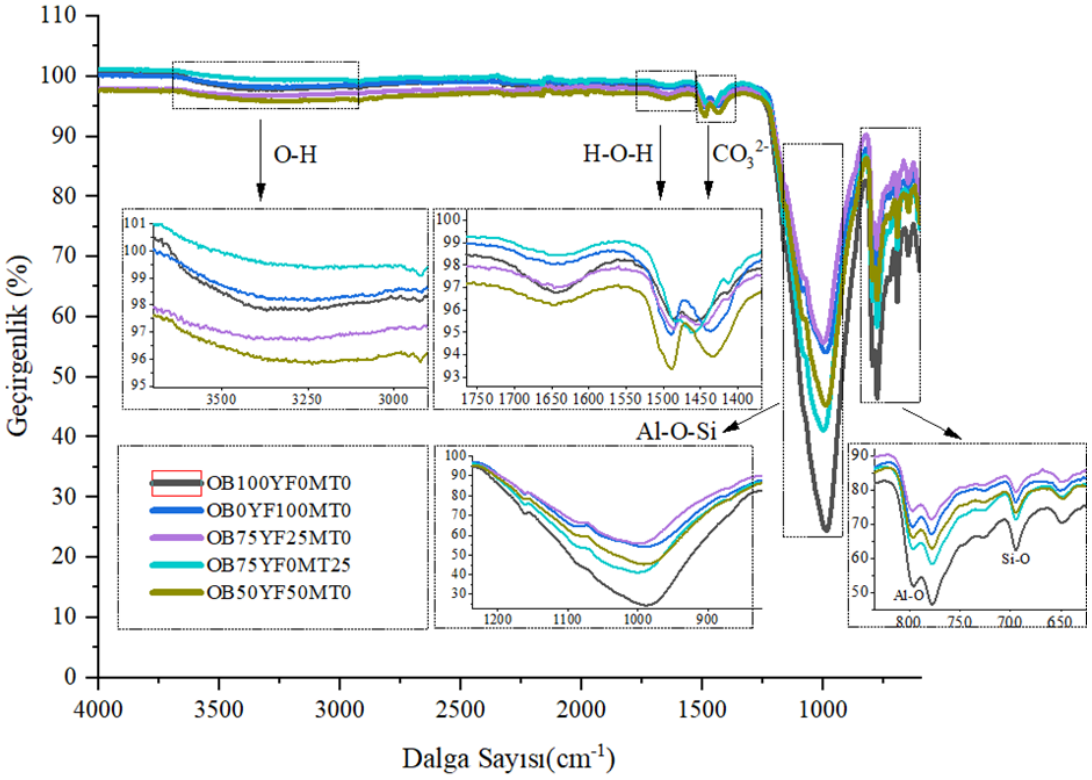
Şekil 39'da 5 farklı numuneye ait EDS analizleri sonucu elde edilen spektroskopiler görülmektedir. Numune yüzeylerinden alınan noktasal ortalama elemental mineral miktarlarına göre maksimum Si/Al oranı 7,211 olarak OB75YF25MT0 numunesinden elde edilirken, minimum Si/Al oranı 3,036 olarak OB100YF0MT0 numunesinde tespit edilmiştir.



Şekil 39. 5 farklı geopolimer karışımın elemental spektroskopileri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Si/Al Oranları

3.5. Geopolimer Harçların FTIR Analizleri

FTIR spektrumu, üretilen harç malzemesindeki kimyasal bağların ve reaksiyon ürünlerinin değişimlerinin anlaşılmasını sağlayan etkili bir yöntemdir. Şekil 40'da beş adet geopolimer harç gurubunun FTIR spektrumları gösterilmektedir. Çeşitli absorpsiyon frekansları incelendiğinde, geopolimerizasyon boyunca dönüşüm meydana geldiği anlaşılmaktadır. Geopolimer harçların üretimi sırasında oluşan kimyasal bağları temsil eden çeşitli bantlar karakterize edilmiştir.



Şekil 40. 5 farklı geopolimer karışımın FTIR spektrumu (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0)

3.6. Lifli Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımları

Tablo 19'da 3 adet kontrol grubu ve lifli harçlar içeren numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. Çalışmada en büyük eğilme dayanımı Polivinil Alkol Lif-1,5 numunesinde 19,07 MPa, en düşük basınç dayanımı Polivinil Alkol Lif-2,0 numunesinde 11,57 MPa olarak elde edilmiştir. Bazalt lif kullanılan numunelerde optimum lif oranı %2,5, çelik liflerde %2,0 ve Polivinil Alkol Liflerde %1,5 olduğu

tespit edilmiştir. Lif kullanılan numunelerde kontrol grubuna göre, Bazalt Lif-1,5'in eğilme dayanımında yaklaşık %2,5, Bazalt Lif-2,0'in %14,4, Bazalt Lif-2,5'in %15,5, Çelik Lif-2,0'in %6,8, Çelik Lif-2,5'in %2,7, Polivinil Alkol Lif-1,5'in %17,9 artış olmuştur. Ancak, Çelik Lif-1,5'in eğilme dayanımı kontrol grubuna göre yaklaşık % 5,4, Polivinil Alkol Lif-2,0'in %28,4 ve Polivinil Alkol Lif-2,5'in %16,1 dayanım kaybına uğramıştır. Bazalt lifli numuneler kontrol grubuna göre genel olarak eğilme dayanımları istikrarlı şekilde artarken, çelik ve polinil alkol liflerin eğilme dayanımlarında dalgalanmalar olmuştur.

Tablo 19. Lifli geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları (MPa)

Numune ismi	Eğilme Dayanımı
Kontrol	16,17
Bazalt Lif-1.5	16,57
Bazalt Lif-2.0	18,50
Bazalt Lif-2.5	18,67
Çelik Lif-1.5	15,30
Çelik Lif-2.0	17,27
Çelik Lif-2.5	16,60
Polivinil Alkol Lif-1.5	19,07
Polivinil Alkol Lif-2.0	11,57
Polivinil Alkol Lif-2.5	13,57

3.7. Lifli Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları

Tablo 20'de beş adet geopolimer harca lif ilave edilerek elde edilen lifli geopolimer harçların basınç dayanımları görülmektedir. Her guruptan üçer adet dökülen lifli geopolimer harçların üç tanesine eğilme deneyi uygulanmıştır, eğilme dayanımı testi sonucu altı adet numuneye için ise basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Tablo 20'deki basınç dayanımı değerleri altı adet numunenin ortalaması olarak sunulmuştur. Çalışmada en büyük basınç dayanımı kontrol grubunda 60,65 MPa, en düşük basınç dayanımı polivinil alkol lif-2.0 numunesinde 35,60 MPa olarak elde edilmiştir. Bazalt lif kullanılan numunelerde optimum lif oranı %1,5, çelik liflerde %1,5 ve polivinil alkol liflerde %2,5 olduğu görülmektedir. Lif kullanılan numunelerde kontrol grubuna göre, Bazalt Lif-1.5 numunesinde basınç dayanımlarında belirgin bir değişime rastlanmazken, Bazalt Lif-2.0'in yaklaşık %17,5, Bazalt Lif-2.5'in %27,2, Çelik Lif-1.5'in %6,4, Çelik Lif-2.0'in %14,9, Çelik Lif-2.5'in %13,1, Polivinil Alkol Lif-1.5'in %39,7, Polivinil Alkol Lif-2.0'in % 41,3,

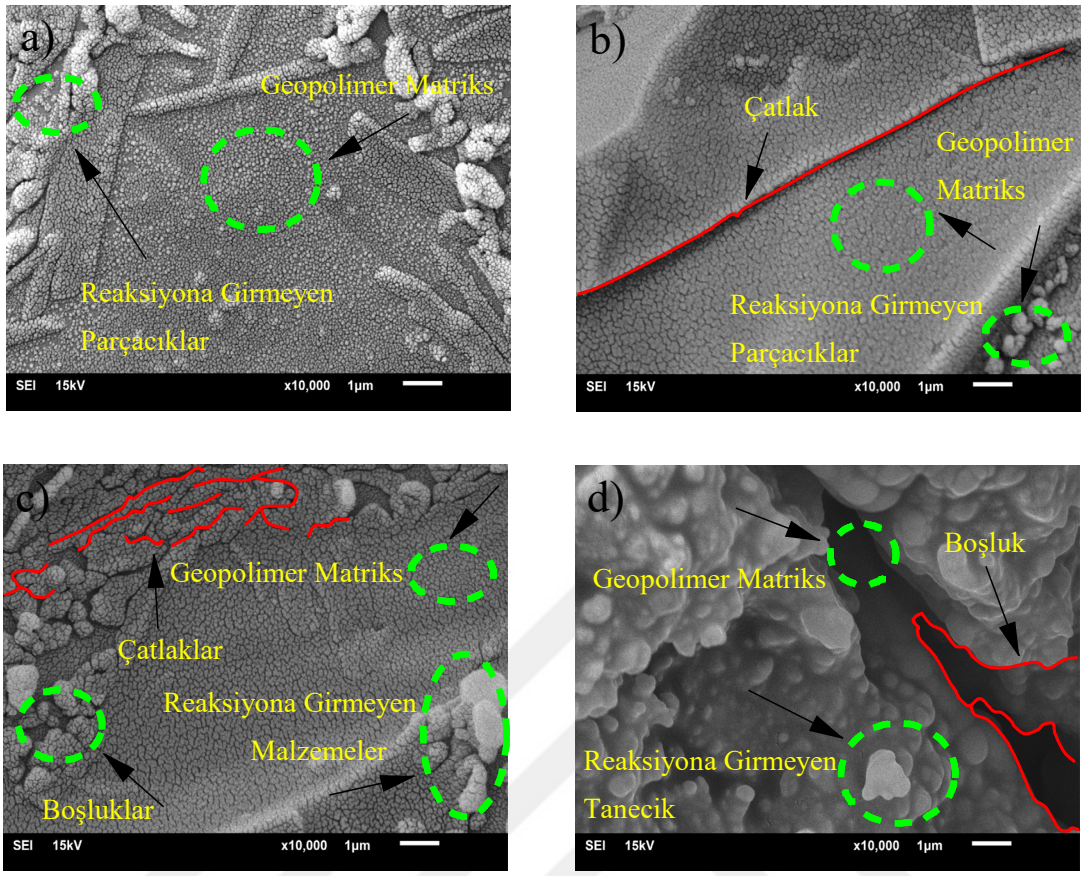
Polivinil Alkol Lif-2.5'in %32,2 dayanım kaybına uğradığı saptanmıştır. Bazalt lifli numuneler kontrol grubuna göre maksimum basınç dayanımlarına sahipken, polivinil alkol lif içeren harçların basınç dayanımları yaklaşık olarak yarıya düşmüştür.

Tablo 20. Lifli geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

Numune ismi	Basınç Dayanımı
Kontrol	60,65
Bazalt Lif-1.5	60,58
Bazalt Lif-2.0	50,06
Bazalt Lif-2.5	44,18
Çelik Lif-1.5	56,76
Çelik Lif-2.0	51,62
Çelik Lif-2.5	52,70
Polivinil Alkol Lif-1.5	36,60
Polivinil Alkol Lif-2.0	35,60
Polivinil Alkol Lif-2.5	41,10

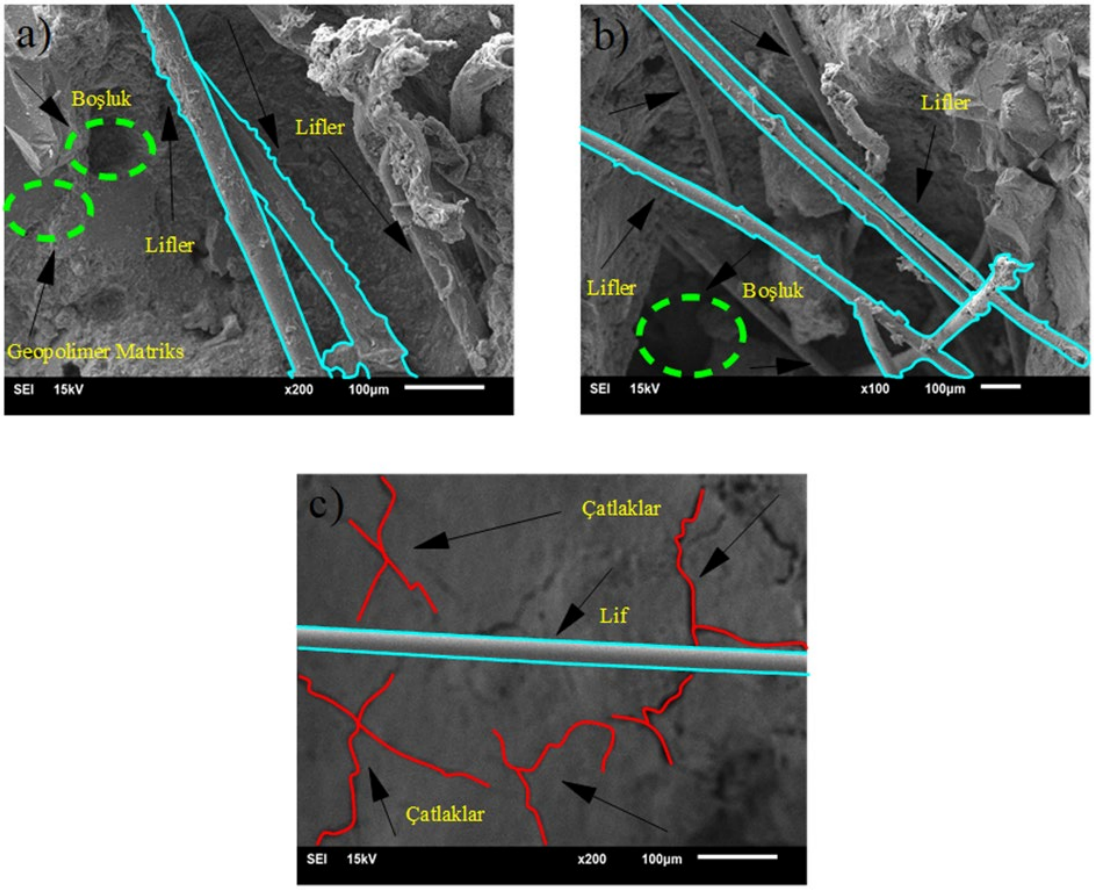
3.8. Lifli Geopolimer Harçların SEM Analizi

Lifli geopolimer harçların yapısında oluşan geopolimer jel, boşluk ve çatlak yapısı gibi olguların anlaşılabilmesi için yaklaşık 1 cm'lik Kontrol numunesi, Bazalt Lif-2,5, Çelik Lif-2,0 ve Polivinil Alkol Lif-1,5 olarak isimlendirilen dört adet numune RTEÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarında SEM analizi yapılarak incelenmiştir. Şekil 41'de dört farklı numuneye ait 10000 kez büyütülmüş SEM analizleri görülmektedir. Görüntülerde çeşitli jel yapısı, kompakt matris, reaksiyona katılmamış parçacıklar, mikro ve derin çatlak, boşluklara ait yapılar tespit edilmiştir.



Şekil 41. 4 farklı lifli geopolimer harç için x10000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: (a) Kontrol, b) Bazalt Lif-2,5; c) Çelik Lif-2,0 ve d) Polivinil Alkol Lif-1,5)

Ayrıca Şekil 42'de lifli yapıların ve liflerin dağılımının daha detaylı incelenebilmesi için farklı yakınlaştırma oranlarına sahip SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde geopolimer matris, boşluk yapısı ve liflerin dağılımı görülmektedir.



Şekil 42. Geopolimer Harçlarda Lif Dağılımı için SEM görüntüleri: (a) Polivinil Alkol Lif-1,5 x200; b) Polivinil Alkol Lif-1,5 x100 ve c) Çelik Lif-2,0 x200

3.9. Geopolimer Harçların Eğilme ve Basınç Dayanımlarının Makine Öğrenmesi ile Tahmini

Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımlarının tahmininde kullanılan veri seti, kapsamlı laboratuvar çalışmasında üretilen geopolimer harçların mekanik dayanım değerlerinden oluşmaktadır. Kullanılan geopolimer üretim yöntemi, iki parçalı geopolimer yöntemidir. Başlangıçta, geopolimer harçlar üretilirken bağlayıcı öncül olarak obsidiyen tozu, yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanılmıştır. İkinci olarak, bir alkali aktivatör olarak 12 Molar NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Bağlayıcının farklı oranları kullanılarak hazırlanan harç numuneleri, ısıl kür işleminden önce 24 saat boyunca iklimlendirme kabinindeki kalıpta bekletilmiştir. İklimlendirme sonrası 75, 90, 105 ve 120 °C'de 72 saat kürlenmeye bırakılmıştır. Basınç dayanımı değerleri, 6 adet harç örneğinin aritmetik ortalama değerleri ve 3 adet harç örneğinin eğilme

dayanımı değerleridir. Toplamda 156 adet basınç ve eğilme dayanımı değeri bulunmaktadır. Veri seti bu değerlerden seçilmiştir. Veri setinde OB (obsidiyen), YF(öğütülmüş yüksek fırın cürufu), MT (metakaolin), kırım günü, sıcaklık olmak üzere 5 adet girdi değişkeni ve 1 adet basınç ve eğilme dayanımı çıktı değişkeni bulunmaktadır (Şekil 43).

OB	YF	MT	Age	Heat	CS		Norm_OB	Norm_YF	Norm_MT	Norm_Ag	Norm_He	Norm_CS
450	0	0	7	75	36,98		1	0	0	0	0	0,394748
0	450	0	7	75	78,48		0	1	0	0	0	0,837746
0	0	450	7	75	0		0	0	1	0	0	0
337,5	112,5	0	7	75	64,38		0,75	0,25	0	0	0	0,687233
337,5	0	112,5	7	75	42,278		0,75	0	0,25	0	0	0,451302
225	225	0	7	75	59,68		0,5	0,5	0	0	0	0,637062
225	0	225	7	75	0		0,5	0	0,5	0	0	0
112,5	337,5	0	7	75	52,95		0,25	0,75	0	0	0	0,565222
112,5	0	337,5	7	75	0		0,25	0	0,75	0	0	0
112,5	112,5	225	7	75	0		0,25	0,25	0,5	0	0	0
112,5	225	112,5	7	75	56,2		0,25	0,5	0,25	0	0	0,599915
0	112,5	337,5	7	75	0		0	0,25	0,75	0	0	0
0	337,5	112,5	7	75	62,45		0	0,75	0,25	0	0	0,666631
450	0	0	7	90	39,7		1	0	0	0	0,333333	0,423783
0	450	0	7	90	69,55		0	1	0	0	0,333333	0,742421
0	0	450	7	90	0		0	0	1	0	0,333333	0
337,5	112,5	0	7	90	68,78		0,75	0,25	0	0	0,333333	0,734202
337,5	0	112,5	7	90	32,112		0,75	0	0,25	0	0,333333	0,342784
225	225	0	7	90	60,45		0,5	0,5	0	0	0,333333	0,645282
225	0	225	7	90	0		0,5	0	0,5	0	0,333333	0

Şekil 43. Basınç Dayanımı İçin Veri Seti Görünümü

Özellik istatistikleri azaltılmış verileri ve veri seti tablolarının sayısal özelliklerini gösterir. Bu şekilde, basınç ve eğilme dayanımına her bir bileşenin veri setindeki etkileri incelenebilmektedir.

Veri seçimi için 156 adet veri kullanılırken; verilerin %80'i eğitim, %20'i ise test verisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 21 ve Tablo 22, her iki veri kümesindeki özellik istatistiklerini göstermektedir. OB, YF, MT, kırım günü ve kür sıcaklığı özellikleri, özellik değişkenleri (bağımsız değişken) olarak seçildi. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı hedef özellik (bağımlı değişken) olarak belirlendi. Bu tablolar ayrıca veri kümesindeki her özellik için ortalama, mod, medyan, dağılım, minimum ve maksimum değerler gibi istatistikleri göstermektedir. Ortalama değer, veri kümesindeki her özellik için değerlerin merkezi eğilimini verir. Dağılım değeri, her özellik için varyasyon katsayısını temsil eder. Şekildeki minimum ve maksimum değerler, minimum ve

maksimum özellik değerlerini sağlar. Eksik alan, eksik değerler veri kümesinden kaldırıldığı için %0 olan eksik değerlerin yüzdesini gösterir.

Tablo 21. Basınç dayanımı veri seti için özellik istatistikleri

Özellik Adı	Ortalama	Medyan	Dağılım	Min.	Max.	Kayıp (%)	Mod
OB	155,77	112,5	0,92	0	450	0%	0.0
YF	147,12	112,5	1,01	0	450	0%	0.0
MT	147,12	112,5	1,01	0	450	0%	0.0
Kırım Günü	41,67	28	0,85	7	90	0%	7
Sıcaklık	97,50	97,5	0,17	75	120	0%	75
Basınç Dayanımı	32,89	41,1	0,89	0	93,6	0%	0

Tablo 22. Eğilme dayanımı veri seti için özellik istatistikleri

Özellik Adı	Ortalama	Medyan	Dağılım	Min.	Max.	Kayıp (%)	Mod
OB	155,77	112,5	0,92	0	450	0%	0.0
YF	147,12	112,5	1,01	0	450	0%	0.0
MT	147,12	112,5	1,01	0	450	0%	0.0
Kırım Günü	41,67	28	0,85	7	90	0%	7
Sıcaklık	97,50	97,5	0,17	75	120	0%	75
Eğilme Dayanımı	4,12	4,3	1,06	0	21,4	0%	0

Çalışmanın çıktı değişkenlerine girdi değişkenlerinin yarattığı etkinin önem analizi için RreliefF ve Univariate Regresyon gibi iki özellik belirleme yöntemi, değişkenleri basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değişkenleriyle olan korelasyonlarına göre sıralamak için kullanıldı. Bu iki yöntem, regresyon problemleri için mevcut seçenekler olduğundan önem analizi için seçilmiştir. Tablo 23 ve Tablo 24'te sırasıyla basınç eğilme dayanımları verilerine etki eden girdilerin önem analizi sonuçları verilmektedir.

Tablo 23. Basınç Dayanımı Verilerine Etki Eden Girdilerin Önem Analizi Sonuçları

Özellik Adı	Univariate Regresyon	RReliefF
OB	0,924	0,171
YF	224,963	0,284
MT	383,853	0,285
Kırım Günü	0,062	0,103
Sıcaklık	0,772	0,176

Tablo 24. Eğilme Dayanımı Verilerine Etki Eden Girdilerin Önem Analizi Sonuçları

Özellik Adı	Univariate Regresyon	RReliefF
OB	43,822	0,201
YF	16,391	0,212
MT	214,558	0,245
Kırım Günü	0,184	0,137
Sıcaklık	0,470	0,198

Çalışmada, ayrıca günümüz çalışmalarında da popüler olan lineer regresyon, k en yakın komşu, karar ağaçları, derin sinir ağları ve rastgele orman algoritmaları kullanılmıştır. Kullanılan algoritmaların performans verileri aşağıdaki tablolarda yer almaktadır (Tablo 25 ve Tablo 26).

Tablo 25. Basınç Dayanımı Verilerine Uygulanan Algoritmaların Performans Metrikleri

Model ismi	MSE	RMSE	MAE	R^2
Karar Ağaçları	48,64	6,97	4,14	0,93
Rastgele Orman	12,48	3,53	2,11	0,98
Derin Sinir Ağları	53,20	7,29	5,70	0,93
Lineer Regresyon	125,69	11,21	9,08	0,83
kNN En Yakın Komşu	20,95	4,58	2,68	0,97

Tablo 26. Eğilme Dayanımı Verilerine Uygulanan Algoritmaların Performans Metrikleri

Model ismi	MSE	RMSE	MAE	R^2
Karar Ağaçları	5,70	2,39	1,31	0,73
Rastgele Orman	2,22	1,49	0,85	0,89
Derin Sinir Ağları	5,19	2,28	1,45	0,75
Lineer Regresyon	8,74	2,96	2,12	0,58
kNN En Yakın Komşu	3,37	1,83	1,01	0,84

Yapılan analizlerin sonucunda elde edilen, gerçek veri ile tahmin verilerinin basınç ve eğilme dayanımları için Tablo 27 ve Tablo 28'de verilmektedir.

Tablo 27. Gerçek Basınç Dayanımları ve Algoritmaya Bağlı Tahmin Verileri (MPa)

Test Örneği Sayısı	Gerçek Basınç Dayanımı	Derin Sinir Ağları	Rastgele Orman	Karar Ağaçları	Lineer Regresyon	k en yakın komşu
1	53,73	50,44	52,46	51,49	55,33	56,23
2	20,48	37,19	33,04	33,49	25,09	33,03
3	20,48	30,43	33,04	33,49	23,58	28,84
4	0,00	-0,22	0,00	0,00	7,94	0,00
5	58,50	52,65	57,93	59,89	44,88	55,39
6	53,35	62,70	55,03	51,49	47,46	60,08
7	56,43	52,34	53,00	51,49	45,46	58,41
8	0,00	-0,04	0,00	0,00	-18,42	0,00
9	0,00	0,77	0,00	0,00	-18,47	0,00
10	0,00	3,04	0,00	0,00	18,47	0,00
11	0,00	1,30	0,00	0,00	12,08	0,00
12	56,85	53,85	50,54	71,67	53,19	56,69
13	0,00	0,07	0,00	0,00	-14,95	0,00
14	0,00	0,13	0,00	0,00	-3,40	0,00
15	0,00	-0,45	0,00	0,00	8,43	0,00
16	15,86	32,64	33,33	33,49	24,08	31,10
17	0,00	0,70	0,00	0,00	-16,91	0,00
18	45,38	42,35	45,62	51,49	41,81	52,78
19	0,00	4,62	0,00	0,00	16,97	0,00
20	41,38	41,10	39,03	33,49	37,10	39,63
21	55,80	47,41	50,26	51,49	65,20	56,13
22	60,45	58,46	60,74	59,89	58,84	58,58
23	62,45	63,29	60,42	71,67	56,71	60,01
24	0,00	2,46	0,00	0,00	23,45	0,00
25	56,78	56,81	54,78	51,49	57,33	56,72
26	42,17	43,89	30,39	33,49	38,65	40,04
27	69,71	67,65	63,79	59,89	48,48	60,86
28	65,28	64,98	58,62	59,89	49,99	61,36
29	49,38	41,50	47,49	71,67	52,18	54,55
30	0,00	3,04	0,00	0,00	8,56	0,00
31	0,00	4,18	0,00	0,00	9,06	0,00
32	14,12	6,43	18,58	33,49	20,61	19,39

33	0,00	9,03	0,00	0,00	18,75	0,00
34	43,28	43,98	47,60	52,39	41,50	54,10
35	52,95	51,95	53,78	52,39	45,00	59,95
36	62,45	59,74	59,60	69,42	58,75	58,52
37	0,00	-4,81	0,00	0,00	7,75	0,00
38	54,80	56,03	53,26	52,39	67,50	56,98
39	0,00	1,94	0,00	0,00	8,25	0,00
40	0,00	2,28	0,00	0,00	25,50	0,00
41	0,00	-0,30	0,00	0,00	9,25	0,00
42	59,68	60,33	58,27	60,35	60,75	57,71
43	55,80	51,28	50,72	52,39	65,25	56,87

Tablo 28. Gerçek Eğilme Dayanımları ve Algoritmaya Bağlı Tahmin Verileri (MPa)

Test Örneği Sayısı	Gerçek Eğilme Dayanımı	Derin Sinir Ağları	Rastgele Orman	Karar Ağaçları	Lineer Regresyon	k en yakın komşu
1	7,20	9,11	5,66	7,55	7,55	6,33
2	4,15	5,08	4,15	4,48	5,85	6,77
3	3,95	1,21	4,30	4,48	5,77	5,80
4	0,00	1,22	0,00	0,00	-0,30	0,00
5	7,30	5,44	6,08	4,48	4,28	4,66
6	7,30	1,59	5,95	9,89	8,33	6,78
7	7,55	6,46	5,40	9,89	8,04	6,25
8	0,00	-2,51	0,00	0,00	-3,35	0,00
9	0,00	-0,59	0,00	0,00	-2,78	0,00
10	0,00	-0,09	0,00	0,00	1,81	0,00
11	0,00	-1,54	0,00	0,00	3,24	0,00
12	6,00	7,70	5,21	4,48	4,30	4,20
13	0,00	2,45	0,00	0,00	-2,41	0,00
14	0,00	-0,50	0,00	0,00	-0,46	0,00
15	0,00	0,52	0,00	0,00	-0,08	0,00
16	0,00	-2,42	2,55	4,48	5,99	5,46
17	0,00	-0,39	0,00	0,00	-3,28	0,00
18	5,20	6,54	4,32	4,48	4,72	3,81
19	0,00	0,73	0,00	0,00	1,74	0,00

3.10. Geopolimer Betonların Yarmada Çekme Dayanımları

Beton numunelerden elde edilen en iyi dayanımlara sahip 5 farklı kombinasyon için üretilen geopolimer betonların yarmada çekme dayanımı testinden elde edilen 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 29'da verilmiştir.

Tablo 29. Lifli Geopolimer Betonların 28 Günlük Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)

Numune İsmi	Yarmada Çekme Dayanımı (90 °C)
OB100YF0MT0	1,84
OB0YF100MT0	5,98
OB75YF25MT0	1,49
OB75YF0MT25	3,11
OB50YF50MT0	3,56
OB100YF0MT0-PVA-2	2,58
OB0YF100MT0-PVA-2	3,94
OB75YF25MT0-PVA-2	2,19
OB75YF0MT25-PVA-2	3,34
OB50YF50MT0-PVA-2	2,88
OB100YF0MT0-Çelik-2	2,76
OB0YF100MT0-Çelik-2	4,20
OB75YF25MT0-Çelik-2	1,67
OB75YF0MT25-Çelik-2	1,12
OB50YF50MT0-Çelik-2	3,46
OB100YF0MT0-Bazalt-2	3,82
OB0YF100MT0-Bazalt-2	4,56
OB75YF25MT0-Bazalt-2	1,54
OB75YF0MT25-Bazalt-2	1,68
OB50YF50MT0-Bazalt-2	1,59

(OB:Obsidiyen. YF:Yüksek Fırın Cürufu. MT: Metakaolin. 28:Kırım Günü; 90: Uygulanan Kür Sıcaklığı, 2: Bağlayıcı ağırlığının %'si kadar lif oranı, PVA: Polivinil Alkol Lif)

Tablolarda belirtilen tüm değerler 3 adet numunenin yarmada çekme dayanımının aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Tablo 30'da verilen değerlerde en yüksek yarmada çekme dayanımı OB0YF100MT0 numunelerinde 5,98 MPa, minimum yarmada çekme dayanımının ise OB75YF0MT25-Çelik-2 numunesinde 1,12 MPa olduğu görülmektedir. Ortalama yarmada çekme dayanımı ise OB50YF50MT0-Çelik-2 numunelerinde 3,46 MPa olarak elde edilmiştir.

3.11. Lifli Geopolimer Betonların Basınç Dayanımları

Tablo 30'da beton küp numunelerden elde edilen en iyi dayanımlara sahip 5 farklı kombinasyon için üretilen geopolimer betonların basınç dayanımı testinden elde edilen 28 günlük basınç dayanımı değerleri görülmektedir.

Tablo 30. Lifli Geopolimer Betonların 28 Günlük Basınç Dayanımları (MPa)

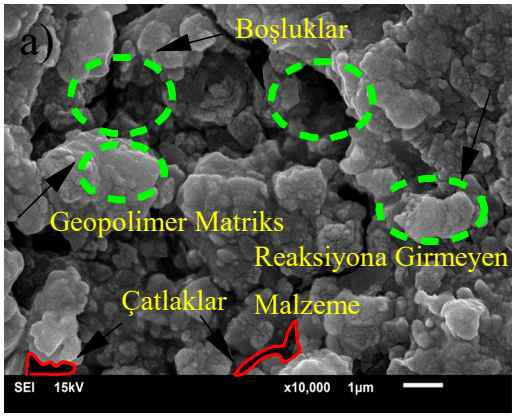
Numune ismi	Basınç dayanımı (90 °C)
OB100YF0MT0	23,91
OB0YF100MT0	61,73
OB75YF25MT0	22,79
OB75YF0MT25	24,23
OB50YF50MT0	35,61
OB100YF0MT0-PVA-2	25,40
OB0YF100MT0-PVA-2	60,30
OB75YF25MT0-PVA-2	38,60
OB75YF0MT25-PVA-2	25,28
OB50YF50MT0-PVA-2	39,78
OB100YF0MT0-Çelik-2	23,31
OB0YF100MT0-Çelik-2	65,76
OB75YF25MT0-Çelik-2	25,48
OB75YF0MT25-Çelik-2	24,97
OB50YF50MT0-Çelik-2	43,37
OB100YF0MT0-Bazalt-2	18,80
OB0YF100MT0-Bazalt-2	59,50
OB75YF25MT0-Bazalt-2	33,94
OB75YF0MT25-Bazalt-2	27,41
OB50YF50MT0-Bazalt-2	33,30

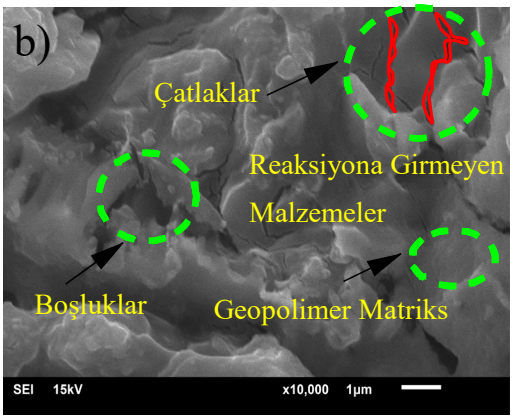
(OB:Obsidiyen. YF:Yüksek Fırın Cürufu. MT: Metakaolin. 28:Kırım Günü; 90: Uygulanan Kür Sıcaklığı, 2: Bağlayıcı ağırlığının %'si kadar lif oranı, PVA: Polivinil Alkol Lif)

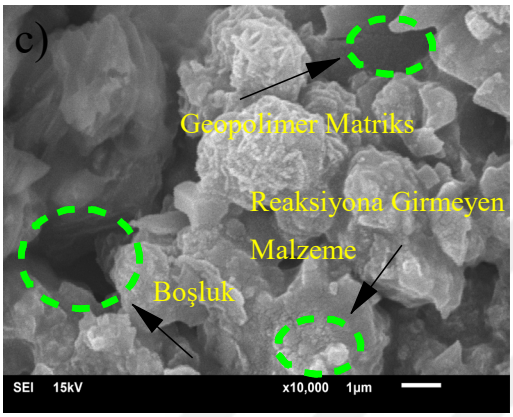
Tablolarda belirtilen tüm değerler 3 adet numunenin basınç dayanımının aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Tablo 29'da verilen değerlerde maksimum basınç dayanımı OB0YF100MT0 numunelerinde 61,73 MPa, minimum basınç dayanımının ise OB100YF0MT0-Bazalt-2 numunesinde 18,80 MPa olduğu görülmektedir. Ortalama basınç dayanımı ise OB75YF25MT0-PVA-2 numunelerinde 38,60 MPa olarak elde edilmiştir.

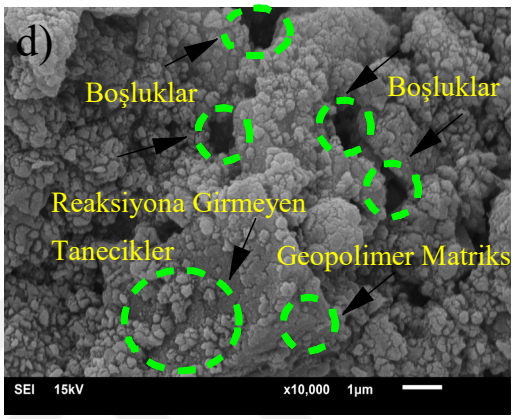
3.12. Lifli Geopolimer Betonların SEM Görüntüleri

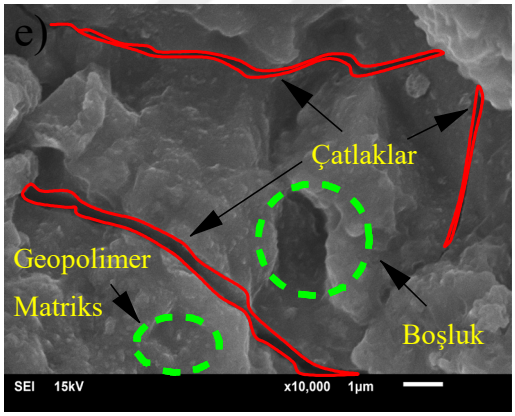
Lifli geopolimer betonların iç yapısında oluşan geopolimer jel, boşluk ve çatlak yapısı gibi durumların anlaşılabilmesi için 8 adet numuneden alınan yaklaşık 1 cm'lik prizmatik numuneler Kontrol numunesi, Bazalt Lif-2, Çelik Lif-2 ve Polivinil Alkol Lif-2 olarak isimlendirilip SEM analizi yapılarak incelenmiştir. Şekil 44'te 4 farklı numuneye ait 10000 kez büyütülmüş SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde kompakt matris, reaksiyona katılmamış parçacıklar, mikro ve makro çatlak ve boşluklar tespit edilmiştir.

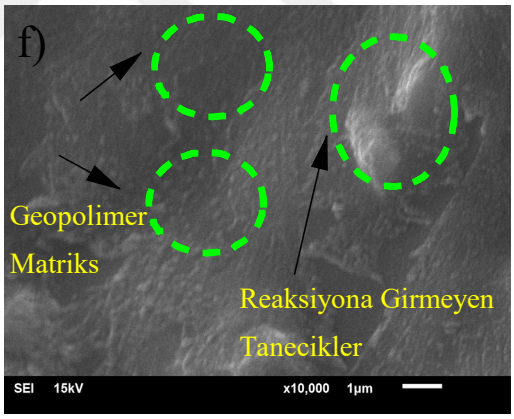

a)
Boşluklar
Geopolimer Matriks
Reaksiyona Girmeyen
Malzeme
Çatlaklar
SEI 15kV x10,000 1μm

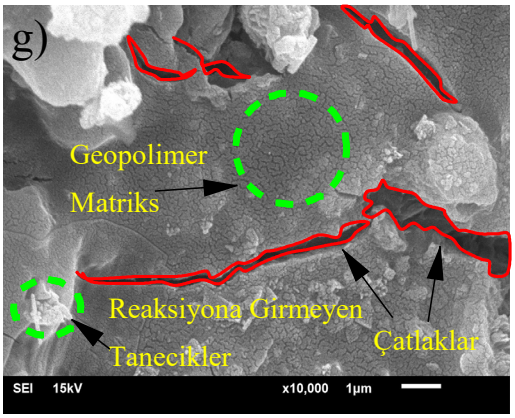

b)
Çatlaklar
Reaksiyona Girmeyen
Malzemeler
Boşluklar
Geopolimer Matriks
SEI 15kV x10,000 1μm

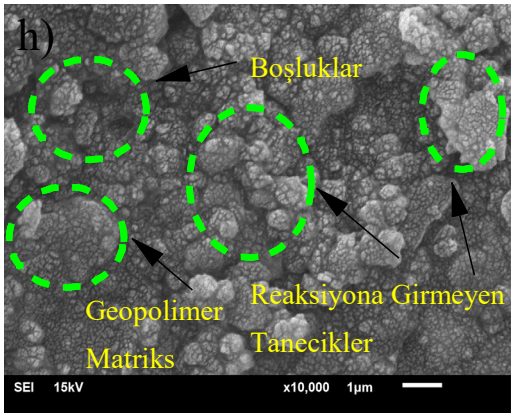

c)
Geopolimer Matriks
Reaksiyona Girmeyen
Malzeme
Boşluk
SEI 15kV x10,000 1μm


d)
Boşluklar
Boşluklar
Reaksiyona Girmeyen
Tanecikler
Geopolimer Matriks
SEI 15kV x10,000 1μm


e)
Çatlaklar
Geopolimer
Matriks
Boşluk
SEI 15kV x10,000 1μm

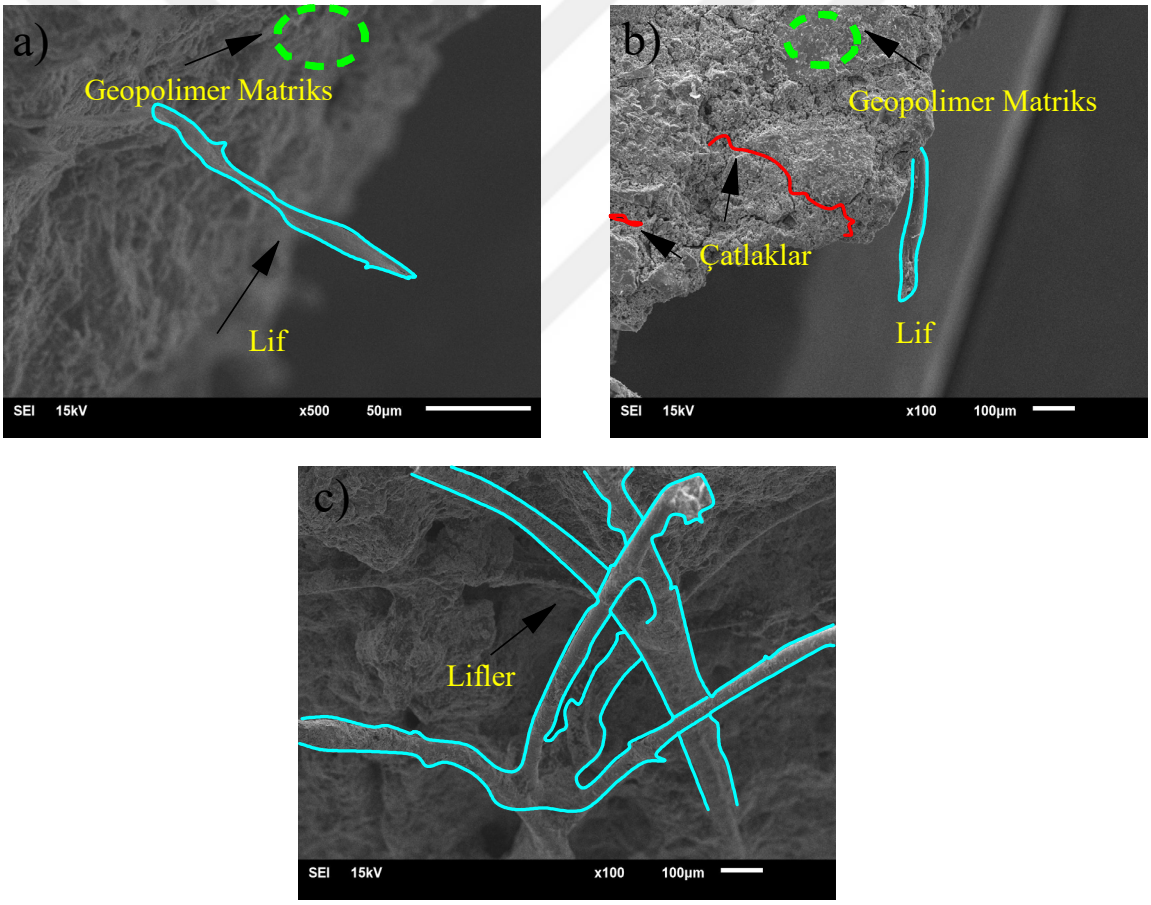

f)
Geopolimer
Matriks
Reaksiyona Girmeyen
Tanecikler
SEI 15kV x10,000 1μm


g)
Geopolimer
Matriks
Reaksiyona Girmeyen
Tanecikler
Çatlaklar
SEI 15kV x10,000 1μm


h)
Boşluklar
Geopolimer
Matriks
Reaksiyona Girmeyen
Tanecikler
SEI 15kV x10,000 1μm

Şekil 44. 8 farklı lifli geopolimer beton için x10000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OB100YF0MT0, b) OB0YF100MT0, c) OB100YF0MT0-Bazalt-2, d) OB0YF100MT0-Bazalt-2, e) OB100YF0MT0-Çelik-2, f) OB0YF100MT0-Çelik-2, g) OB100YF0MT0-PVA-2 ve h) OB0YF100MT0-PVA-2

Ayrıca Şekil 45'te lifli betonlarda görülebilen yapıların ve liflerin dağılımının daha detaylı incelenebilmesi için farklı yakınlaştırma değerlerine sahip SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde geopolimer matris, boşluk yapısı ve liflerin dağılımı ayrıntılı şekilde görülmektedir.



Şekil 45. Lifli Geopolimer Betonlarda Lif Dağılımı için SEM görüntüleri: (a) Bazalt Lif-2 x500, b) Çelik Lif-2 x100 ve c) Polivinil Alkol Lif-2 x100

4.TARTIŞMA VE SONUÇLAR

4.1. Tartışma

4.1.1. Geopolimer Harçların Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 46'da %100 yüksek fırın cürufu, %100 obsidiyen tozu ve %100 metakaolin ile üretilen, 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş harç numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları gösterilmektedir.

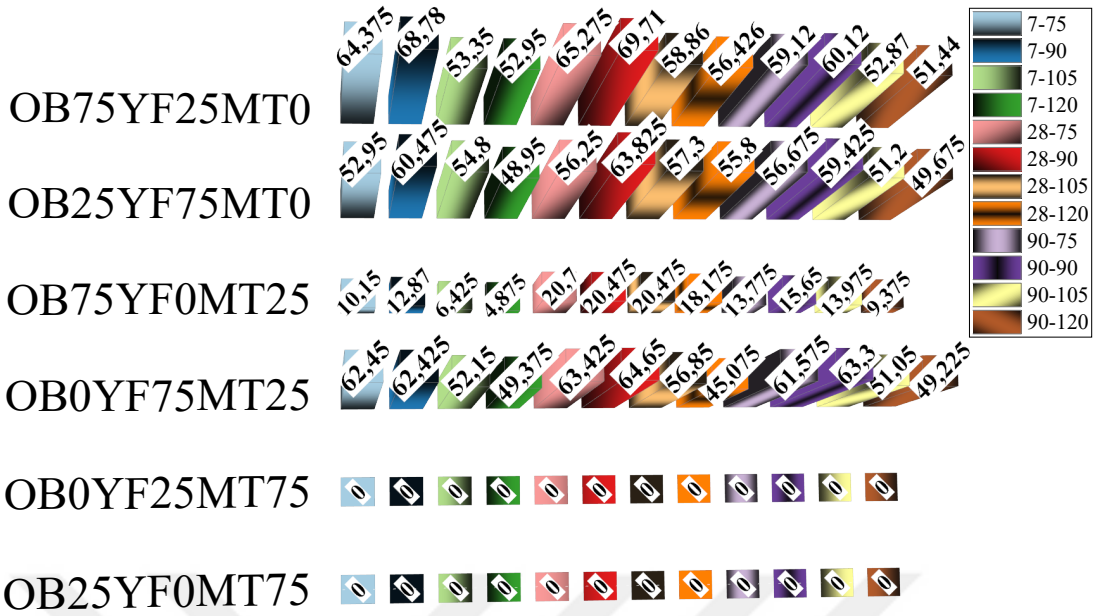
Şekil 46. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %100 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolinli geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 46 incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımları OB0YF100MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş 28 günlük numunelerde, en düşük basınç dayanımları ise OB0YF0MT100 serisinin tüm sıcaklık ve günlerinde elde edilmiştir. Kullanılan alkali aktivatör, metakaolinin ağırlıkça %25 ve üzeri ikame edildiği numuneleri aktive etmemiştir. Ağırlıkça %100 saf bağlayıcı içeren numunelerde en yüksek dayanım yüksek fırın cüruflu numunelerde elde edilmiştir. Rao ve Rao, 2015; uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak ürettikleri geopolimer harçların basınç dayanımlarına farklı alkali aktivatör ve kür şartlarının etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda

%100 yüksek fırın cürufu içeren, NaOH ve Na_2SiO_3 Na_2SiO_3/NaOH oranı 2,5 ve NaOH konsantrasyonu 12 molar olacak şekilde NaOH ve Na_2SiO_3 kullanarak aktive edilmiştir. 60 C° ve 24 saat boyunca kür ettikleri numunelerde 28 gün için 87 MPa basınç dayanımı değeri elde edilmiştir. Şekil 43'teki veriler, %100 yüksek fırın cürufu içeren numunelerin 90 C° kür sıcaklığı için 92,425 MPa olduğunu göstermektedir. Belirtilen çalışma ile yürütülen çalışma arasındaki yaklaşık %6'lık basınç dayanımı farkı kür sıcaklığı ve süresi, bağlayıcı/ince agrega oranlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın %100 saf malzemelerinden elde edilen basınç dayanımının literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 47'de ağırlıkça %75 yüksek fırın cürufu, obsidiyen ve metakaolin içeren geopolimer harçların basınç dayanımları verilmektedir. Şekil 44'te en yüksek basınç dayanımı OB0YF75MT25 serisi 105 C°'de kür edilmiş 28 günlük numunelerde 56,85 MPa olarak elde edilirken, en düşük dayanımlar ağırlıkça %25'ten daha fazla metakaolin içeren tüm numunelerden elde edilmiştir. Ancak OB75YF25MT0 serisi 75 C°'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük basınç dayanımı 64,38 MPa ve OB25YF75MT0 serisi 105 C°'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük basınç dayanımı 54,8 MPa olduğundan en yüksek değere yakındır. Alexander ve Shashikala, 2022; uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara yüksek fırın cürufu ikame ederek basınç dayanımlarına etkisini incelemiştir. %30 cüruf ikame ettiği harç numunelerden 7 günde yaklaşık 44,6 MPa, 28 günde ise 53,7 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Şekil 47'deki değerlerden OB75YF25MT0 numune serisinde tüm kür sıcaklıklarının ortalaması alındığında, 7 günde 59,9 MPa, 28 günde ise 62,6 MPa elde edilmiştir. Bu durumda, Alexander ve Shashikala, 2022; çalışmasındaki veriler ile mevcut veriler arasındaki 7 günlük yaklaşık %34,3 ve 28 günlük %16,6'lık farklar kullanılan aktivatör 12 molar NaOH ve Na_2SiO_3/NaOH oranı=2, geopolimer harç numunelerin şekli küp numuneler ve kullanılan malzeme karışımın %30 cüruf ve %70 uçucu kül olmasından kaynaklanmaktadır. Shi vd., 2022; uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara yüksek fırın cürufu ikamesinin mekanik dayanımlara etkisini araştırmışlardır. %25 cüruf ikame ettikleri numunelerde 7 günde yaklaşık 41,3 MPa, 28 günde ise 47,9 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Çalışma verileri gözönüne alındığında, OB75YF25MT0 numunelerinde 7 günde tüm sıcaklıklar için 59,9 MPa ve 28 günde 62,6 MPa olduğundan, Shi vd., 2022; elde ettiği verilerle 7 günde yaklaşık %45,0; 28

gün için ise %30,7'lik basınç dayanımı farkı oluşmaktadır. Ayrıca %75 cüruf ikame ettikleri numunelerinde, 7 günlük yaklaşık 78,3 MPa, 28 günde ise 80,4 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Şekil 47'de OB25YF75MT0 serisi numunelerin tüm kür sıcaklıkları için ortalama 7 günde 54,3 MPa, 28 günde ise 58,3 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu bağlamda, 7 gün için ortalama yaklaşık %30,6, 28 günde ise %37,9 dayanım farkı oluşmaktadır. Shi vd., 2022; çalışmalarında kür sıcaklığı olarak normal ortam şartlarını, alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3/NaOH=2 oranını ve uçucu kül tabanlı karışımlar tercih etmeleri basınç dayanımı farklarını açıklamaktadır. Ho vd., 2021; farklı agrega tiplerine bağlı olarak ürettikleri uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara yüksek fırın cürufu ve grafen oksit nano malzemesinin etkisini araştırmışlardır. LS80/20 olarak adlandırdıkları numune serisinde 7 günde 30,4 MPa ve 28 günde 47,5 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Bu doğrultuda, mevcut çalışma ile 7 günde %44,0; 28 günde ise %18,5 basınç dayanımı farkı oluşmuştur. Ho vd., 2021; elde ettikleri basınç dayanımı verileri ile mevcut çalışma arasında oluşan dayanım farkları, farklı kür şartları ki test gününe kadar numunelerini ortam şartlarında bekletmişlerdir, farklı karışım ki karışımları %80 uçucu kül ve %20 yüksek fırın cürufu muhteva etmektedir, NaOH+Na_2SiO_3 gibi farklı alkali aktivatör kullanılan deney şartlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca 7 gün için oluşan 28 günlük dayanımlara göre nispeten büyük olan dayanım farkları obsidiyen tozunun uçucu kül öncülüne göre erken dayanım kazanmasından dolayıdır.



Şekil 47. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %75 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 48'de ağırlıkça %50 yüksek fırın cürufu, obsidiyen ve metakaolin içeren geopolimer harçların basınç dayanımları verilmektedir. Şekil 48'de en yüksek basınç dayanımı OB50YF50MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş 7 günlük numunelerde 60,45 MPa olarak elde edilirken, en düşük dayanımlar ağırlıkça %25'ten daha fazla metakaolin içeren tüm numunelerden elde edilmiştir. Ancak OB50YF50MT0 serisi 75 C°'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük dayanımı 59,675 MPa ve OB50YF50MT0 serisi 75 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı 60,05 MPa olduğundan en yüksek değere oldukça yakındır. Rao ve Rao, 2015; yürüttükleri deneysel çalışmada uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara %50 yüksek fırın cürufu ikame ederek elde ettikleri 28 günlük basınç dayanımını 65 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 45'te 28 günlük 90 C°'de kür edilmiş numunelerin basınç dayanımının 60,05 MPa olduğu görülmektedir. Basınç dayanımları arasında oluşan yaklaşık %7,6'lık fark, kullanılan farklı öncül malzeme ki bu öncül uçucu küldür, farklı karışım oranları, farklı alkali aktivatör seçimi ($NaOH+Na_2SiO_3$) ve farklı kür sıcaklığı ve süresi (80 C°'de 24 saat) ile açıklanabilmektedir. Shi vd., 2022; uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara ikame ettikleri ağırlıkça %50 yüksek fırın cürufu ile 7 günde ortalama yaklaşık 57,7 MPa, 28 günde ise 63,1 MPa basınç dayanımı değerleri

elde etmişlerdir. Mevcut çalışma verileri ile arasında 7 gün için %1 ve 28 gün için %9,1'lik dayanım farkları oluşmuştur. Ancak bu dayanım farkları, farklı kür sıcaklığı ve süresi (80 C° ve 24 saat), farklı alkali aktivatör /bağlayıcı oranı (0,4) ve farklı alkali aktivatör seçimi (Na_2SiO_3/NaOH=2 ve NaOH) ile oluşması mümkündür. Çalışmalardan elde edilen veriler incelendiğinde çalışmanın verileri ile literatürde yer alan verilerin benzer olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 48. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %25 ve %50 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 46, Şekil 47 ve Şekil 48'de verilen basınç dayanımları incelendiğinde genel olarak 28 günlük dayanımların 7 ve 90 günlük dayanımlardan fazla değerlere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, OB100YF0MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş 28 günlük numunelerin basınç dayanımı 42,1 MPa, OB75YF25MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 69,71 MPa, OB50YF50MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 65,10 MPa, OB25YF75MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 63,83 MPa olduğu görülmektedir. Grafiklerden elde edilen verilerden, obsidiyenli geopolimer harç numunelere yüksek

fırın cürufu ikamesi basınç dayanımlarını bazı durumlarda artırdığı bazı durumlarda ise azalttığı görülmektedir.

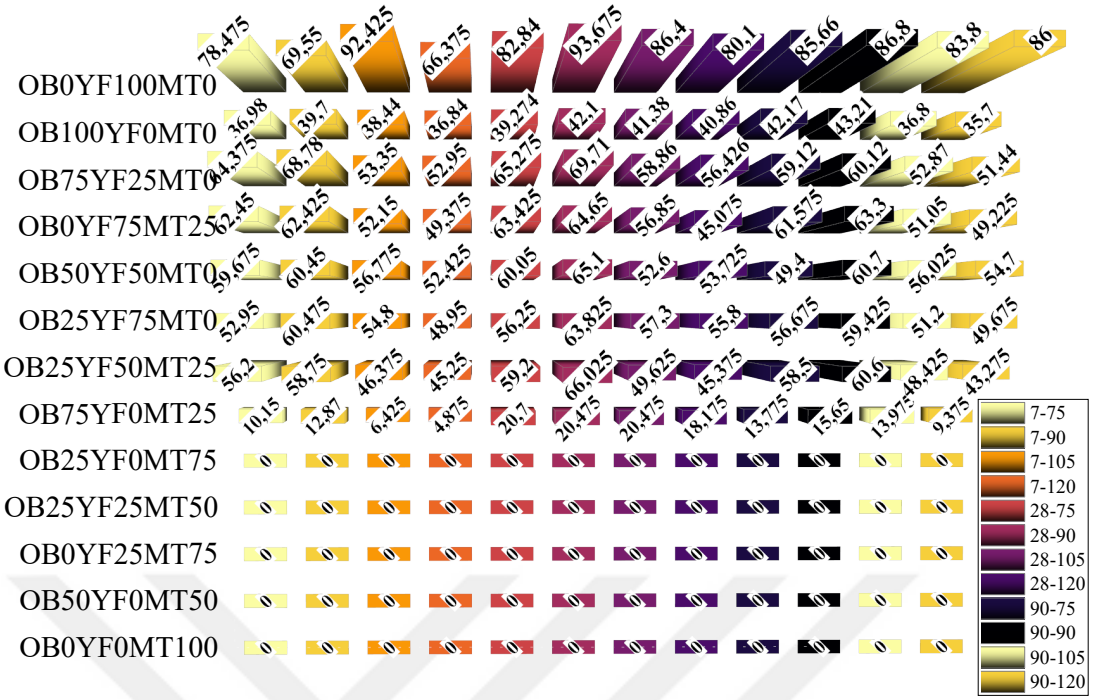
OB100YF0MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş, 28 günlük numunelerin basınç dayanımı 42,1 MPa, OB75YF0MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 20,48 MPa, OB50YF0MT50 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 0 MPa, OB25YF0MT75 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 0 MPa olduğu görülmektedir. Bahsedilen verilerden, obsidiyenli geopolimer harç numunelere metakaolin ikamesinin lineer olarak basınç dayanımlarını düşürdüğü anlaşılmaktadır.

OB0YF100MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş, 28 günlük numunelerin basınç dayanımı 93,675 MPa, OB0YF75MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 64,65 MPa, OB0YF50MT50 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 0 MPa, OB0YF25MT75 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 0 MPa olduğu görülmektedir. Bahsedilen verilerden, yüksek fırın cüruflu geopolimer harç numunelere metakaolin ikamesinin lineer olarak basınç dayanımlarını düşürdüğü anlaşılmaktadır.

OB75YF25MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş, 28 günlük numunelerin basınç dayanımı 69,71 MPa, OB75YF0MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 20.48 MPa, OB0YF75MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değeri 64,65 MPa olduğu görülmektedir. Bahsedilen verilerden, obsidiyen tozunun yüksek fırın cüruflu numuneler ile metakaolin tozunun ise yüksek fırın cüruflu numuneler ile basınç dayanımı açısından daha iyi çalıştığı çıkarımı yapılabilir.

Şekil 49'da 75, 90, 105 ve 120 C'de kür edilmiş geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri yer almaktadır. En yüksek basınç dayanımı OB0YF100MT0 serisi 105 C°'de kür edilmiş numunelerde 92,425 MPa, en düşük basınç dayanımı ise metakaolinin ağırlıkça %25'ten daha yüksek olduğu numunelerde 0 MPa olarak elde edilmiştir. Tüm seriler incelendiğinde, basınç dayanımlarının kür sıcaklıklarına göre farklı dağılımlar gösterdiği görülmektedir. Obsidiyenli numunelerin baskın olduğu serilerde (%100 ve %75) optimum kür sıcaklığı 75 ve 90

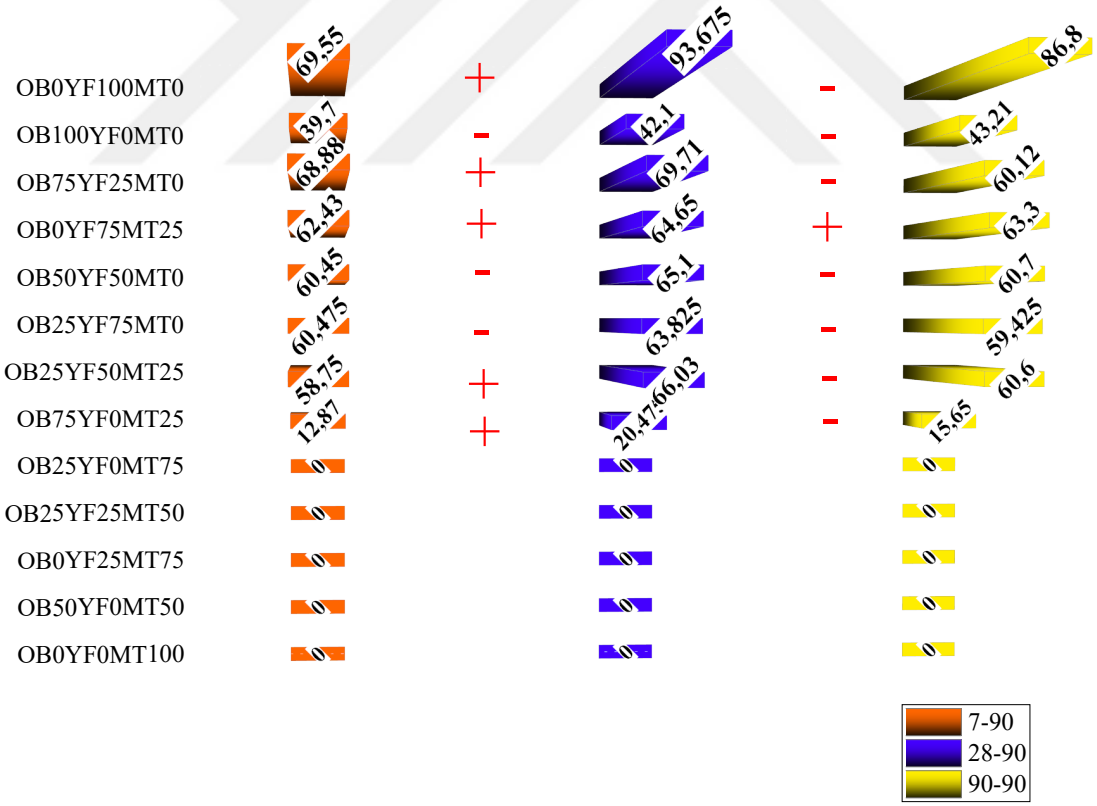
°C olurken, yüksek fırın cürufunun fazla olduğu serilerde ise (%100 ve %75) optimum kür sıcaklığı 75 ve 105 C° olmaktadır. Metakaolin için bazı dayanımlar elde edilemediğinden kür sıcaklığı için bir çıkarım yapılamamaktadır. Elyamany vd., 2018; uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silika dumanı kullanarak ürettikleri geopolimer harçlara kür sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Çalışmada 30, 60 ve 90 C°'de 48 saat boyunca kür edilen numuneler basınç testi gerçekleştirilinceye kadar ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Elde edilen sonuçlar, optimum kür sıcaklığının 90 C° olduğunu göstermektedir. Atiş vd., 2015; uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara kür sıcaklığı ve süresinin etkisini araştırmışlardır. Kür sıcaklığı 45 C°'den 110 C°'ye kadar 10 C°'lik artışlar ile yükseltilirken 40x40x160 mm'lik 216 adet prizmatik numuneler 24, 48 ve 72 saat boyunca kür edilmiştir. 72 saat kür edilmiş, Na oranı %12 olan numunelerde en büyük basınç dayanımı 95 C°'de kür edilmiş numunelerden elde edilmiştir. Kantarcı, Türkmen ve Ekinci, 2019; volkanik tüf tabanlı geopolimer harçlara kür sıcaklığı ve diğer parametrelerin etkisini ortaya çıkarmak için detaylı bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma sonucunda, 12 molar NaOH ve alkali/bağlayıcı oranı 0,45 olan numuneler için optimum kür sıcaklığının 90 C° olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 49 incelendiğinde, 7 ve 28 günlük dayanımlar için optimum kür sıcaklığının genel olarak 90 C°, 90 günlük dayanımlarda genel bir optimum sıcaklık eğilimi gözlemlenmemiştir.



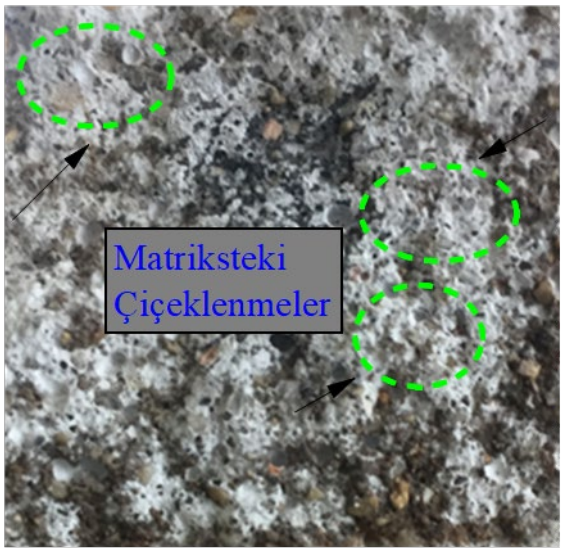
Şekil 49. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (Optimum Kür Sıcaklığı)

Şekil 50'de 90 C°'de kür edilmiş geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri yer almaktadır. Basınç dayanımlarının 7 günden 28 güne genel olarak arttığı, ancak 28 günden 90 güne genel olarak azaldığı görülmektedir. Karaaslan vd., 2022; ponza taşı tabanlı geopolimer harçlara kalsiyum alüminat çimentosu ve uçucu kül ikamesinin etkilerini incelemişlerdir. Yayınlarında elde ettikleri basınç dayanımı grafiklerinde, %30 kalsiyum alüminat çimentosu, %10 uçucu kül ve %30 kalsiyum alüminat çimentosu, %20 uçucu kül ve %20 kalsiyum alüminat çimentosu, %20 uçucu kül ve %30 kalsiyum alüminat çimentosu ve %30 uçucu kül ve %20 kalsiyum alüminat çimentosu ikame ettikleri numunelerde 28 günlük basınç dayanımının 90 günlük basınç dayanımından yüksek olduğu görülmektedir. Ek olarak, %20 ve %30 kalsiyum alüminat çimentosu içerikli karışımların basınç dayanımları 7 ila 90 gün arasında pek gelişmediği görülmektedir (Mobasheri vd., 2022). Ayrıca bu karışımların bazılarının basınç dayanımı 7 gün sonra azalmıştır. Bu durum sıcaklığın etkisiyle geopolimerizasyonun çoğunlukla 7 gün içinde tamamlanması ve kalsiyum alüminat çimentosunun çok reaktif olması

nedeniyle reaksiyonların kısa sürede tamamlanması ile açıklanabilir (Vafaei ve Allahverdi, 2016). Ayrıca, basınç dayanımındaki düşüş (90 günden 180 güne), çok az uçucu kül içeren veya hiç uçucu kül içermeyen numunelerde daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Pomza gibi doğal puzolanla zayıf reaktif olduğundan, alkali ortamda çok az çözünme gösterirler. Dolayısıyla bu şekilde sentezlenen geopolimer bağlayıcılarda, geopolimerizasyon tam olarak gerçekleşmediği için büyük miktarda serbest alkali bulunmaktadır. Bu alkalilerin bir kısmı ortamdaki nemin etkisiyle harç veya beton yüzeyine yükselir ve beyaz tortular oluşturur ki bu durum mevcut tez çalışmasında deney ekibi tarafından gözlemlenmiştir (Şekil 51). Bu durumda, doğal puzolan bazlı geopolimerlerin dayanımının zamanla bir miktar azalmasına neden olabilir (Firdous, Stephan ve Djobo, 2018; Djobo vd., 2017).



Şekil 50. 90 C°'de kür edilmiş, obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 51. Geopolimer Harç Numunelerde Ortaya Çıkan Beyaz Tortular

4.1.2. Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 52'de %100 obsidiyen tozu, %100 yüksek fırın cürufu ve %100 metakaolin ile üretilen, 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş harç numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları gösterilmektedir.

Şekil 52. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %100 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolinli geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

Şekil 52 incelendiğinde, en yüksek eğilme dayanımları OB100YF0MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş 28 günlük numunelerde 21,4 MPa olarak, en düşük basınç dayanımları ise OB0YF0MT100 serisinin tüm sıcaklık ve günlerinde 0 MPa olarak

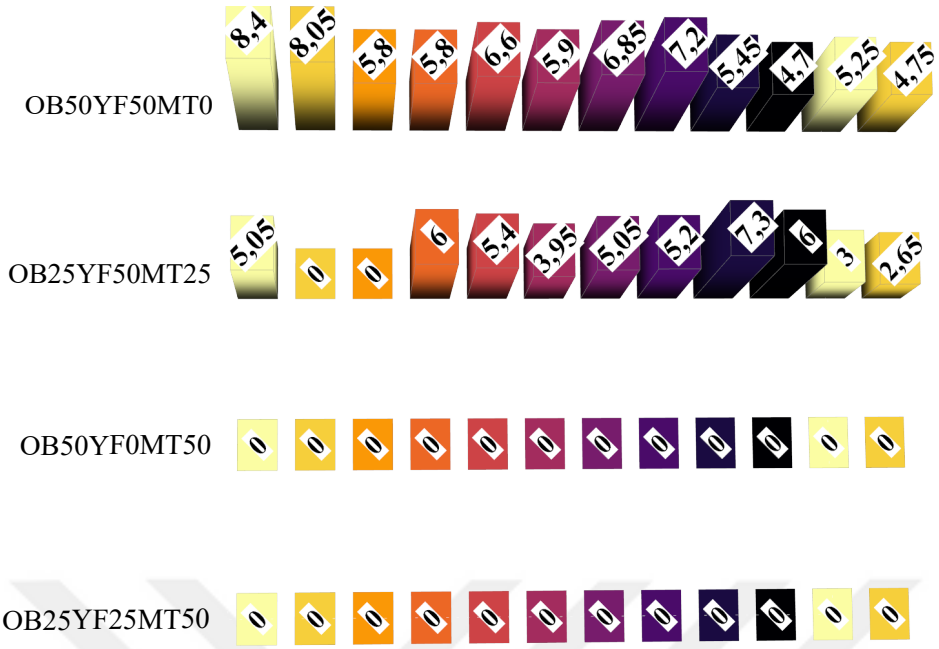
elde edilmiştir. Ağırlıkça %100 saf bağlayıcı içeren numunelerde en yüksek dayanım obsidiyen tozu ikame edilen numunelerden elde edilmiştir. Erfanimanesh ve Sharbatdar, 2020; aktive edilmiş zeolit ve yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimer pasta, harç ve betonların Portland çimentosu ile karşılaştırmasını yapmışlardır. %100 yüksek fırın cürufu kullandıkları (%10 Na_2CO_3) 28 günde 3,2 MPa eğilme dayanımı elde etmişlerdir. Mevcut çalışmada, tüm kür sıcaklıkları için 28 günde 11,36 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu bağlamda, iki veri arasında oluşan %71,8'lik fark, kullanılan alkali aktivatör, kür sıcaklığı ve süresi (24 saat boyunca ortam sıcaklığı olan 23 ±2 C°'de muhafaza edilmiştir) ve kullanılan kalıp boyutundan (100x100x500 vs 40x40x160) kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 53'te ağırlıkça %75 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların eğilme dayanımları verilmektedir. Şekil 53'te en yüksek eğilme dayanımı OB75YF0MT25 serisi 75 C°'de kür edilmiş 7 günlük numunelerde 11,7 MPa olarak elde edilirken, en düşük dayanımlar ağırlıkça %25'ten daha fazla metakaolin içeren tüm numunelerden elde edilmiştir. Ancak OB75YF25MT0 serisi 75 C°'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı 10.75 MPa ve OB75YF0MT25 serisi 75 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı 10,25 MPa olduğundan en yüksek değere oldukça yakındır. Shi vd., 2022; uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara yüksek fırın cürufu ikame ederek eğilme dayanımlarının değişimini incelemiştir. %75 cüruf ikame ettikleri numunelerde 7 günde yaklaşık 8,82 MPa, 28 günde ise 10,89 MPa eğilme dayanımı elde etmişlerdir. Çalışma verileri gözönüne alındığında, OB25YF75MT0 numunelerinde 7 günde tüm sıcaklıklar için ortalama 5,46 MPa ve 28 günde 7,16 MPa olduğundan, Shi vd., 2022; elde ettiği verilerle 7 günde yaklaşık %38,1; 28 gün için ise %34.3'lük eğilme dayanımı farkı oluşmuştur. Ayrıca %25 cüruf ikame ettikleri numunelerinde, 7 günlük yaklaşık 4,41 MPa, 28 günde ise 6,08 MPa eğilme dayanımı elde etmişlerdir. Şekil 50'de OB75YF25MT0 serisi numunelerin tüm kür sıcaklıkları için ortalama 7 günde 7,75 MPa, 28 günde ise 6,61 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu bağlamda, 7 gün için ortalama yaklaşık %75,73, 28 günde ise %8,7'lik dayanım farkı oluşmaktadır. Shi vd., 2022; çalışmalarında kür sıcaklığı olarak normal ortam şartlarını, alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3/NaOH=2 oranını ve uçucu kül tabanlı karışımlar tercih etmeleri eğilme dayanımı farklarını açıklamaktadır. Sinha ve Talukdar, 2021; ultra ince yüksek fırın

cürufu kullanarak ürettikleri geopolimer harçların priz ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. GM7 olarak adlandırdıkları %70 ultra ince yüksek fırın cürufu ve %30 uçucu kül, alkali/bağlayıcı oranı 0,6; 12 molar konsantrasyonlu NaOH kullandıkları numune serisinde 7 günde 4,99 MPa; 28 günde ise 5,69 MPa eğilme dayanımı elde ettiklerini bildirmişlerdir. Mevcut çalışmada, 7 günlük ortalama 5,46 MPa, 28 günde ise 7,16 MPa eğilme dayanımı elde edildiğinden yürütülen çalışmanın literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 53. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %75 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

Şekil 54'te ağırlıkça %50 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların eğilme dayanımları verilmektedir. Şekil 54'te en yüksek eğilme dayanımı OB50YF50MT0 serisi 75 C°'de kür edilmiş 7 günlük numunelerde 8,4 MPa olarak elde edilirken, en düşük dayanımlar ağırlıkça %25'ten daha fazla metakaolin içeren tüm numunelerden elde edilmiştir. Ancak OB50YF50MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 7 günlük dayanımı 8,05 MPa ve OB25YF50MT25 serisi 75 C°'de kür edilmiş numunelerin 90 günlük basınç dayanımı 7,3 MPa olduğundan en yüksek değere oldukça yakındır.



Şekil 54. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, %25 ve %50 obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7,28 ve 90 günlük eğilme dayanımları

Şekil 52, Şekil 53 ve Şekil 54'te verilen eğilme dayanımları incelendiğinde genel olarak 28 günlük dayanımların 7 ve 90 günlük dayanımlardan fazla değerlere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, OB0YF100MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı 9,9 MPa, OB25YF75MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı 8,7 MPa, OB50YF50MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 5,9 MPa, OB75YF25MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 5,6 MPa, OB100YF0MT0 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 21,4 MPa olduğu görülmektedir. Grafiklerden elde edilen verilerden, yüksek fırın cüruflu geopolimer harç numunelere obsidiyen ikamesi lineer olarak eğilme dayanımını düşürürken, saf obsidiyenli numunelerin eğilme dayanımı maksimum seviyeye ulaşmaktadır.

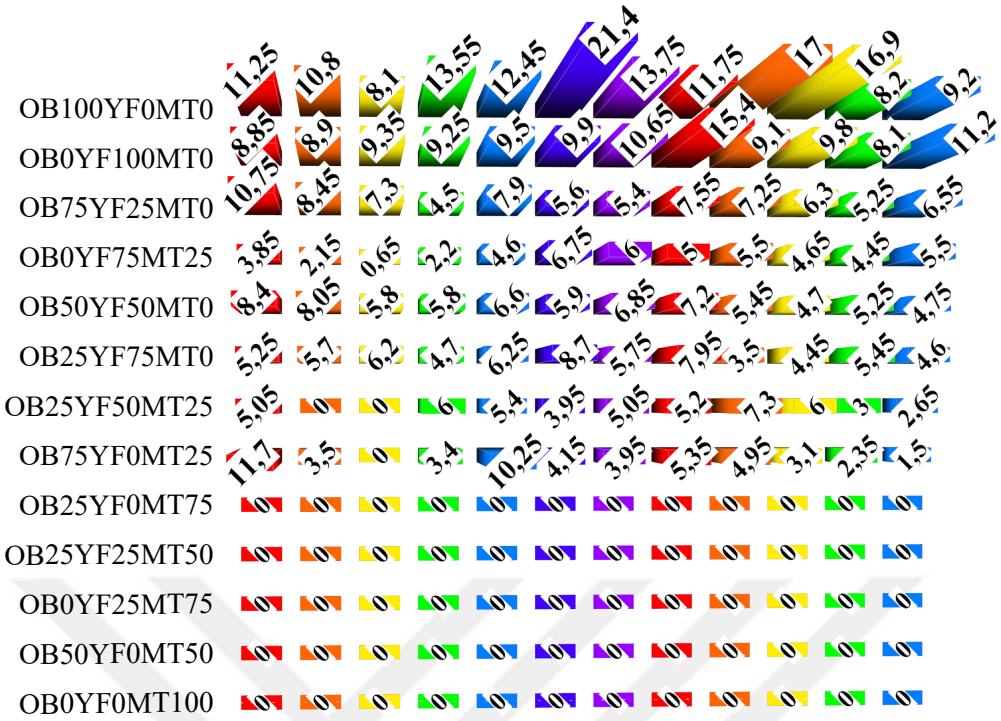
OB100YF0MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş, 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı 21,4 MPa, OB75YF0MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 4,15 MPa, OB50YF0MT50 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 0 MPa, OB25YF0MT75

numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 0 MPa olduğu görülmektedir. Bahsedilen verilerden, yüksek fırın cüruflu geopolimer harç numunelere metakaolin ikamesinin lineer olarak basınç dayanımlarını düşürdüğü anlaşılmaktadır.

OB0YF100MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş, 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı 9,9 MPa, OB0YF75MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 6,75 MPa, OB0YF50MT50 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 0 MPa, OB0YF25MT75 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 0 MPa olduğu görülmektedir. Bahsedilen verilerden, yüksek fırın cüruflu geopolimer harç numunelere metakaolin ikamesinin lineer olarak basınç dayanımlarını düşürdüğü anlaşılmaktadır.

OB75YF25MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş, 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı 5,6 MPa, OB75YF0MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 4,15 MPa, OB0YF75MT25 numune serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerin 28 günlük eğilme dayanımı değeri 6,75 MPa olduğu görülmektedir. Bahsedilen verilerden, obsidiyen tozu ve yüksek fırın cürufu ikame edilerek üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımının, obsidiyen tozu ve metakaolin ikame edilerek elde edilen numunelerin eğilme dayanımından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, yüksek fırın cürufu ve metakaolin ikame edilerek üretilen harçların eğilme dayanımının, obsidiyen tozu ve metakolin ikame edilerek üretilen numunelerin dayanımından daha yüksek olduğu elde edilmiştir.

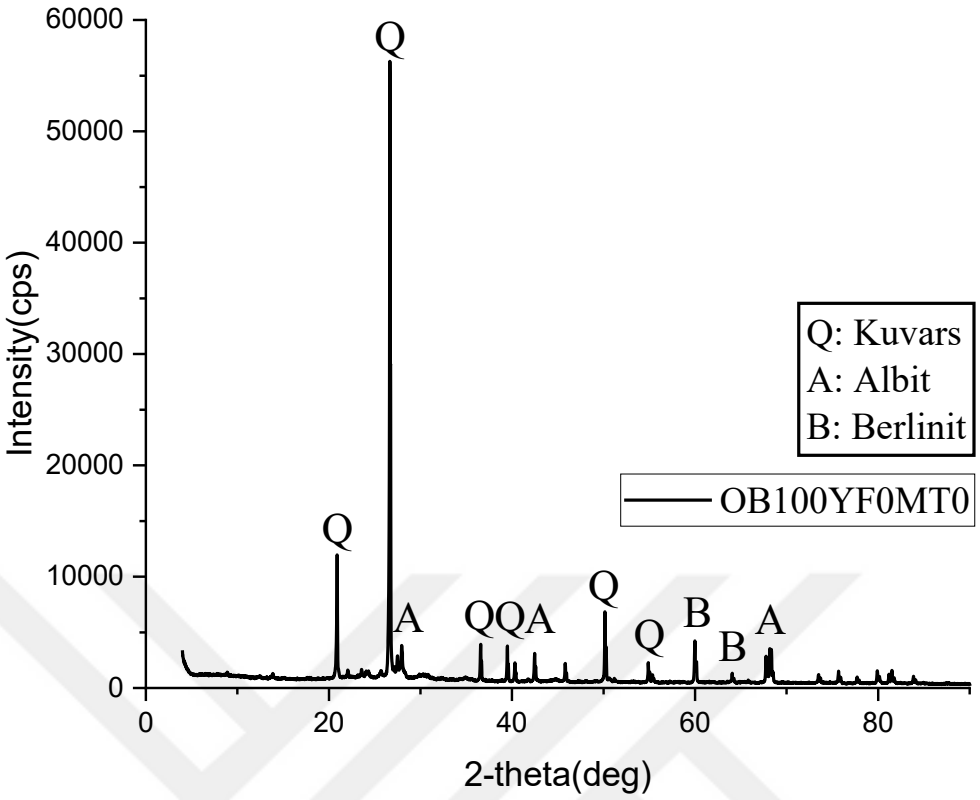
Şekil 55'te 75, 90, 105 ve 120 C'de kür edilmiş geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerlerine yer verilmektedir. En yüksek eğilme dayanımı OB100YF0MT0 serisi 90 C°'de kür edilmiş numunelerde 21,4 MPa, en düşük eğilme dayanımı ise metakaolinin ağırlıkça %25'ten daha yüksek olduğu numunelerde 0 MPa olarak elde edilmiştir. Tüm seriler incelendiğinde, eğilme dayanımlarının kür sıcaklıklarına göre oldukça farklı dağılımlar gösterdiği görülmektedir. Bu bağlamda, optimum bir sıcaklık için çıkarım yapılamamaktadır.



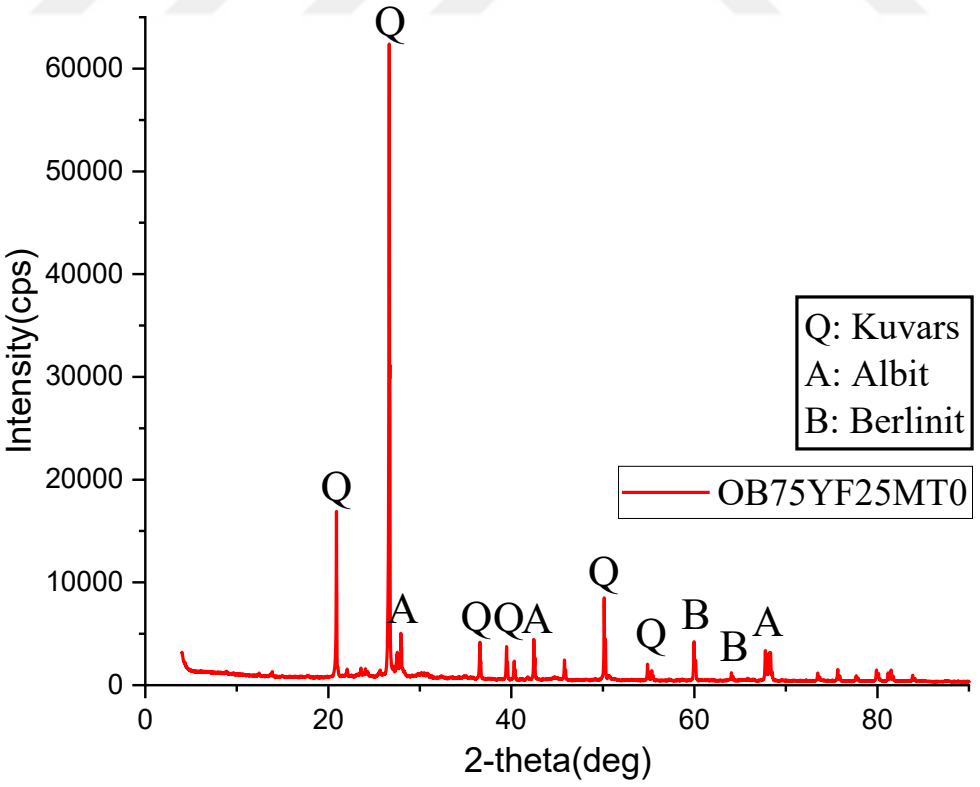
Şekil 55. 75, 90, 105 ve 120 C°'de kür edilmiş, obsidiyen, yüksek fırın cürufu ve metakaolin içeren geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları (Optimum Kür Sıcaklığı)

4.1.3. Geopolimer Harçların XRD Analizi Değerlendirmesi

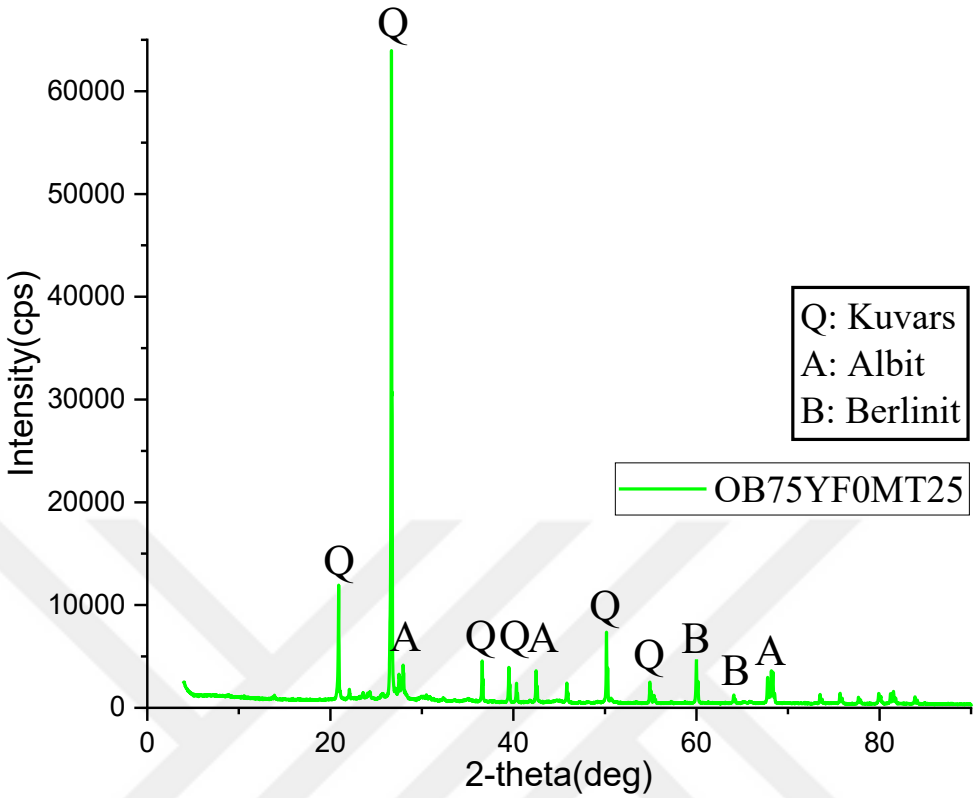
X-Ray difraktometrik toz yöntemi (XRD), geopolimer harçların malzeme karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi amacıyla 5 farklı numune için, monokromatik dalga boyu λCu-K-beta olan PW1830 model cihaz ile 4°–90° 2Θ° açı aralığında otomatik veri tabanı ile toz numuneler taranmıştır. Farklı tipte harç karışımlarını temsil eden XRD grafikleri Şekil 56-60' ta gösterilmektedir. XRD analizinde karışımlar arasında karşılaştırma yapmak için aynı molar konsantrasyon ve kürleme sıcaklığında 28 günde parçalanan 5 farklı karışım (OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB100YF0MT0, OB50YF50MT0 ve OB75YF0MT25) seçilmiştir. Geopolimer harcın mineralojik bileşimini temsil eden ana reaksiyon fazları Qualx programı (Bouaissi vd., 2019; Aziz vd., 2020) kullanılarak tanımlanmıştır.



Şekil 56. OB100YF0MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği

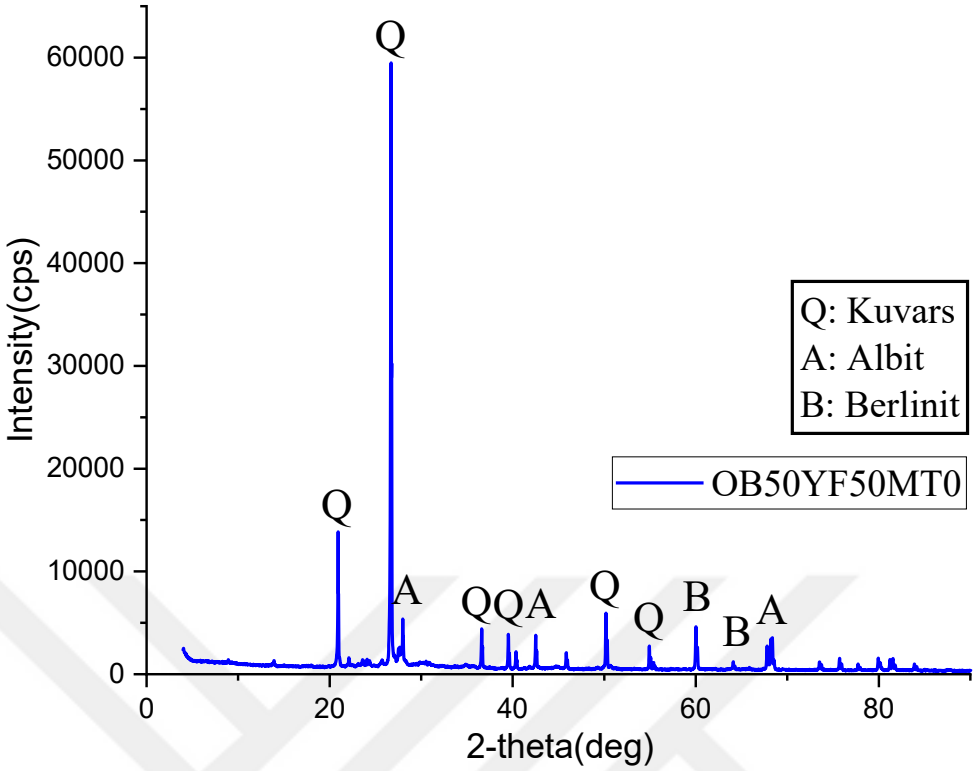


Şekil 57. OB75YF25MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği



Şekil 58. OB75YF0MT25 harç numunesine ait XRD Grafiği

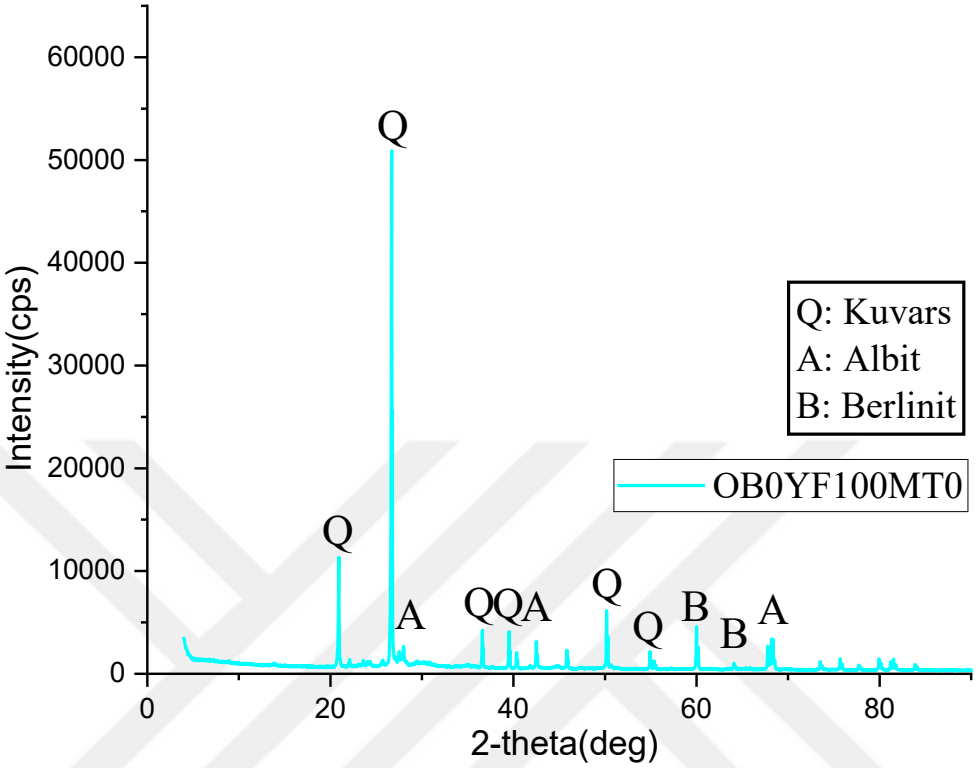
Grafiklerde görülen pikler, yani geopolimer harçlar için reaksiyon fazları kuvars (20,88; 26,66; 36,58; 39,55 ve 54,90 2Θ), albit (27,94; 42,48 ve 68,52 2Θ) ve berlinit (60,16 ve 64,06 2Θ) olmuştur. Alkali tipte kimyasal kullanılarak aktive edilen geopolimer harçlar halkalı öğütücü ile toz hale getirilmiş, bu toz numunelerden çizdirilen XRD desenlerinde 25-35 2Θ derece arasında görünen pikler, C-S-H, C-A-H ve N-A-S-H gibi amorf jellerin varlığına işaret etmektedir. Ayrıca, desenlerde ortaya çıkan kuvars ve berlinit pikleri, harçlara eklenen malzemelerin geopolimerizasyon işleminde mekanik özelliklerini iyileştiren hidratasyon ürünlerinin varlığına ve birbirleriyle oluşan iyi seviyedeki kimyasal reaktiviteyi göstermektedir (Hossein vd., 2023; Tian vd., 2022).



Şekil 59. OB50YF50MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği

Geopolimer reaksiyon sürecinde MgO içeriği fazla olan yüksek fırın cürufu benzeri malzemeler içeren kompozitlerde fazla miktarda C-(A)-S-H jeli oluştuğu ve bu jelin daha kompakt bir yapıya neden olduğu bilinmektedir (Jiang vd., 2023). Seçilen 5 farklı geopolimer harçlar farklı ağırlık ve kombinasyona sahip malzemelerden oluşmasına rağmen XRD deseninde ortaya çıkan fazlarda çok büyük miktarda farklılık oluşmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 60'tan, basınç dayanımı en yüksek olan OB0YF100MT0 karışımında yoğunluk 50890 iken, basınç dayanımı en düşük olan OB75YF25MT0 örneğinde yoğunluk (a.u.) 63944'tür. Ayrıca %100 cüruf ve obsidiyen karışımlarında albit fazının piklerinin azaldığı, yani kristal fazların görece amorflaştığı ve bunun da mekanik özellikleri yansıttığı açık bir durumdur (Kurt, Ustabas ve Cakmak, 2023; Mahmoodi vd., 2021; Ranjbar vd., 2014; Uysal vd., 2022; Nyale vd., 2013). Karışımlarda oluşan atomik yapı amorflaştıkça pik yoğunluğunun azaldığı, yani oluşan fazın geopolimerasyonda tüketilerek daha düşük yoğunluğa sahip olduğu ve bu karışımların ise daha iyi mekanik özellikler gösterdiği görülmektedir (Chithambaram, Kumar ve Prasad, 2019). Karışımlarda elde edilen fazların diğer

çalışmalarda elde edilen fazlara benzer olduğu görülmüştür (Mashri vd., 2023; Uysal vd., 2022; Nguyen vd., 2017).



Şekil 60. OB0YF100MT0 harç numunesine ait XRD Grafiği

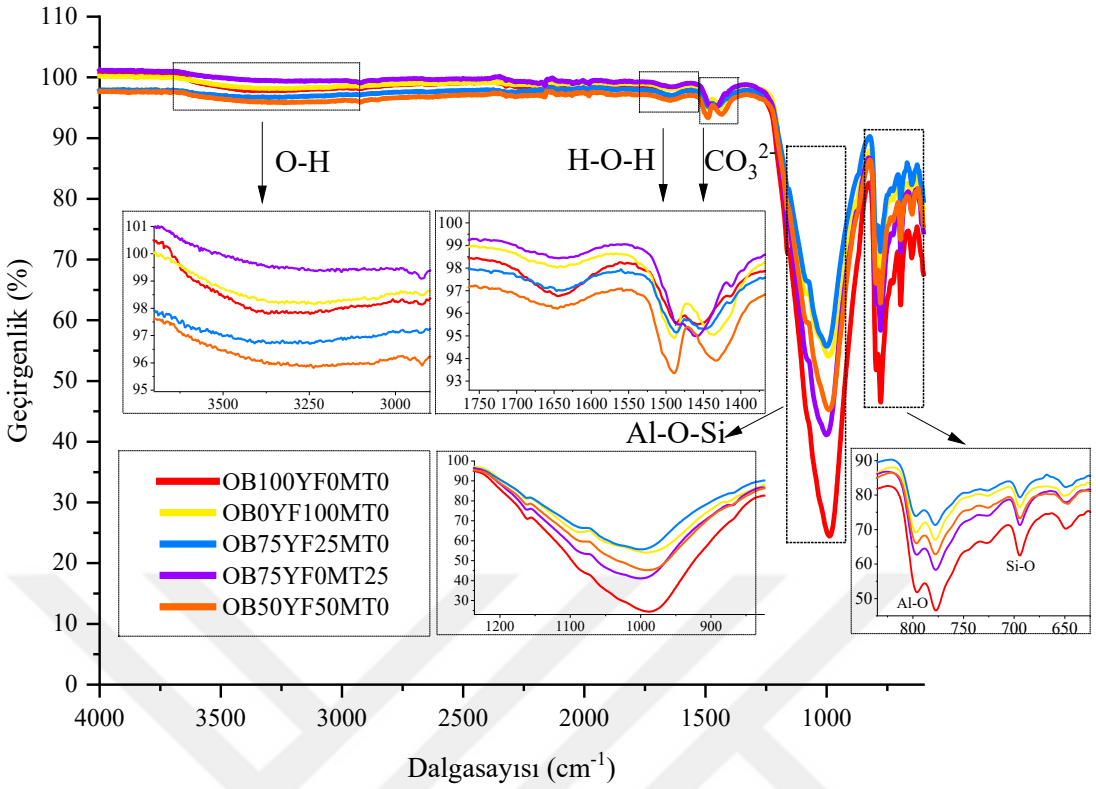
4.1.4. Geopolimer Harçların FTIR Analizi Değerlendirmesi

FTIR spektrumu, üretilen malzemelerde oluşan kimyasal bağların (genellikle Si-O ve Al-O) ve reaksiyon ürünlerinin değişimlerinin anlaşılmasını ve karakterize edilmesini sağlayan ve birçok mühendislik ve temel bilimlerden kullanılan etkili bir yöntemdir. Üretilen 5 farklı geopolimer harçların (OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB100YF0MT0, OB50GGBS50MT0 ve OB75GGBS0MT25) FTIR spektrumları Şekil 61'de gösterilmektedir. Çeşitli geçirgenlik frekansları incelendiğinde, geopolimerizasyon boyunca farklılıklar meydana gelmiştir. Geopolimer harçların üretimi sırasında oluşan kimyasal bağları temsil eden çeşitli bantlar karakterize edilmiştir. ~2900-3700 cm^{-1}'deki bantlar, O-H'nin gerilme titreşiminin olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, adsorbe edilmiş su molekülleri için -OH gerilme titreşimleri ile ilişkilendirilebilmektedir (Lin vd., 2017; Zhao vd., 2023; Derakhshani, Ghadi ve Vahdat, 2023). Geopolimer harçlar için ~1647 cm^{-1}'de saptanabilen bant,

alüminosilikat ağları dahil etmek için tipik olan eğilme titreşimlerine (H-O-H) karşılık gelir (Anchieata vd., 2014). Bu durum, geopolimerik yapının gözenekli ağda yapısal ve hapsolmuş suya sahip olduğunu göstermektedir (Nath ve Kumar, 2013). ~988-1006 cm^{-1}'deki bantlar, Si-O-T (T=Si veya Al) bağının (asimetrik titreşim) geopolimer matrisin ana parmak izini (main fingerprint) göstermektedir. Üstelik bu aralıktaki dalga boyları, hidrasyon yoluyla C–S–H jellerinin oluşumuyla ilişkili Si-O-T'nin asimetrik gerilme titreşim tepe noktalarıdır (Bakharev, 2005; Criado, Palomo ve Fernández-Jiménez, 2005).

Harç numunelerinin dalga boylarındaki azalma, OB75YF25MT0 ve OB75YF0MT25 arasında meydana gelen düşük dalga boyu farkı ile açıklanabilen SiO_4 ve AlO_4 tetrahedron dönüşümü ile temsil edilebilir. Tablo 8'deki kimyasal içerikler incelendiğinde, MT diğer toz malzemelere göre daha fazla Al_2O_3 içeriğine sahiptir. Ayrıca, numunelerin yüksek dalga boyu, onların saf ve yüksek silika jel fazını gösterir (Yu vd., 1999).

Pik yoğunluk değerleri, Si-O-T bağ ürünlerinin içeriğini ölçmek için kullanılır ve artan pik yoğunluğu C–S–H jellerinin oluşumunun teşvik edildiğini gösterir ki bu da mekanik dayanımlara yansıyacak C–S–H tipi fazların oluşumunu desteklediğini kanıtlar (Zhang vd., 2023). Yapıda oluşan C–S–H jel ürünleri ve C-A-S-H jelleri, ana bant aralığında daha yüksek dalga sayılarına kaymasının bir göstergesidir ki, bu da C–S–H jellerinin kristalleşmesini desteklediğini göstermektedir. Bandın dalga boyunun artması, geopolimer harçların jelleşme malzemesinin kademeli olarak Al açısından zengin bir jel fazından Si açısından zengin bir jel fazına değiştiğini ifade eder (Zhang vd., 2023).~ 797 cm^{-1}'deki bantlar, Al-O'nun gerilme titreşimine karşılık gelir. Bu bant, Al'ın kimyasal hidrasyon reaksiyonunda, altı koordinasyondan diğer koordinasyona dönüşeceğini açıklamaktadır (Deng, Yang ve Pan, 2023).

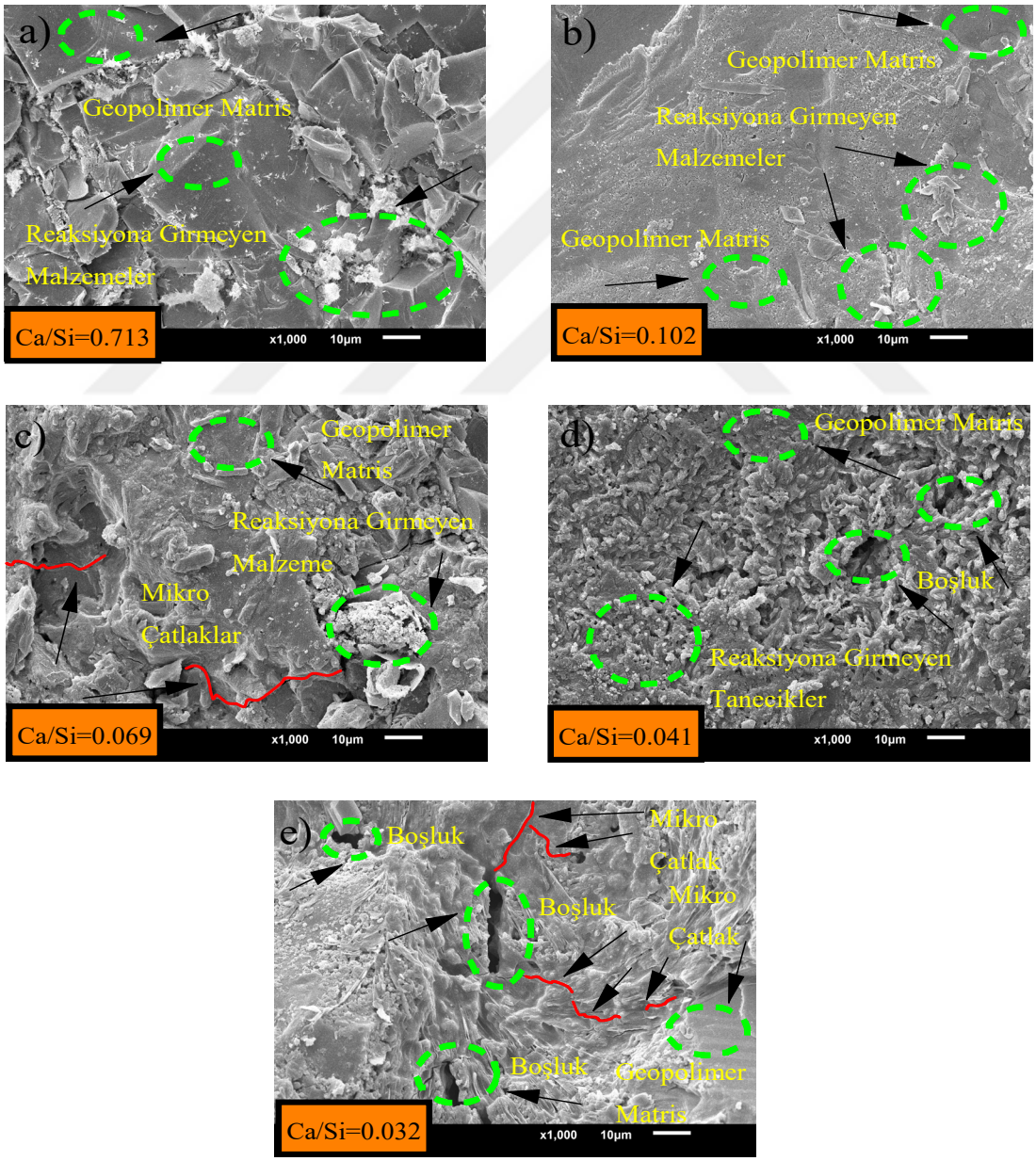


Şekil 61. 5 farklı geopolimer harç numunesi için FTIR spektrumu (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) (Kurt, Ustabas ve Cakmak, 2023)

4.1.5. Geopolimer Harçların SEM ve EDS Analizi Değerlendirmesi

Mikroyapılarındaki farklılıkları incelemek için yüksek mekanik özelliklere sahip 5 farklı harç karışım (OB0YF100MT0, OB100YF0MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) için çekilen SEM görüntüleri Şekil 62'de verilmektedir. Ayrıca numunelerin elemental bileşimleri herhangi bir nokta taranarak alınmıştır. Herhangi bir numunenin ana elementleri (Si, Al, Ca ve O gibi) farklı dağılım göstermiştir. Kullanılan malzemelerde farklılık olmazken, kullanılan malzemelerin ağırlıkları birbirinden farklıdır. EDS analizi, geopolimer matrisinin esas olarak OB ve YF parçacıkları (Si, Al ve Ca içeriğinden) içerdiğini gösterir (Liu vd., 2018). Karışımlardaki farklı mikroyapılar, farklı yoğunluklara sahip matrisleri gösterir (Örneğin, cüruf miktarı arttıkça daha yoğun bir yapı gözlenir). Karışımda artan cüruf oranı, Si–O–Al malzemelerinin süzülmesine yol açarak, yoğun bir yapıya sahip tekdüze ve sürekli olarak dağılmış C-(A)-S-H jeli üretildiğini göstermektedir (Ulugöl, 2021).

EDS ve XRF analizlerinde numunelerde cüruf miktarı arttıkça Ca miktarının da arttığı gözlenmiştir. Geopolimer matristeki Ca miktarının artması, CASH jelinin artmasını sağlar. Artan CASH jeli, boşluksuz bir yapı oluşturarak mekanik özellikleri iyileştirir (Al- Majidi vd., 2016). Literatürde C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin bir arada bulunmasının, farklı fazlar ve reaksiyona girmemiş partiküller arasındaki boşlukları kapatarak mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinmektedir. Geniş yüzey alanına sahip metakaolin gibi bağlayıcı malzemeler işlenebilirliği azalttığında mikro çatlaklara ve hava boşluklarına neden olurlar (Yip, Lukey ve Van Deventer, 2005; Tekin, 2016).

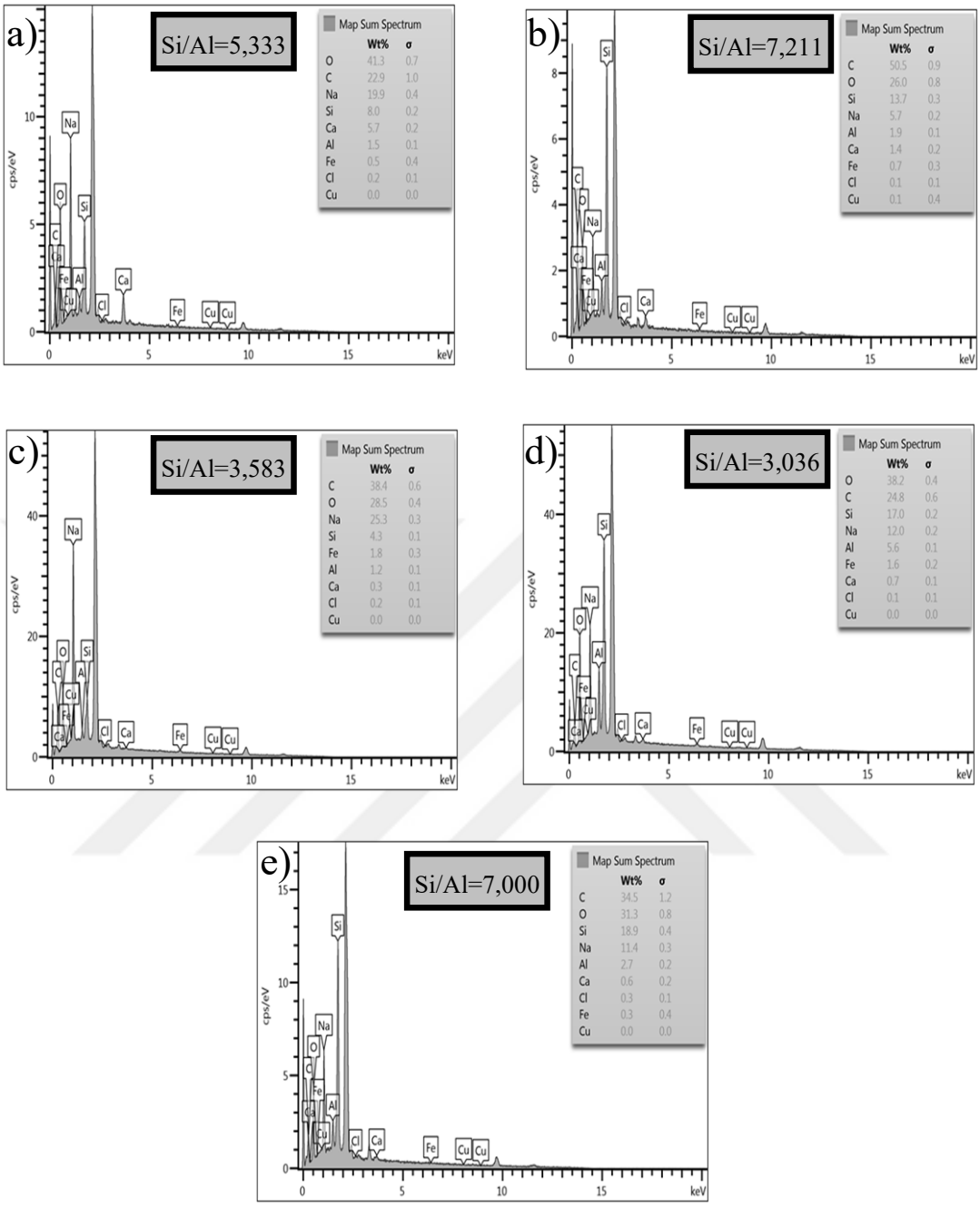


Şekil 62. 5 farklı geopolimer karışımın x1000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Ca/Si Oranları [217]

Şekil 62 incelendiğinde, en kompakt ve boşluksuz yapıya sahip numunenin OB0YF100MT0 numunesi (a) olduğu görülmektedir. Boşluk oranının, mikro ve makro çatlakların ve reaksiyona girmemiş partikül oranının en yüksek olduğu numunenin OB75YF0MT25 numunesi (e) olduğu görülmüştür. Ayrıca Ca/Si oranı da çalışmalarda mekanik özelliklerin bir göstergesi olarak kullanılabilmektedir (Ma ve Wu, 2022). EDS analizinden elde edilen Ca/Si oranı, a görüntüsünden e görüntüsüne sırasıyla 0,713, 0,102, 0,069, 0,041 ve 0,032'dir. Harç numunelerindeki yüksek Ca/Al oranı, geopolimer matris yapılarda yüksek kalsiyumlu C, N-A-S-H jel oluşumuna yol açmaktadır (Ma ve Wu, 2022). Basınç dayanımı arttıkça Ca/Si oranının arttığı görülmektedir. Ömür vd., 2023; farklı oranlardaki Na_2O içeriğinin, yüksek fırın cürufu yerine %30 oranında ferrokrom külü ikame ettikleri geopolimer karışımlarda yarattığı mekanik ve mikro yapısal değişiklikleri incelemişlerdir. Sonuç olarak, Ca/Si oranı 1,46 ± 0,05 olan P0-N10 numunesinde 71,1 ± 1,2 MPa basınç dayanımı elde ederken, Ca/Si oranı 0,59 ± 0,05 olan P30-N6 numunesinde 2,2 ± 0,6 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Verdikleri basınç dayanımı değerlerinde Ca/Si oranı ile basınç dayanımı arasında genel olarak bir regresyon oluştuğu görülmektedir. Kim ve Khalid, 2022; uçucu kül yerine kalsiyum alüminat çimentosu (CAC) ikame ettikleri geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada kalsiyum alüminat çimentosu ikame oranı %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 ve kullanılan alkali aktivatör NaOH ve su camı karışımıdır. Çalışma sonuçları göstermiştir ki Ca/Si oranı sırasıyla 0,08; 0,14; 0,22; 0,43 olan numunelerde basınç dayanımı yaklaşık 5-25 MPa arasında değişirken, Ca/Si oranı 0,57 olan numunede basınç dayanımı Ca/Si oranı 0.43 olan numuneye göre düşmüştür. Çalışma verileri Ca/Si oranı ile basınç dayanımı arasında genel olarak nonlineer bir regresyon olduğunu göstermektedir. Derinpınar, Karakoç ve Özcan, 2022; cürufa ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında ikame ettikleri cam tozu ile ürettikleri 5 farklı geopolimer karışımların basınç dayanımını ve mikro yapılarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda elde ettikleri bulgular göstermiştir ki Ca/Si oranı arttıkça basınç dayanımı

artmaktadır. İki değişken arasında elde ettikleri regresyonun R^2 değeri 0,94 olduğundan çalışma verileri oldukça güvenilirdir. Belirtilen makalelerdeki çalışmaların bulguları tez kapsamında elde edilen Ca/Si oranlarının literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

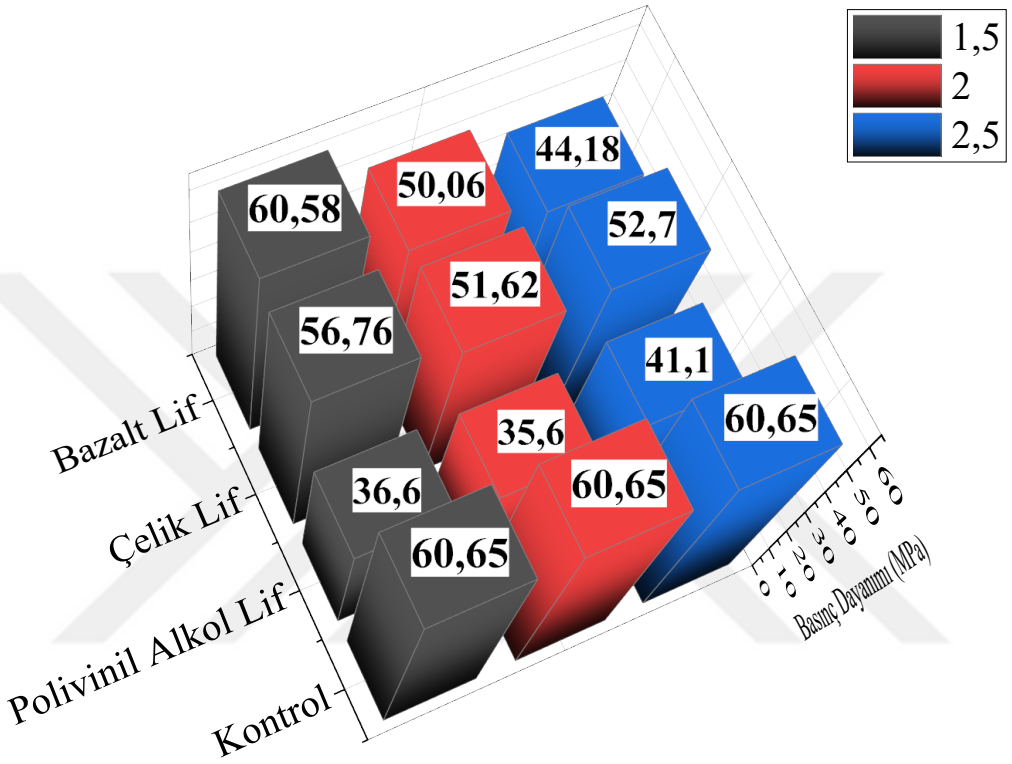
EDS analizi sonucunda numunelerde maksimum Si/Al oranı 7,211 olarak OB75YF25MT0 numunesinden elde edilirken, minimum Si/Al oranı 3,036 olarak OB100YF0MT0 numunesinde görülmüştür. You vd., 2023; alkali aktive soda kireci ve cam tozu ile yüksek fırın cürufu kullanarak geopolimer karışımlar üretmişlerdir. Ürettikleri geopolimer karışımları NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive etmişlerdir. Si/Al oranı 2,60 olan BFS100 karışımı kırıldığında basınç dayanımı değeri yaklaşık 55 MPa iken, Si/Al oranı 31,22 olan SLGP100 karışımında ise 10 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Arada yer alan diğer değerler Si/Al oranı ile basınç dayanımının ters orantılı olduğunu göstermektedir. Javed, Shaikh ve Sarker, 2022; lityum cürufu, uçucu kül ve uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimer pastaların mekanik ve mikro yapı özelliklerini araştırmışlardır. Si/Al oranı 2,5 olan 100LS0FA numunesinde 5,83 MPa basınç dayanımı elde ederken, Si/Al oranı 5,5 olan 0LS100FA numunesinde 21,58 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Elde ettikleri diğer veriler ile birlikte, Si/Al oranı ile basınç dayanımı arasında doğru bir orantı olduğu çıkarımı yapılabilmektedir. Choeycharoen, Sornlar ve Wannagon, 2022; linyit ve bitümlü kömür yakıtlı taban külleri kullanarak farklı katı/sıvı oranları altında (75:25, 70:30, 65:35 ve 60:40) ürettikleri geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikro yapı çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Si/Al oranı 1,39-2,95 arasında değişirken basınç dayanımları incelendiğinde Si/Al oranı ile basınç dayanımı arasında herhangi bir doğru veya ters orantı ilişkisine rastlanmamıştır. Literatür verileri incelendiğinde, Si/Al oranı ile basınç dayanımı arasında doğru orantı, ters orantı ve herhangi bir orantı olmadığını gösteren çalışmalar mevcuttur. Şekil 63'te gösterilen mevcut çalışma verileri incelendiğinde, Choeycharoen, Sornlar ve Wannagon, 2022' nin çalışmasında olduğu gibi Si/Al oranları ile basınç dayanımı arasında herhangi bir orantı ilişkisi bulunmamıştır.



Şekil 63. 5 farklı geopolimer karışımın elemental spektroskopileri: a) OBYF100MT0, b) OB75YF25MT0, c) OB50YF50MT0, d) OB100YF0MT0 ve e) OB75YF0MT25 ve Si/Al Oranları

4.1.6. Lifli Geopolimer Harçların Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 64'te %100 obsidiyen tozuna bağlayıcı ağırlığının %1,5; %2 ve %2,5'u kadar bazalt, çelik ve polivinil alkol lif ikame edilerek üretilen lifli geopolimer harçların basınç dayanımı verilmektedir.



Şekil 64. %100 obsidiyen tozu ve %100 obsidiyen tozuna %1,5; %2 ve %2,5 oranında bazalt, çelik ve polivinil alkol lif ikame edilmiş geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları

Guo ve Pan, 2018; uçucu kül ve çelik cürufu ile üretikleri geopolimer harçlara farklı lif ikamesinin mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Ağırlıkça yaklaşık %1.2, %1.9 ve %2.5 oranında bazalt lif ekledikleri harçların basınç dayanımını 28 gün için sırasıyla yaklaşık 36; 38 ve 40,3 MPa olarak elde etmişlerdir. Ayrıca kontrol numunesinin basınç dayanımı 33 MPa'dır. Bu durumda, bazalt lif kullanımı kontrol numunesinin basınç dayanımını %1.2 oranı için yaklaşık %9,1; %1,9 oranı için %15,2 ve %2,5 oranı için %22,1 oranında iyileştirmiştir. Mevcut çalışma sonuçlarında, kontrol numunesinin basınç dayanımı Guo ve Pan, 2018' in çalışmasındaki kontrol

grubunun dayanımından %83,8 daha yüksektir. Ancak bazalt lif kullanımı ağırlıkça %2,5 oranı için kontrol numunesinin basınç dayanımını %27,2 azaltmıştır. Kullanılan taban malzemeleri farklı olduğundan dolayı farklı sonuçlar elde edilmiştir. Güler ve Akbulut, 2022; uçucu kül ile ürettikleri geopolimer harçlara bazalt lif ikamesinin etkilerini incelemişlerdir. Kontrol grubunun basınç dayanımı testi sonucunda 61,69 MPa dayanım elde edilirken tez çalışmasının geopolimer lifli harçların kontrol grubunda 60,65 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Kullanılan öncül bağlayıcı, alkali aktivatör (Na_2SiO_3 ilavesi) farklı olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır. Çalışmada, hacimce %1 bazalt lif ikameli geopolimer harçlarda, basınç dayanımı 62,57 MPa olarak elde edilirken bazalt lif ikamesi kontrol grubunun basınç dayanımını %1,4 gibi küçük bir oranda iyileştirmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen ağırlıkça %1,5 bazalt lif ikameli numunelerin basınç deneyi sonucunda 60,58 MPa basınç dayanımı elde edilirken, sonuç olarak basınç dayanımları hemen hemen değişmemiştir. Ağırlıkça %1,5 oranından fazla bazalt lif ikameli durumlarda basınç dayanımının oldukça düştüğü görüldüğünden, optimum lif oranının %1,5 olduğu çıkarımı yapılabilir.

Bellum, 2022; uçucu kül ve cüruf ikame ettiği geopolimer harçlara çelik lif ikamesinin mekanik özelliklere etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, elde edilen kontrol numunesinin basınç dayanımı 54,3 MPa olduğundan, mevcut obsidiyen tozu kullanılan çalışmada elde edilen 60.65 MPa basınç dayanımına benzerdir. Bellum, 2022; %1,5; %2 ve %2,5 çelik lif ikame ettiği numunelerde sırası ile 57,7 MPa; 59,64 MPa ve 61,5 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Bu değerler dikkate alındığında %1,5; %2 ve %2,5 çelik lif ikamesinin kontrol grubunun basınç dayanımını sırasıyla %6,2; %9,8 ve %13,3 oranında iyileştirdiği görülmektedir. Ancak, çalışma verileri dikkate alındığında, %1,5; %2 ve %2,5 çelik lif ikamesi kontrol grubunun basınç dayanımını sırasıyla %6,4; %17,5 ve %27,2 oranında azalttığı görülmektedir. Çalışma sonuçlarının farklılığının, kullanılan bağlayıcı malzeme, alkali aktivatör, kum/bağlayıcı oranının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

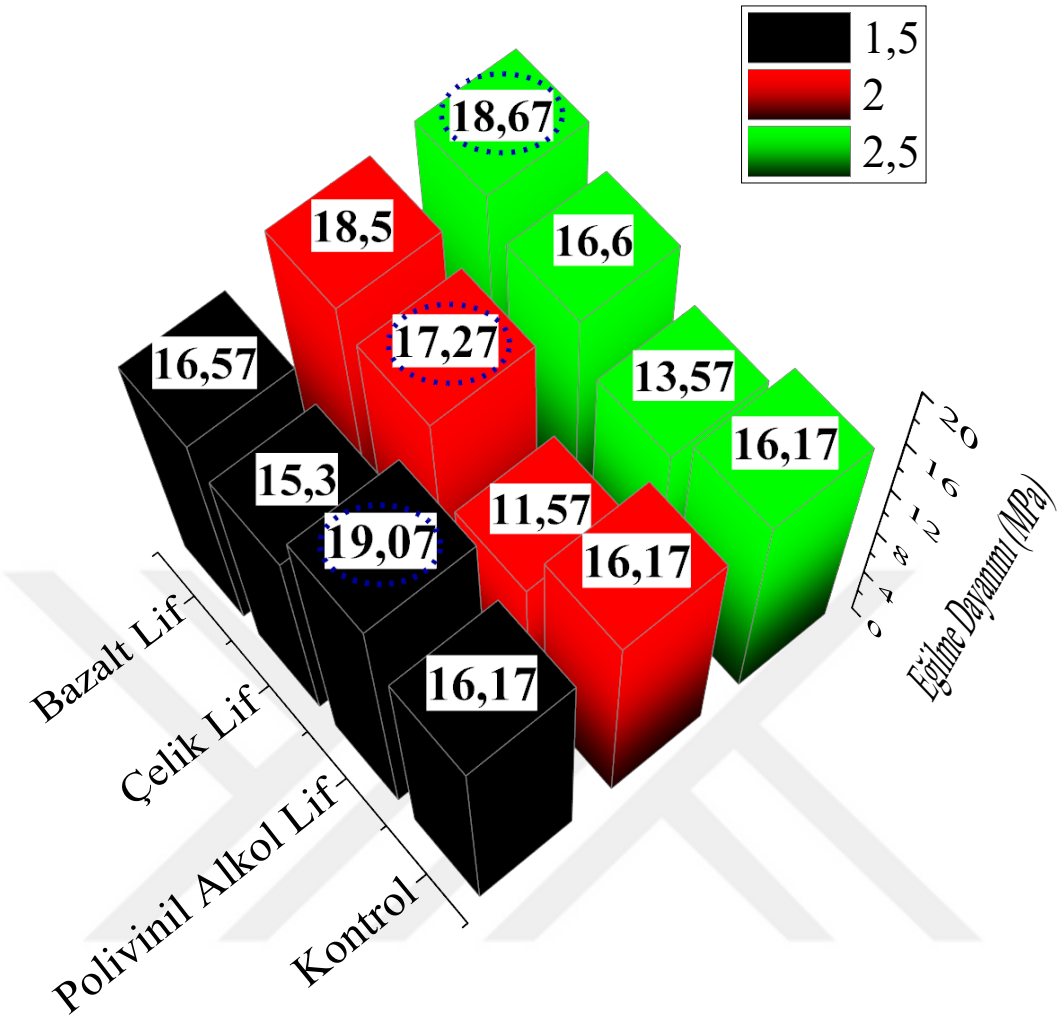
Deng vd., 2022; uçucu kül ve cüruf ikame ederek ürettikleri geopolimer harçlara polivinil alkol lif ikamesinin etkilerini incelemişlerdir. Ürettikleri numunelerde lif ikamesini hacim cinsinden yaptıklarından, F105 kodlu numunede hacimce %1,05 oranında lif kullandıklarını ifade etmişlerdir. Gerekli dönüşüm

yapıldığında, lif ikamesinin %0,925 civarında olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı sonuçlarına göre % 0,925'lik polivinil alkol lif ikamesinin kontrol grubunun basınç dayanımını yaklaşık olarak %27,65 oranında düşürdüğünü ifade etmektedirler. Mevcut çalışmada %1,5 oranında polivinil alkol lif ikamesi kontrol numunesinin basınç dayanımını %39,7 düşürdüğü görülmektedir. Çalışmalar arasında bağlayıcı türü, kullanılan aktivatör türü, kum/bağlayıcı oranları farklı olmasına rağmen mevcut çalışmanın verilerinin literatür ile benzerlik gösterdiği görülmektedir.

4.1.7. Lifli Geopolimer Harçların Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 65'te %100 obsidiyen tozuna bağlayıcı ağırlığının %1,5; %2 ve %2,5'u kadar bazalt, çelik ve polivinil alkol lif ikame edilerek üretilen lifli geopolimer harçların eğilme dayanımı verilmektedir.

Güler ve Akbulut, 2022; hibrit cam (GL) ve bazalt (BA) elyaf katkılı uçucu kül (FA) esaslı geopolimer çimento (GPC) harçlarının yüksek sıcaklık etkisi altında işlenebilirlik, kütle kaybı, basınç ve eğilme mukavemeti özelliklerini araştırmışlardır. Kontrol numunesinin eğilme dayanımını 12,71 MPa olarak elde etmişlerdir. Mevcut çalışmada %100 obsidiyen tozu elde edilerek üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımı 16,17 MPa olduğundan, Güler ve Akbulut, 2022' nin çalışmasından %27,2 daha fazladır. Güler ve Akbulut, 2022 çalışmasında, hacimce %1 bazalt lifi ikame ettikleri numunelerinde eğilme dayanımını 15,53 MPa olarak elde etmişlerdir. Veriler incelendiğinde, bazalt lif ikamesi kontrol numunesinin eğilme dayanımını yaklaşık %22,2 oranında iyileştirmiştir. Şekil 65 incelendiğinde, ağırlıkça %1,5, %2 ve %2,5'luk bazalt lif ikamesi kontrol numunesinin eğilme dayanımını sırası ile yaklaşık %2,5; %14,4 ve %15,4 oranında iyileştirmiştir. Bazalt lif ikamesinin iyileştirme oranlarının çalışmalar arasında kullanılan bağlayıcı, alkali aktivatör, lif ikame oranları farklı olmasına rağmen benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 65. %100 obsidiyen tozu ve %100 obsidiyen tozuna %1,5; %2 ve %2,5 oranında bazalt, çelik ve polivinil alkol lif ikame edilmiş geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları

Bellum, 2022; uçucu kül ve cüruf ile ürettiği geopolimer harçlarda kontrol numunesi için eğilme dayanımını 7,7 MPa olarak elde etmiştir. Bu bağlamda, çalışmadaki kontrol numunesinin eğilme dayanımı Bellum, 2022' nin elde ettiği değerden %110 daha fazladır. Ağırlıkça %1,5; %2 ve %2,5 oranlarında çelik lifi ikamesinin geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımını kontrol numunesine göre sırasıyla %20,1, %37,4 ve %57,8 oranında iyileştirdiği anlaşılmaktadır ki eğilme dayanımları sırası ile 9,25; 10,58 ve 12,15 'tir. Mevcut çalışmada ise çelik lif ikamesi

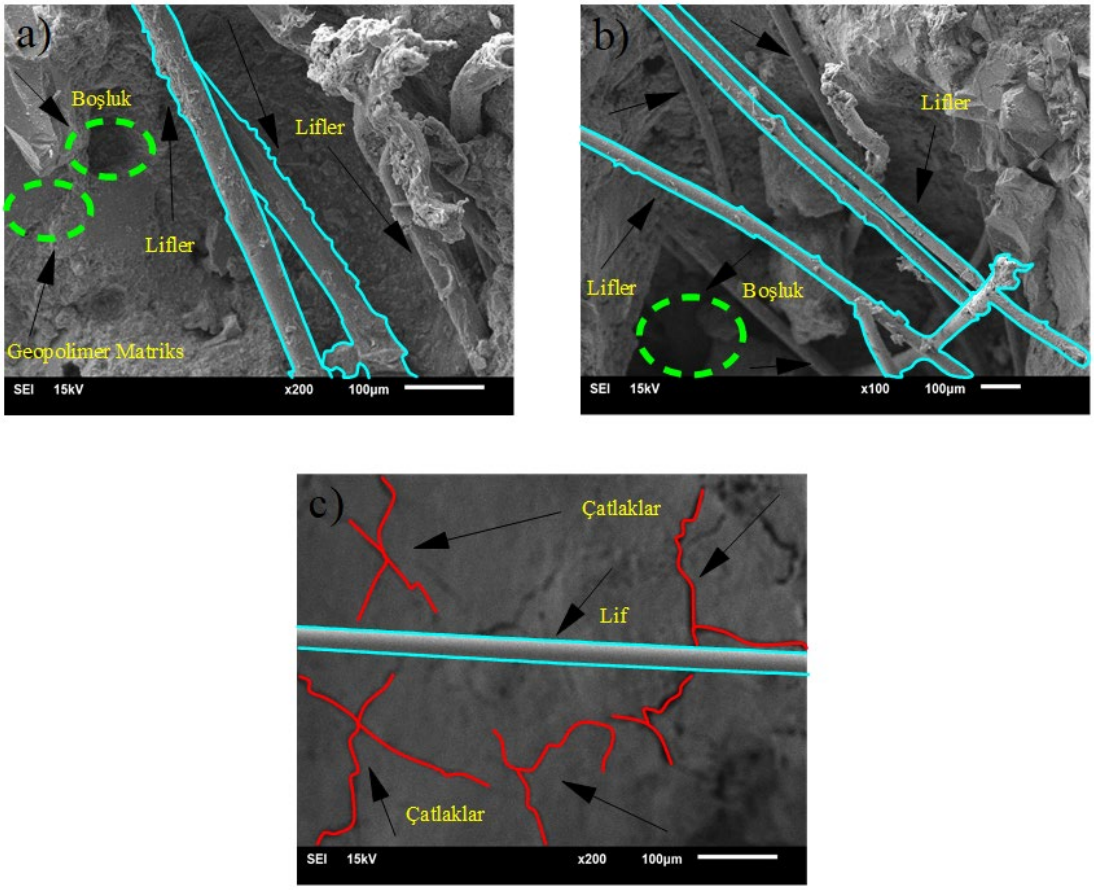
eğilme dayanımlarını %1,5 oranı için, %5,7 düşürürken, %2 için %6,8 ve %2,5 oranı için %2,7 artırdığı görülmektedir.

Deng vd., 2022; atık istiridye kabuğu ikame ederek elde ettikleri geopolimer harçlara polivinil alkol lifin eğilme dayanımına etkisini araştırmışlardır. F105 kodlu numunelerinde ağırlıkça %0,925'lik polivinil alkol lif ikamesinin harç numunelerin eğilme dayanımını %42,31 artırdığını ifade etmişlerdir. Şekil 62'deki eğilme değerlerine göre, ağırlıkça %1,5; %2 ve %2,5 oranında ikame edilen polivinil alkol lifler kontrol numunesinin eğilme dayanımını %1,5 oranı için %17,9 artırırken, %2 ve %2,5 oranı için sırasıyla %39,8 ve %19,2 oranında azaltmıştır.

Literatür verileri incelendiğinde, çalışma ile bir miktar farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar kullanılan bağlayıcı malzeme, alkali aktivatör, karışım miktarları, kum/bağlayıcı oranı gibi değişkenlere bağlı olduğu kadar obsidiyen tozu malzemesinin kendi yapısında bulunan eğilme kapasitesine de bağlı olduğu düşünülmektedir. Örneğin, çalışmalarda lif ikamesiz kontrol gruplarının eğilme dayanımı 7,7 ve 12,71 MPa iken çalışmada bulunan kontrol grubunun eğilme dayanımının 16,17 MPa olması sebebiyle malzeme lifsiz olarak ta eğilme performansı diğer bağlayıcı malzemelerden oldukça fazladır.

4.1.8. Lifli Geopolimer Harçların SEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Şekil 66'da lifli yapıların ve liflerin dağılımının daha detaylı incelenebilmesi için farklı yakınlaştırma oranlarına sahip SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerde geopolimer matris, boşluk yapısı ve liflerin dağılımı görülmektedir.



Şekil 66. Geopolimer Harçlarda Lif Dağılımı için SEM görüntüleri: (a) Polivinil Alkol Lif-1,5 x200, b) Polivinil Alkol Lif-1,5 x100 ve c) Çelik Lif-2 x200

Şekil 66 incelendiğinde, çelik lif kullanılan geopolimer harçların yapısının mikro çatlaklara sahip olsa da daha kompakt bir jel yapısına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 66 a) ve b) görüntülerinde polivinil alkol kullanılması boşluklu bir yapıya sebep olmuş, bu durum basınç ve eğilme dayanımlarına yansımıştır (Aljanabi vd., 2022). Görüldüğü üzere, lifler ve matris arasında iyi bir aderans oluşmuştur. Lifler, geopolimerizasyon reaksiyonu sürecinde oluşan geopolimerizasyon ürünleri ile kaplanarak lifler ve matris arasındaki bağı geliştirmiştir (Ling vd., 2019; Kadhim vd., 2022).

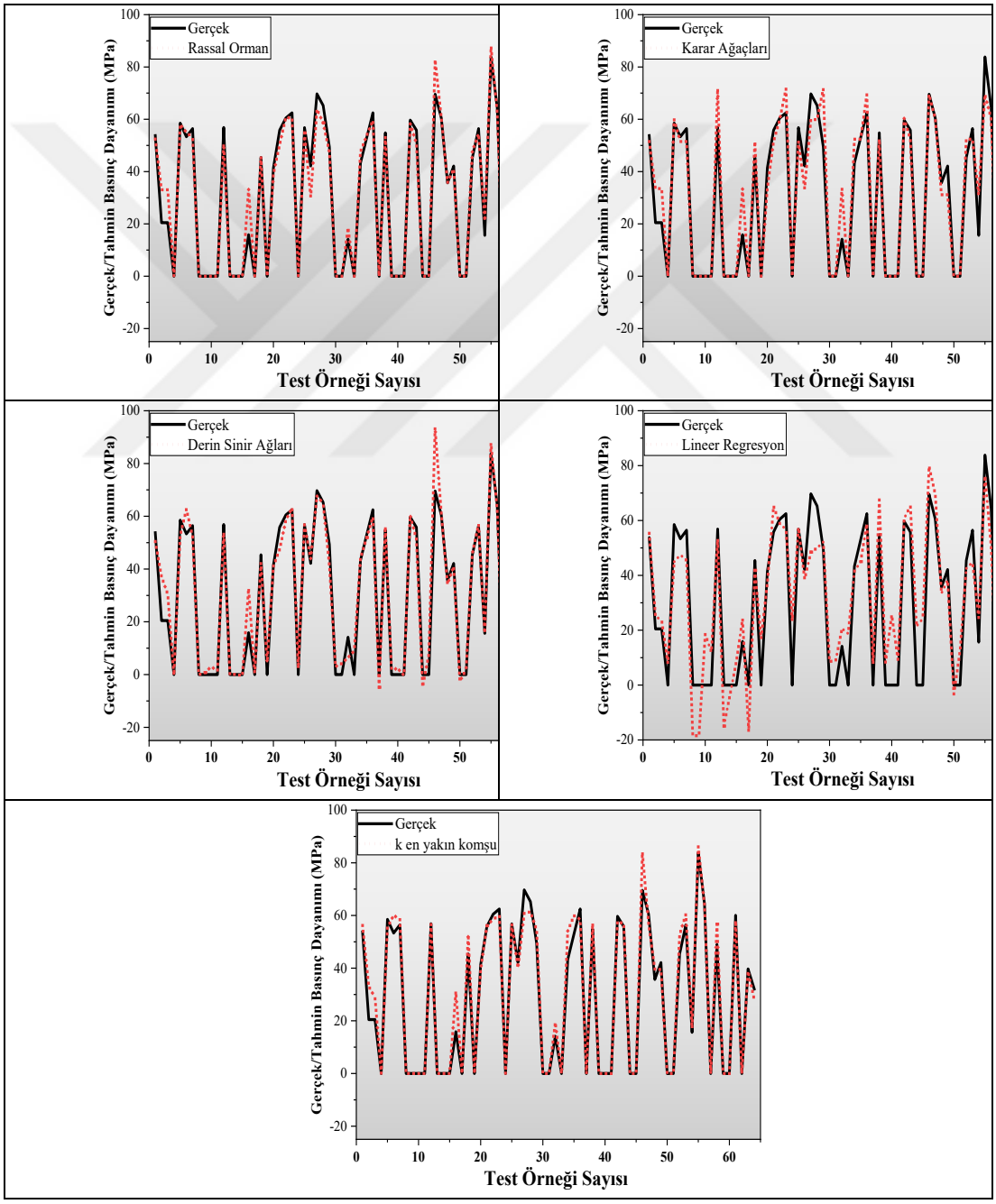
4.1.9. Geopolimer Harçların Yapay Zeka Algoritmaları ile Tahmin Değerlendirmesi (Basınç ve Eğilme Dayanımı)

Algoritmalar arasında rastgele orman algoritması 12,481 MSE; 3,532 RMSE; 2,107 MAE ve 0,983 R^2 ile en iyi performansı göstermiştir. En kötü performans ise 125,687 MSE; 11,211 RMSE; 9,079 MAE ve 0,83 R^2 ile tahmin edilen doğrusal regresyon modelinde görülmüştür. Her iki algoritma arasında MSE'de yaklaşık 10 kat ve RMSE'de 4 kat fark olduğu gösterilmiştir. R^2'leri arasında da yaklaşık %18'lik bir fark vardır.

Şekil 67'de verilen veriler Rastgele Orman, Karar Ağacı, kNN algoritmalarının deneysel gerçek basınç dayanımlarını iyi tahmin ettiğini göstermiştir. Ancak Derin Sinir Ağı ve Doğrusal Regresyon diğer algoritmalara kıyasla nispeten büyük standart sapmalara sahip olduğundan, gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Genel olarak, doğrusal regresyona dayalı algoritmaların performansı, mukavemet ve karışım malzemeleri arasında doğrusal bir ilişki olmadığı için diğerlerine kıyasla nispeten zayıf kalmıştır. Grafik veriler, ortalama 60-65 MPa dayanımın üzerindeki değerlerin iyi tahmin edilemediğini göstermektedir. Bununla birlikte, gerçek değerler ile tahmin değerleri arasında en iyi örtüşmeye sahip algoritmanın Rastgele Orman, en kötü örtüşmeye sahip algoritmanın ise Lineer Regresyon olduğu anlaşılmaktadır.

Makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılan dayanım tahminlerinde genellikle performans ölçütü R^2 katsayısı olmaktadır. Literatürde bazı araştırmacılar tarafından makine öğrenmesi algoritmaları ile dayanım dayanım tahminleri gerçekleştirilmiştir. Li ve diğerleri (Li vd., 2022) 137 farklı çalışmadan elde edilen verileri kullanarak uçucu kül esaslı jeopolimer beton ile donatı arasındaki nihai bağ dayanımını tahmin etmeye çalışmışlardır. Çalışmada kullandıkları rastgele orman algoritmasının R^2 değerini 0,98 olarak elde etmişlerdir. Amin vd., 2022; jeopolimer betonlara ait 481 basınç dayanımı verisini farklı algoritmalarla tahmin etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar en iyi tahmin performansının rastgele orman algoritması olduğunu göstermiştir (R^2= 0,952). Amin vd., 2022; basınç dayanımını tahmin ettikleri diğer çalışmalarında uçucu kül esaslı geopolimer betonların basınç dayanımları üzerindeki en önemli bileşenin cüruf olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca en iyi performans gösteren algoritmanın 0,939 R^2 değeri ile rastgele orman olduğunu bulmuşlardır. Nguyen vd., 2023; uçucu kül bazlı

geopolimer betonların basınç dayanımı değerlerini farklı algoritmalarla (XGBoost, Random Forest, Decision Tree) tahmin etmişlerdir. Çalışmalarında gerçekleştirdikleri özellik önem analizinin sonuçları, karışıma eklenen malzemenin basınç dayanımına diğer kriterlerden daha fazla katkıda bulunduğunu göstermiştir (en önemli bileşen uçucu küldür). Dolayısıyla, özellik önemine dayalı analiz ve literatürdeki önceki çalışmalar, makine öğrenimi algoritmalarının basınç dayanımı tahmininde tutarlı sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 67'de basınç dayanımlarının gerçek ve tahmin değerleri gösterilmektedir.



Şekil 67. Farklı Algoritmalara Dayalı Basınç Dayanımlarının Gerçek Verileri ve Tahmin Edilen Değerleri

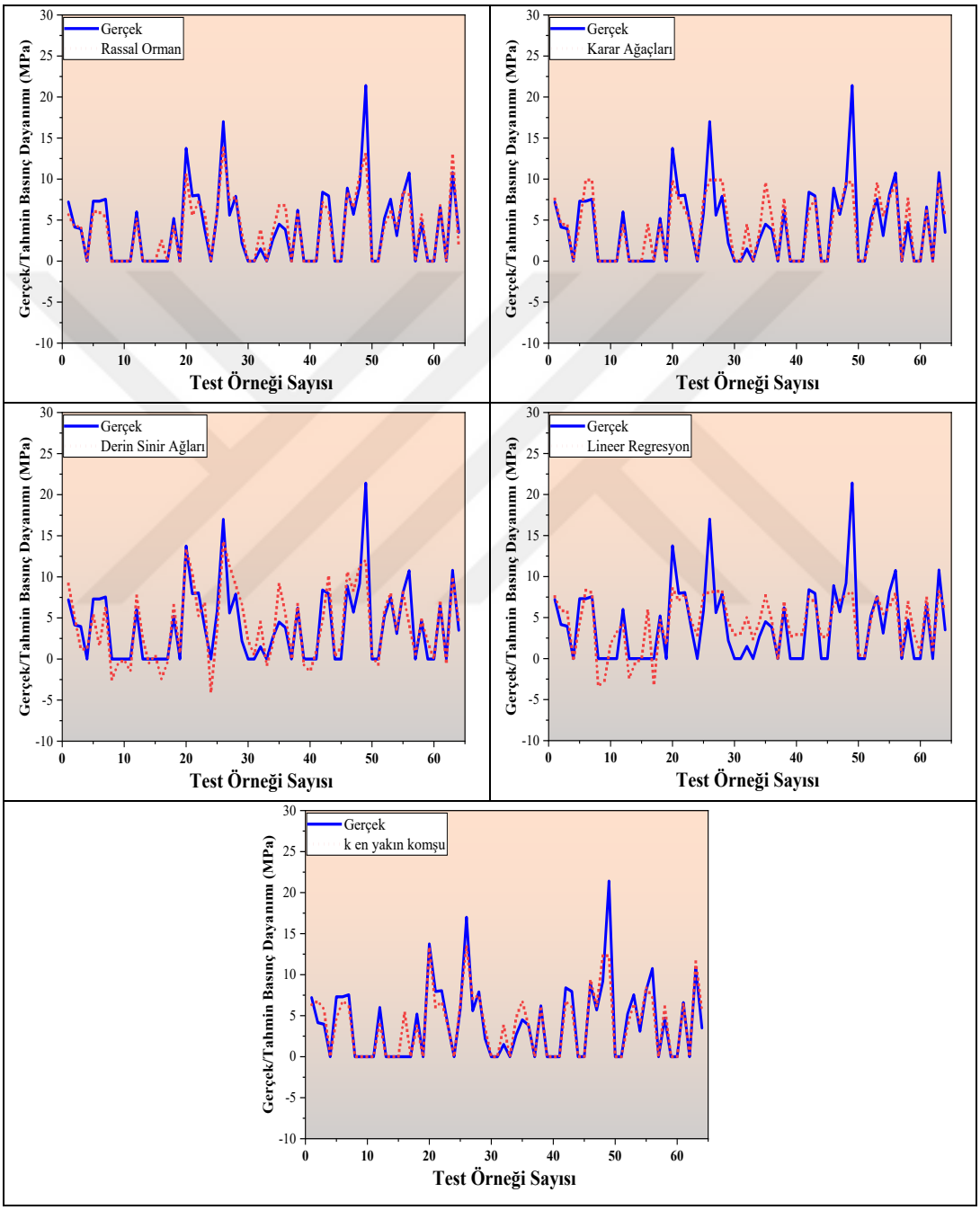
Tahmin algoritmalarının eğilme dayanımı değerleri üzerindeki performansları Şekil 65'te verilmiştir. Algoritmalar arasında rastgele orman algoritması 2,218 MSE; 1,489 RMSE; 0,848 MAE ve 0,893 R^2 ile en iyi performansı göstermiştir. En kötü performans ise basınç dayanımlarında olduğu gibi doğrusal regresyon modelinde 8,737 MSE; 2,955 RMSE; 2,119 MAE ve 0,581 R^2 ile görülmüştür. Her iki algoritma arasında MSE'de yaklaşık 4 kat, RMSE'de ise 1,5 kat fark olduğu görülmektedir. R^2'leri arasında da yaklaşık %54 fark vardır.

Şekil 68'de verilen gerçek eğilme dayanımları ile tahmin edilen dayanımlar arasında basınç dayanımlarına kıyasla nispeten daha az örtüşme vardır. Bu durum R^2 değerleri arasındaki farktan da anlaşılabilir. Gerçek değerlerden sapma geopolimer matrisin karmaşık yapısından kaynaklanıyor olabilir. Ancak Şekil 68 incelendiğinde, basınç dayanımlarında olduğu gibi eğilme dayanımlarının tahmininde de rastgele orman ve kNN algoritmalarının nispeten daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir. Grafikten çıkarılabilecek bir diğer çarpıcı sonuç ise eğilme dayanımı ile tahmin edilen değerler arasındaki sapmaların genellikle 0-10 MPa arasında olmasıdır. Geopolimer üretiminde lif ikamesi olmadığı için sonuçlar basınç dayanımı ile uyumludur. Analiz sonucunda, geopolimer harçların eğilme dayanımını en çok metakaolin ve ikame edilen toz malzemeler etkilemiştir. Dayanımı etkileyen yaş ve kür sıcaklığının ağırlığı diğer etkilere kıyasla küçüktür.

Awoyera vd., 2020; geopolimer kendiliğinden yerleşen betonların basınç, eğilme ve çekme dayanımlarını farklı algoritmalarla tahmin etmeye çalışmışlardır. Yapay sinir ağları için R^2 değerini basınç dayanımında 0,878; eğilme dayanımında ise 0,788 olarak elde etmişlerdir. R^2 değerleri arasında eğilme dayanımında yaklaşık %11'lik bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada elde edilen R^2 değeri eğilme dayanımında yaklaşık %10 azaldığı için çalışma sonuçlarındaki azalma literatürle uyumludur.

Geopolimer harçların hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı Random Forest ve kNN algoritmaları ile mantıklı ve makul bir şekilde tahmin edilmiştir. Ancak doğrusal regresyon algoritmasının jeopolimerin karmaşık yapısı nedeniyle başarılı bir

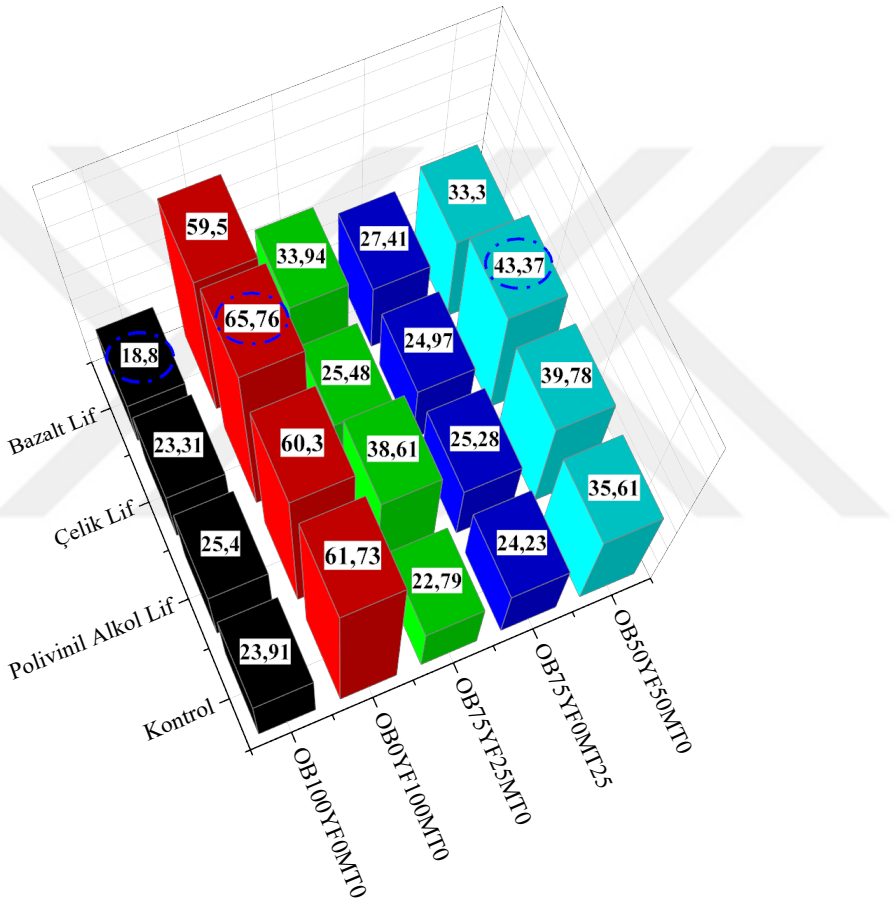
tahmin performansı vermediği görülmüştür. Ayrıca, atıfta bulunulan önceki çalışmalar, yapılan çalışmanın sonuçlarının malzemelere bağlı olarak farklı ancak tutarlı olduğunu göstermiştir. Şekil 68'te geopolimer harçların eğilme dayanımı tahminleri ve gerçek deneysel sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 68. Farklı Algoritmalara Dayalı Eğilme Dayanımlarının Gerçek Verileri ve Tahmin Edilen Değerleri

4.1.10. Lifli Geopolimer Betonların Basınç Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 69'da 5 farklı numune kombinasyonuna (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) 3 farklı lif polivinil alkol, çelik ve bazalt) bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında ikame ederek elde edilen geopolimer beton numunelerin basınç dayanımı test sonuçları verilmektedir.



Şekil 69. Lifli geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri

Çalışmanın kontrol grubunda OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0 numuneleri için basınç dayanımı değerleri sırası ile 23,91; 61,73; 22,79; 24,23 ve 35,61 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB75YF25MT0 numunesi arasında yaklaşık olarak 2,70 kat fark oluşmuştur.

Ou vd., 2022; farklı su/bağlayıcı oranına bağlı olarak ürettikleri cüruf tabanlı geopolimer betonlarda %100 cüruf kullanılan numunelerden 64,5 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Çalışmada elde edilen dayanım Ou vd., 2022; elde ettiği dayanımdan yaklaşık %4,5 düşüktür. Ancak Ou vd., 2022; çalışmasında su/bağlayıcı oranı 0,50; iri agreganın maksimum kalınlığı 12 mm iken mevcut çalışmada kullanılan su/bağlayıcı oranı 0,30 ve iri agrega maksimum kalınlığı 32 mm'dir. Yilmazoglu vd., 2022; uçucu kül ve cüruf tabanlı geopolimer betonların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Yilmazoglu vd., 2022; %100 cüruf kullanarak ürettikleri geopolimer betonların basınç dayanımını 56,85 MPa olarak elde etmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları su/bağlayıcı oranı 0,33; maksimum agrega dane çapı 22 mm'dir. Mevcut çalışmada elde edilen basınç dayanımı yaklaşık olarak %8,6 daha fazladır. Bu farka mevcut çalışmada kullanılan su/bağlayıcı oranının 0,30 olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Huang ve Wang, 2021; yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve metakaolin kullanarak ürettikleri geopolimer betonların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. %70 yüksek fırın cürufu ve %30 metakaolin kullanarak ürettikleri geopolimer numunelerden yaklaşık 18 MPa dayanım elde etmişlerdir. Mevcut çalışmada OB75YF0MT25 numunesinden yaklaşık 24,2 MPa dayanım elde edilmiştir. İki çalışma arasındaki yaklaşık %34'lük fark kullanılan toz öncüller ve kullanılan aktivatör oranları farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Üretilen geopolimer betonların kontrol grubunun basınç dayanımı değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çalışmanın bazalt lif ikame edilen gruplarında OB100YF0MT0-Bazalt-2, OB0YF100MT0-Bazalt-2, OB75YF25MT0-Bazalt-2, OB75YF0MT25-Bazalt-2 ve OB50YF50MT0-Bazalt-2 numuneleri için basınç dayanımı değerleri sırası ile 18,80; 59,50; 33,94; 27,41 ve 33,0 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB100YF0MT0 numunesi arasında yaklaşık olarak 3,16 kat fark oluşmuştur. Heweidak, Kafle ve Al-Ameri, 2022; uçucu kül ve cüruf ile ürettikleri geopolimerler 12 mm'lik bazalt lifler ikame etmişlerdir. 28.gün için 25,48 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Mevcut çalışmanın OB50YF50MT0-Bazalt-2 numunesinin 28 günlük basınç dayanımı 33,3 MPa'dır. İki değer arasındaki yaklaşık %30'luk fark kullanılan öncüller, kür rejimleri, agrega granülometrisi gibi faktörlerin farklılığından kaynaklanmaktadır.

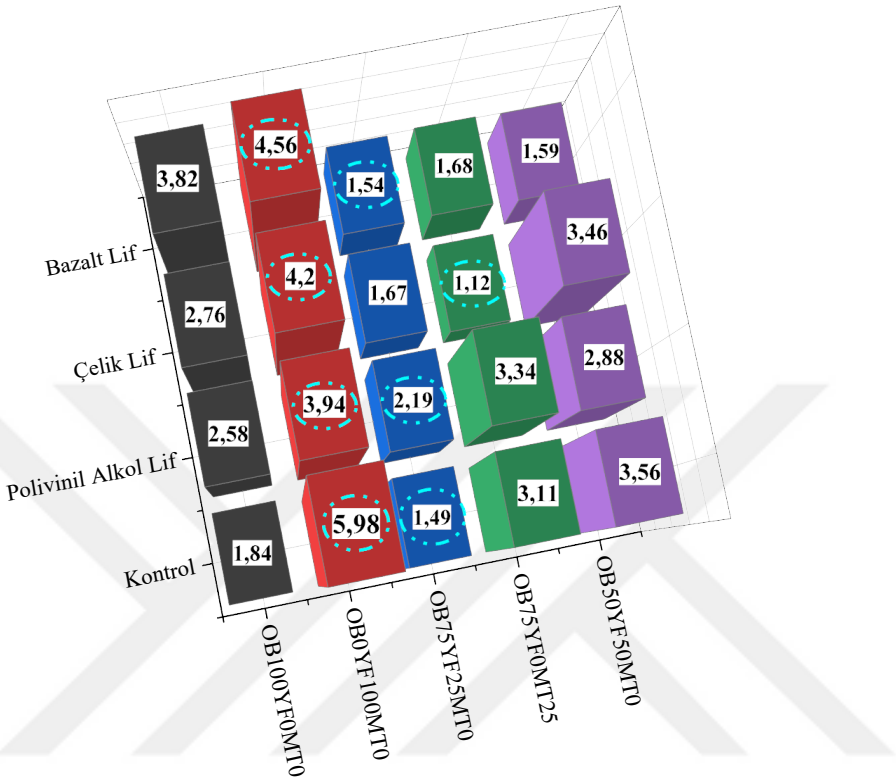
Çalışmanın çelik lif ikame edilen gruplarında OB100YF0MT0-Çelik-2, OB0YF100MT0-Çelik-2, OB75YF25MT0-Çelik-2, OB75YF0MT25-Çelik-2 ve OB50YF50MT0-Çelik-2 numuneleri için basınç dayanımı değerleri sırası ile 23,31; 65,76; 25,48; 24,97 ve 43,37 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0-Çelik-2 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB100YF0MT0-Çelik-2 numunesi arasında yaklaşık olarak 2,82 kat fark oluşmuştur. Zhang vd., 2023; uçucu kül, yüksek fırın cürufu çelik cürufu kullanarak ürettikleri geopolimerlere polietilen, çelik ve polivinil alkol lif ikame ederek mekanik özelliklerini araştırmışlardır. %2 çelik lif ikame edilen numunelerde yaklaşık olarak 54 MPa basınç dayanımı elde etmişlerdir. Mevcut çalışmada OB0YF100MT-Çelik-2 numunesi için 43,37 MPa dayanım elde edilmiştir. Belirtilen iki değer arasındaki yaklaşık %25'lik fark kullanılan öncül, kür sıcaklığı ve süresi ve agrega maksimum dane boyutu gibi değişkenlerin farklılığından kaynaklanmaktadır.

Çalışmanın polivinil alkol lif ikame edilen gruplarında OB100YF0MT0-PVA-2, OB0YF100MT0-PVA-2, OB75YF25MT0-PVA-2, OB75YF0MT25-PVA-2 ve OB50YF50MT0-PVA-2 numuneleri için basınç dayanımı değerleri sırası ile 25,40; 60,30; 38,61; 25,28 ve 39,78 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0-PVA-2 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB75YF0MT25-PVA-2 numunesi arasında yaklaşık olarak 2,39 kat fark oluşmuştur. Xiao vd., 2021; uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak ürettikleri geopolimerlerin 28 günlük basınç dayanımını 30,22 MPa olarak elde etmişlerdir. Mevcut tez çalışmasında OB50YF50MT0-PVA-2 numunesi için 28 günde 39,73 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. İki değer arasındaki yaklaşık %31 oranındaki farklılık su/bağlayıcı oranı, polivinil alkol lif oranı, alkali aktivatör seçimi ve numune boyutlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar tez çalışmasından farklı parametrelere göre geopolimer beton üretmiş olsa da çalışmanın sonuçlarının literatür verileri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

4.1.11. Lifli Geopolimer Betonların Yarmada Çekme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Şekil 70'te 5 farklı numune kombinasyonuna (OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0) 3 farklı lif

polivinil alkol, çelik ve bazalt) bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında ikame ederek elde edilen geopolimer beton numunelerin yarmada çekme dayanımı sonuçları verilmektedir.



Şekil 70. Lifli geopolimer betonların yarmada çekme dayanımı değerleri

Çalışmanın kontrol grubunda OB100YF0MT0, OB0YF100MT0, OB75YF25MT0, OB75YF0MT25 ve OB50YF50MT0 numuneleri için yarmada çekme dayanımı değerleri sırası ile 1,84; 5,98; 1,49; 3,11 ve 3,56 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB75YF25MT0 numunesi arasında yaklaşık olarak 4 kat fark oluşmuştur. Yilmazoglu vd., 2022; uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak ürettiği geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. %100 yüksek fırın cürufu kullanarak ürettiği geopolimer betonların yarmada çekme dayanımını 0,33 su/bağlayıcı oranı için 4,35 MPa olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca %100 uçucu küllü karışımlar için yarmada çekme dayanımı 1,15 MPa, %50 yüksek fırın cürufu ve %50 uçucu kül kullanılan karışımlarda 3,78 MPa olarak elde edilmiştir. Tez çalışmasının kontrol grubunda %100 yüksek fırın cüruflu numunelerin yarmada çekme dayanımı

Yilmazoglu vd., 2022' nin elde ettiği yarmada çekme dayanımlarına göre yaklaşık %37 daha fazla , %50 yüksek fırın cürufu ve %50 obsidiyen tozu karışımları için yaklaşık %6 daha düşüktür. Bu farklılığın sebepleri arasında kullanılan su/bağlayıcı oranı, agrega granülometrisi ve en büyük tane çapı, alkali aktivatör seçimi gibi faktörler yer almaktadır.

Çalışmanın bazalt lif ikame edilen gruplarında OB100YF0MT0-Bazalt-2, OB0YF100MT0-Bazalt-2, OB75YF25MT0-Bazalt-2, OB75YF0MT25-Bazalt-2 ve OB50YF50MT0-Bazalt-2 numuneleri için yarmada çekme dayanımı değerleri sırası ile 3,82; 4,56; 1,54; 1,68 ve 1,59 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB75YF25MT0 numunesi arasında yaklaşık olarak 2,96 kat fark oluşmuştur. Asil ve Ranjbar, 2022; hafif geopolimer betonların mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri %100 yüksek fırın cüruflu numunelerden 3,26 MPa yarmada çekme dayanımı elde etmişlerdir. Mevcut çalışmadan elde edilen yarmada çekme dayanımı Asil ve Ranjbar, 2022' nin çalışmasındaki değerden yaklaşık %40 daha yüksektir. Bu duruma kullanılan alkali aktivatör türü ve miktarı, agrega tipi ve miktarı ve beton reçetesinin farklılığının sebep olduğu düşünülmektedir.

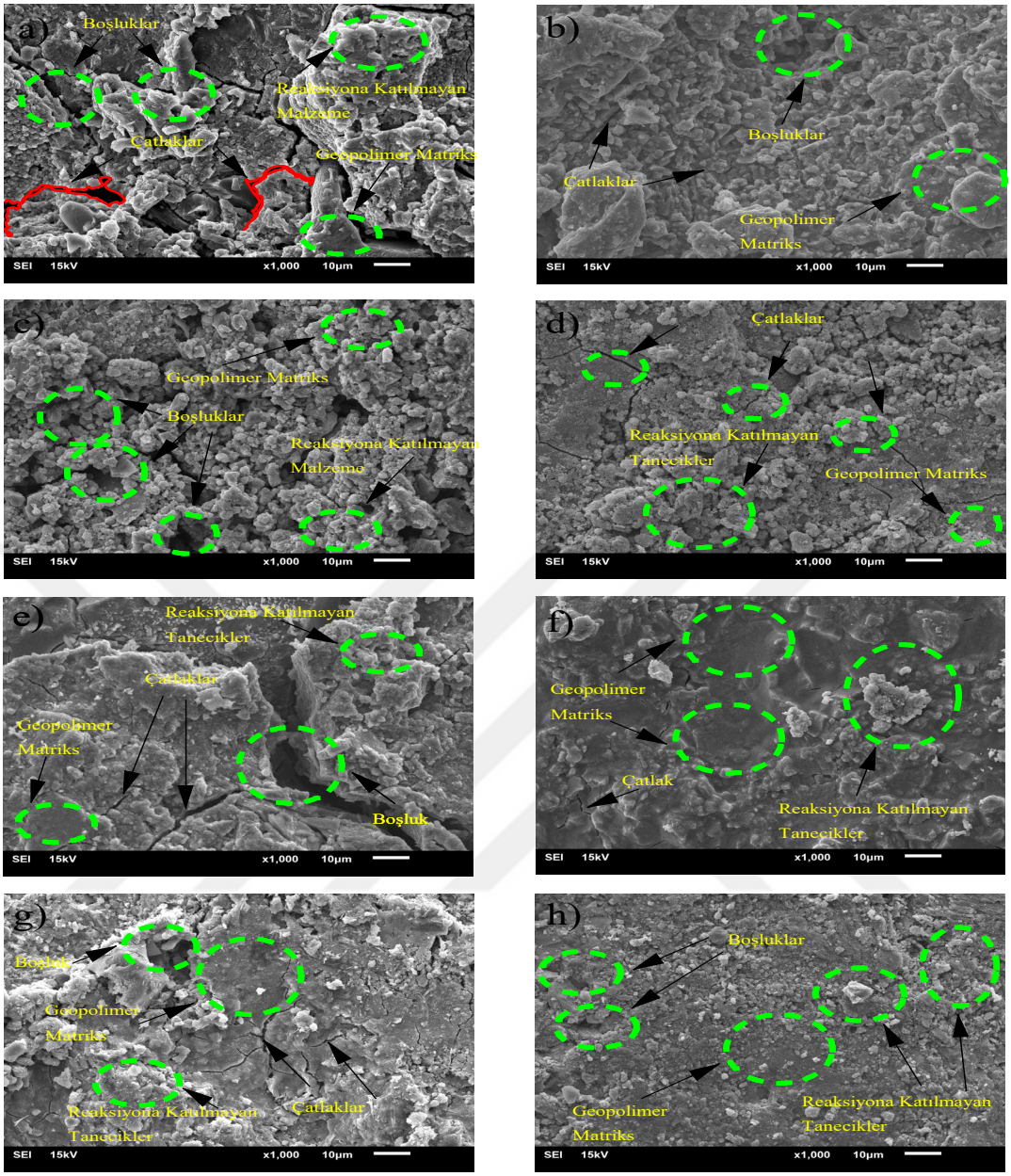
Çalışmanın çelik lif ikame edilen gruplarında OB100YF0MT0-Çelik-2, OB0YF100MT0-Çelik-2, OB75YF25MT0-Çelik-2, OB75YF0MT25-Çelik-2 ve OB50YF50MT0-Çelik-2 numuneleri için yarmada çekme dayanımı değerleri sırası ile 2,76; 4,20; 1,67; 1,12 ve 3,46 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB75YF0MT25 numunesi arasında yaklaşık olarak 3,75 kat fark oluşmuştur. Eskandarinia, Esmailzade ve Aslani, 2022; Taguchi metoduyla tasarladıkları alkali ile aktive edilmiş cüruflu betonları geri dönüştürülmüş lastik çeliği ile takviye ederek yarmada çekme dayanımlarını incelemişlerdir. Ürettikleri %100 yüksek fırın cüruflu numunelerden 4,78 MPa yarmada çekme dayanımı elde etmişlerdir. Mevcut çalışmadan elde edilen yarmada çekme dayanımı Eskandarinia, Esmailzade ve Aslani, 2022' nin çalışmasındaki değerden yaklaşık %14 daha düşüktür. Bu dayanım farklılığı kullanılan lif tipi, miktarı ve mekanik özellikleri, alkali aktivatör türü ve miktarı, agrega tipi ve miktarı gibi değişkenlerin neden olduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın polivinil alkol lif ikame edilen gruplarında OB100YF0MT0-PVA-2, OB0YF100MT0-PVA-2, OB75YF25MT0-PVA-2, OB75YF0MT25-PVA-2 ve OB50YF50MT0-PVA-2 numuneleri için yarmada çekme dayanımı değerleri sırası ile 2,58; 3,94; 2,19; 3,34 ve 2,88 MPa'dır. Maksimum dayanım değerinin elde edildiği OB0YF100MT0 numunesi ile minimum değerin elde edildiği OB75YF25MT0 numunesi arasında yaklaşık olarak 1,80 kat fark oluşmuştur.

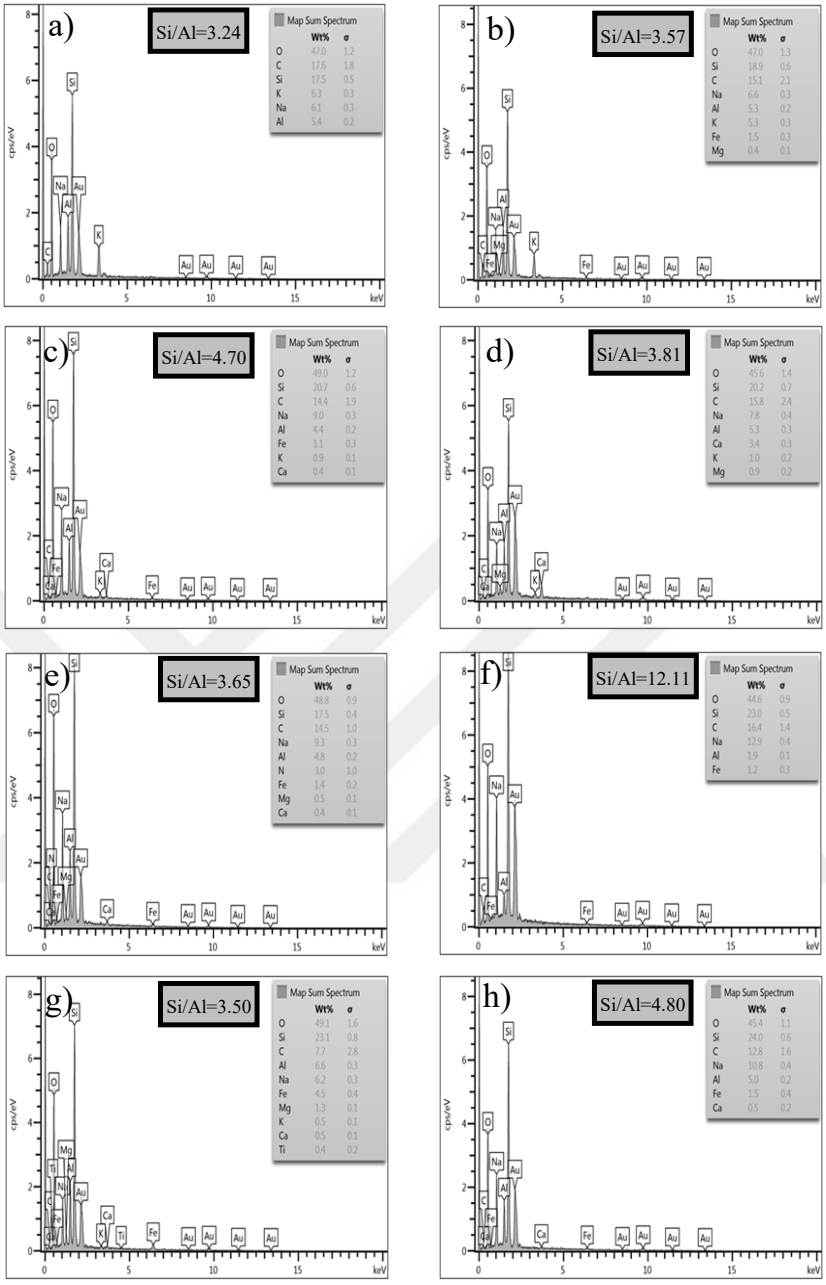
Lifli geopolimer betonlar ile alakalı birçok farklı parametre için (lif çeşidi, liflerin mekanik özellikleri, lif/bağlayıcı oranı, iri ve ince agrega granülometrisi ve en büyük tane çapı, alkali aktivatör tipi ve çeşitleri, toz öncül tipi ve miktarı, alkali/bağlayıcı oranı, su/bağlayıcı oranı ve beton içerikleri vb.) farklı çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan tez çalışmasının parametreleri yapılan çalışmalardan farklı olduğundan dolayı literatür ile çalışma sonuçları arasında farklılıklar olsa da genel olarak sonuçlar literatür ile uyumludur.

4.1.12. Lifli Geopolimer Betonların SEM-EDS Analizlerinin Değerlendirilmesi

Şekil 71'de geopolimer lifli betonların x1000 yakınlaştırma oranına sahip SEM görüntüleri verilmektedir. Basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına sahip f) OB0YF100MT0-Çelik-2 görüntüsünde en kompakt, çatlaksız ve boşluksuz iç yapının oluştuğu görülmektedir. Ayrıca, en düşük basınç dayanımına sahip c) OB100YF0MT0-Bazalt-2 görüntüsünde ise birçok reaksiyona katılmayan malzemenin ve birçok boşluğun oluştuğu anlaşılmaktadır. Genel olarak cüruf bulunan malzemelere ait SEM görüntülerinde geopolimerasyonun oldukça güçlü oluştuğu söylenebilir. Ayrıca Şekil 72'de verilen Si/Al oranlarının basınç ve yarmada çekme dayanımlarının genel olarak bir göstergesi olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 71. 8 farklı geopolimer karışımın x1000 kez yakınlaştırılmış SEM görüntüleri: a) OB100YF0MT0, b) OB0YF100MT0, c) OB100YF0MT0-Bazalt-2, d) OB0YF100MT0-Bazalt-2, e) OB100YF0MT0-Çelik-2, f) OB0YF100MT0-Çelik-2, g) OB100YF0MT0-PVA-2 ve h) OB0YF100MT0-PVA-2



Şekil 72. 8 farklı geopolimer karışımın EDS analizi sonuçları ve Si/Al Oranları: a) OB100YF0MT0, b) OB0YF100MT0, c) OB100YF0MT0-Bazalt-2, d) OB0YF100MT0-Bazalt-2, e) OB100YF0MT0-Çelik-2, f) OB0YF100MT0-Çelik-2, g) OB100YF0MT0-PVA-2 ve h) OB0YF100MT0-PVA-2

4.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, deneysel ve makine öğrenmesi çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanımı değeri, 90 °C'de kür edilmiş OB0YF100MT0 numunelerinin 28 günlük dayanımlarından elde edilmiştir.
2. Geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımı değeri ise 90 °C'de kür edilmiş OB100YF0MT0 numunelerinin 28 günlük dayanımlarından elde edilmiştir.
3. Genel olarak optimum kür sıcaklığı hem basınç hem de eğilme dayanımı için 90 °C'dir.
4. Metakaolinin ağırlıkça %25'ten daha yüksek kullanıldığı geopolimer harç numunelerinde, eğilme ve basınç dayanımları kullanılan test cihazı ile ölçülememiştir. Bu durumun alkali aktivatör olarak yalnızca NaOH kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
5. Obsidiyen tozu ile üretilen geopolimer harçların yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi diğer atık ve doğal malzemelerden elde edilen harç numunelerin eğilme dayanımına kıyasla yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.
6. Geopolimer harç numunelerin literatürde verilen Ca/Si oranı göstergesine uyduğu görülmektedir. En yüksek basınç dayanımına sahip olan OB0YF100MT0 harç numunesinin en yüksek Ca/Si oranına sahip olduğu ve genel olarak dayanım sıralamasına uygun olarak bu oranın azaldığı görülmüştür (SEM sonuçlarına göre)
7. Geopolimer harçların SEM-EDS analizi sonucu, dayanımların genel olarak literatürde yer alan Si/Al oranına bağlı olmadığı tespit edilmiştir.
8. Geopolimer harçların XRD sonuçları genel olarak seçilen numuneler için çok fazla değişkenlik göstermemiştir, ancak pik değerlerinin düşmesi karışımın amorflaştığını dolayısıyla mekanik özelliklerin iyileştiğini ifade etmektedir.
9. Geopolimer harçların XRD analizi sonucu karışımlarda genel olarak kuvars, albit ve berlinit fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

10. Geopolimer harçların farklı öncüller ile oluşan kombinasyonlarının dayanımları karşılaştırıldığında, obsidiyen tozunun metakaolinden ziyade yüksek fırın cürufu ile daha iyi çalıştığı çıkarımı yapılabilmektedir.

11. Genel harç dayanımları sonucu 28 günlük dayanımların 90 günlük dayanımlardan yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Bu duruma bazı karışımlardaki malzemenin alkali ortamda az miktarda çözünmesinin sebep olduğu düşünülmektedir.

12. Lifli geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanımı kontrol grubunda elde edilirken, en yüksek eğilme dayanımı bazalt lif ikame edilen numunelerde elde edilmiştir. Bu durumda en verimli çalışan lifin bazalt lif olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.

13. Lif ikamesi yapılan geopolimer harçların basınç dayanımının genel olarak düştüğü, ancak eğilme dayanımında ise bazı oranlarda artarken bazı oranlarda azaldığından bir genelleme yapılması mümkün olmamaktadır.

14. Lifler genelde eğilme dayanımının iyileştirilmesi için kullanıldığından, eğilme dayanımı sonuçlarına göre genel olarak optimum lif oranının %2 olduğu çıkarımı yapılabilir.

15. Makine öğrenmesi algoritmalarında en iyi performansı rastgele orman algoritmasının gösterdiği (R^2=0.983), en zayıf performansın ise lineer regresyon (R^2=0.83) algoritması tarafından gösterildiği söylenebilmektedir.

16. Yapılan girdilerin önem analizi çalışmasında en önemli girdinin metakaolin öncülü olduğu görülmüştür.

17. Makine öğrenmesi algoritmalarının basınç dayanımlarını eğilme dayanımlarına göre daha iyi seviyede tahmin ettiği tespit edilmiştir (R^2 değerleri yaklaşık %10 daha fazla).

18. Lifli geopolimer betonların basınç ve yarmada çekme dayanımı için optimum kombinasyon OB0YF100MT0 karışımı olmuştur.

19. Lifli geopolimer betonların basınç dayanımı için lineer bir bağıntı oluşturulamasa da, yarmada çekme dayanımı için OB100YF0MT0 karışımında lif kullanımı kontrol grubuna göre dayanımı artırmıştır.

20. Lifli geopolimer betonların yarmada çekme dayanımı için her bir kombinasyonda optimum lif değişmektedir.

KAYNAKÇA

Abbass, M., & Singh, G. (2023). Experimental investigation of engineered alkali-activated fibrous geopolymer concrete. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 8(1), 12. https://doi.org/10.1007/s41024-022-00259-x

Ahmad, A., Ahmad, W., Aslam, F., & Joyklad, P. (2022). Compressive strength prediction of fly ash-based geopolymer concrete via advanced machine learning techniques. Case Studies in Construction Materials, 16, e00840. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00840

Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. Construction and Building Materials, 35, 718-729. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044

Akbulut, F.(2020). Kırmızı çamur ve yüksek fırın cürufunun perlit esaslı geopolimer beton özelliklerine etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*. Erzurum, Türkiye: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Al Azzawi, Z.H.N.(2019). Investigation of Durability Properties of Geopolymer Containing Metakaolin, *Ph.D. Thesis*. Kayseri, Türkiye: Erciyes University Graduate School of Natural and Applied Science.

Alakara, E. H., Nacar, S., Sevim, O., Korkmaz, S., & Demir, I. (2022). Determination of compressive strength of perlite-containing slag-based geopolymers and its prediction using artificial neural network and regression-based methods. Construction and Building Materials, 359, 129518. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129518

Alaloul, W. S., Al Salaheen, M., Malkawi, A. B., Alzubi, K., Al-Sabaeei, A. M., & Musarat, M. A. (2021). Utilizing of oil shale ash as a construction material: A systematic review. Construction and Building Materials, 299, 123844. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123844

Alekhya, P., & Aravindan, S. (2014). Experimental investigations on geopolymer concrete. Int J Civ Eng Technol (IJCIET), 5(4), 01-09.

Alexander, A. E., & Shashikala, A. P. (2022). Studies on the microstructure and durability characteristics of ambient cured FA-GGBS based geopolymer mortar. Construction and Building Materials, 347, 128538. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128538

Ali, A. M., Sanjayan, J., & Guerrieri, M. (2017). Performance of geopolymer high strength concrete wall panels and cylinders when exposed to a hydrocarbon fire. Construction and Building Materials, 137, 195-207. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.099

Ali, M. F., & Natrajan, M. V. (2021, July). A Review of Geopolymer Composite Thermal Properties. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 822, No. 1, p. 012051). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/822/1/012051

Aljanabi, M., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Kadhim, S. (2022). Residual mechanical performance of lightweight fiber-reinforced geopolymer mortar composites incorporating expanded clay after elevated temperatures. Journal of Composite Materials, 56(11), 1737-1752. https://doi.org/10.1177/00219983221088902

Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A., & Meikle, S. (2016). Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications. Construction and Building Materials, 120, 198-211. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.085

Alnkaa, A.A.(2019). Farklı kür koşullarının geopolimer harçların özelliklerine etkisi, *Doktora Tezi*. Kastamonu, Türkiye: Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Alomayri, T., Raza, A., & Shaikh, F. (2021). Effect of nano SiO2 on mechanical properties of micro-steel fibers reinforced geopolymer composites. Ceramics International, 47(23), 33444-33453. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.251

Altay, O.(2020). Kendiliğinden yerleşen çelik lifli beton performansını tahmin edecek sistemin modellenmesi, *Doktora Tezi*. Elazığ, Türkiye: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Altındal, İ.(2020). Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Altman, N. S. (1992). An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. The American Statistician, 46(3), 175-185. https://doi.org/10.2307/2685209

Altundal, M. B.(2019). Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). A review on alkali-activated slag concrete. Ain Shams Engineering Journal, 12(2), 1475-1499. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.003

Amin, M. N., Khan, K., Ahmad, W., Javed, M. F., Qureshi, H. J., Saleem, M. U., ... & Faraz, M. I. (2022). Compressive strength estimation of geopolymer composites through novel computational approaches. Polymers, 14(10), 2128. https://doi.org/10.3390/polym14102128

Amin, M. N., Khan, K., Javed, M. F., Aslam, F., Qadir, M. G., & Faraz, M. I. (2022). Prediction of Mechanical Properties of Fly-Ash/Slag-Based Geopolymer Concrete Using Ensemble and Non-Ensemble Machine-Learning Techniques. Materials, 15(10), 3478. https://doi.org/10.3390/ma15103478

Anchieta, C. G., Cancelier, A., Mazutti, M. A., Jahn, S. L., Kuhn, R. C., Gündel, A., & Foletto, E. L. (2014). Effects of solvent diols on the synthesis of ZnFe2O4 particles and their use as heterogeneous photo-Fenton catalysts. Materials, 7(9), 6281-6290. https://doi.org/10.3390/ma7096281

Annakoa, M.A.I.(2019). Geopolimer betonda cam tozu kullanımının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Kastamonu, Türkiye: Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Arslan, A.A.(2019). Metakaolin tabanlı geopolimer harçlara farklı kür koşullarının etkisinin incelemesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Balıkesir, Türkiye: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Asil, M. B., & Ranjbar, M. M. (2022). Hybrid effect of carbon nanotubes and basalt fibers on mechanical, durability, and microstructure properties of lightweight geopolymer concretes. Construction and Building Materials, 357, 129352. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129352

Aslan, Y. & Gürocak, Z. (2022). Asidik ve bazik karakterli tüflerin puzolanik özelliklerinin araştırılması: Elazığ ve Gümüşhane yörelerinden örnek bir çalışma . Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , 12 (4) , 1024-1035 . DOI: 10.17714/gumusfenbil.1114739

Assi, L. N., Carter, K., Deaver, E., & Ziehl, P. (2020). Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. Journal of Cleaner Production, 263, 121477. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477

ASTM Committee C-09 on Concrete and Concrete Aggregates. (2013). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM international.

Atabey, İ.İ.(2017). F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması, *Doktora Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O. K. A. N., Bilim, C., İlkentapar, S. E. R. H. A. N., & Luga, E. (2015). Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. Construction and building materials, 96, 673-678. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089

Awoyera, P. O., Kirgiz, M. S., Viloria, A., & Ovallos-Gazabon, D. (2020). Estimating strength properties of geopolymer self-compacting concrete using machine

learning techniques. Journal of materials research and technology, 9(4), 9016-9028. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.008

Aydın, S.(2010). Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi, *Doktora Tezi*. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aygörmez, Y.(2018). Kolemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aykut, C.(2017). Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Bayburt, Türkiye: Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aykut, C.(2017). Mechanical and Transport Properties of Geopolymer Concrete with Artificial Lightweight Aggregate, *Ph.D. Thesis*. Gaziantep, Turkey: University of Gaziantep Graduate School of Natural and Applied Science.

Aziz, I. H., Abdullah, M. M. A. B., Salleh, M. M., Azimi, E. A., Chaiprapa, J., & Sandu, A. V. (2020). Strength development of solely ground granulated blast furnace slag geopolymers. Construction and Building Materials, 250, 118720. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118720

Bai, C., Deng, Y., Zhou, Q., Deng, G., Yang, T., & Yang, Y. (2022). Effect of different curing methods on the preparation of carbonized high-titanium slag based geopolymers. Construction and Building Materials, 342, 128023. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128023

Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. Cement and concrete research, 35(6), 1233-1246. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002

Balun, B.(2019). Alkalilerle aktive edilmiş bitlis yöresi pomzası içeren hibrit bağlayıcıların üretilebilirliğinin incelenmesi, *Doktora Tezi*. Elazığ, Türkiye: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Baradan, B., Yazici, H., & Aydin, S. (2015). Beton (ikinci baskı). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye.

Başçik, H.i(2019). Kalsine edilmiş doğal puzolan esaslı geopolimer harç geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. İzmir, Türkiye: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bell, J. L., Sarin, P., Provis, J. L., Haggerty, R. P., Driemeyer, P. E., Chupas, P. J., ... & Kriven, W. M. (2008). Atomic structure of a cesium aluminosilicate geopolymer: a pair distribution function study. Chemistry of Materials, 20(14), 4768-4776. https://doi.org/10.1021/cm703369s

Bell, J., Gordon, M., & Kriven, W. (2005). Use of geopolymeric cements as a refractory adhesive for metal and ceramic joins. Advances in Ceramic Coatings

and Ceramic-Metal Systems: Ceramic Engineering and Science Proceedings, 26, 407-413. https://doi.org/10.1002/9780470291238.ch46

Bellum, R. R. (2022). Influence of steel and PP fibers on mechanical and microstructural properties of fly ash-GGBFS based geopolymer composites. Ceramics International, 48(5), 6808-6818. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.232

Bheel, N., Awoyera, P., Tafsirojjaman, T., & Sor, N. H. (2021). Synergic effect of metakaolin and groundnut shell ash on the behavior of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 311, 125327. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125327

Bilal, M.A.M.(2019). Geopolimer betonda pirinç kabuğu külü ve atık seramik tozu kullanımının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Kastamonu, Türkiye: Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bingöl, Ş.(2018). Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması, *Doktora Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bouaissi, A., Li, L. Y., Abdullah, M. M. A. B., & Bui, Q. B. (2019). Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 210, 198-209. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.202

Breinman, L. (2001). Random forests. Mach. Learn., 45, 5-32.

Burciaga-Díaz, O., & Escalante-García, J. I. (2012). Strength and durability in acid media of alkali silicate-activated metakaolin geopolymers. Journal of the American Ceramic Society, 95(7), 2307-2313. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05249.x

Cakmak, T. (2022). Sodyum Hidroksit ile Aktive Edilmiş Obsidiyen, Atık Cam Ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Rize, Türkiye: Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Campbell, R., Stern, C. R., & Peñaloza, Á. (2017). Obsidian in archaeological sites on Mocha Island, southern Chile: Implications of its provenience. Journal of Archaeological Science: Reports, 13, 617-624. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.005

Chaabene, W. B., Flah, M., & Nehdi, M. L. (2020). Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review. Construction and Building Materials, 260, 119889. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119889

Chakkor, O.(2021). Kırmızı Çamur ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Cheah, C. B., Samsudin, M. H., Ramli, M., Part, W. K., & Tan, L. E. (2017). The use of high calcium wood ash in the preparation of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Pulverized Fly Ash geopolymers: A complete microstructural and mechanical characterization. Journal of Cleaner Production, 156, 114-123. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.026

Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. Cement and concrete composites, 29(3), 224-229. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002

Chithambaram, S. J., Kumar, S., & Prasad, M. M. (2019). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. Construction and Building Materials, 213, 100-108. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.051

Choeycharoen, P., Sornlar, W., & Wannagon, A. (2022). A sustainable bottom ash-based alkali-activated materials and geopolymers synthesized by using activator solutions from industrial wastes. Journal of Building Engineering, 54, 104659. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104659

Criado, M., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. Fuel, 84(16), 2048-2054. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030

Çelik , A.(2019). Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri, Doktora Tezi. Sakarya, Türkiye: Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelikten, S. (2021). Mechanical and microstructural properties of waste andesite dust-based geopolymer mortars. Advanced Powder Technology, 32(1), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.10.011

Dao, D. V., Ly, H. B., Trinh, S. H., Le, T. T., & Pham, B. T. (2019). Artificial intelligence approaches for prediction of compressive strength of geopolymer concrete. Materials, 12(6), 983. https://doi.org/10.3390/ma12060983

Darvish, P., Alengaram, U. J., Alnahhal, A. M., Poh, Y. S., & Ibrahim, S. (2021). Enunciation of size effect of sustainable palm oil clinker sand on the characteristics of cement and geopolymer mortars. Journal of Building Engineering, 44, 103335. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103335

Davidovits, J. (1987). Geopolymeric reactions in archaeological cements and in modern blended cements. Concr. Int, 9, 23-29.

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

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

Davidovits, J. (1994, October). Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes (Vol. 1, pp. 131-149).

Davidovits, J. (2002, October). Environmentally driven geopolymer cement applications. In Proceedings of 2002 Geopolymer Conference. Melbourne. Australia.

Davidovits, J. (2008). Geopolymer. Chemistry and Applications. Institute Geopolymere, Saint-Quentin, France.

Davidovits, J. (2008). They built the Pyramids. Geopolymer Institute.

Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. J. Ceram. Sci. Technol, 8(3), 335-350.

Davidovits, J. G. (2008). Chemistry and applications. Saint-Quentin: Institute Geopolymer, 592.

Davidovits, J., & Morris, M. (1988). The pyramids: An enigma solved. (No Title).

Deng, Z., Yang, Z., & Pan, X. (2023). Synergetic effects of recycled crumb rubber and glass cullet on the engineering properties of geopolymer mortar. Cement and Concrete Composites, 137, 104907. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104907

Deng, Z., Yang, Z., Bian, J., Pan, X., Wu, G., Guo, F., ... & Chen, S. (2022). Engineering properties of PVA fibre-reinforced geopolymer mortar containing waste oyster shells. Materials, 15(19), 7013. https://doi.org/10.3390/ma15197013

Derakhshani, A., Ghadi, A., & Vahdat, S. E. (2023). Study of the effect of calcium nitrate, calcium formate, triethanolamine, and triisopropanolamine on compressive strength of Portland-pozzolana cement. Case Studies in Construction Materials, 18, e01799. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01799

Derinpinar, A. N., Karakoç, M. B., & Özcan, A. (2022). Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. Construction and Building Materials, 331, 127318. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127318

Dimas, D., Giannopoulou, I., & Panias, D. (2009). Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. Journal of materials science, 44, 3719-3730. https://doi.org/10.1007/s10853-009-3497-5

Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2017). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. Environmental Science and Pollution Research, 24, 4433-4446. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8230-8

Dolamary , P.Y.S.(2018). Development of a New Type of A Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *Ph.D. Thesis*. Gaziantep, Turkey: Hasan Kalyoncu University, Graduate School of Natural and Applied Science.

Durak, U.(2019). Nanoparçacık katkıların geopolimer harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin araştırılması, *Doktora Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Duran, S. U., Küçükömeroğlu, B., Çiriş, A., & Ersoy, H. (2022). Gamma-ray absorbing characteristic of obsidian rocks as a potential material for radiation protection. Radiation Physics and Chemistry, 199, 110309. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110309

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of materials science, 42, 2917-2933. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z

Eisa, A. S., Sabol, P., Khamis, K. M., & Attia, A. A. (2022). Experimental Study on the Structural Response of Reinforced Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Members. Infrastructures, 7(12), 170. https://doi.org/10.3390/infrastructures7120170

Ekinci, E.(2017). Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, M., & Elshaboury, A. M. (2018). Setting time and 7-day strength of geopolymer mortar with various binders. Construction and Building Materials, 187, 974-983. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.025

EN, T. (2013). 450-1 Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1: Tarif. Özellikler ve Uygunluk Kriteri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Enstitüsü, T. S. (2008). Doğal Puzolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri. TS, 25, 1-14.

Enstitüsü, T. S. (2016). TS 802: Beton karışım tasarımı hesap esasları. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.

Ercan, T., YEĞİNGİL, Z., & Bigazzi, G., (1989). Obsidian definition characteristics and distribution in Anatolia geochemical features of Central Anatolian obsidians. Jeomorfoloji Dergisi .

Erdal, H. I. (2013). Two-level and hybrid ensembles of decision trees for high performance concrete compressive strength prediction. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 26(7), 1689-1697. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.03.014

Eren , E.(2018). Borik asit ve borik asit atıklarının uçucu kül ve yüksek fırın cürufu alkali aktivasyonu sürecine etkilerinin araştırılması, *Doktora Tezi*. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erfanimanesh, A., & Sharbatdar, M. K. (2020). Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer paste, mortar, and concrete containing local zeolite and slag activated by sodium carbonate. Journal of Building Engineering, 32, 101781. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101781

Eskandarinia, M, Esmailzade, M, Aslani, F. Splitting tensile strength of recycled tire steel fiber-reinforced alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method. Structural Concrete. 2023; 24(3): 3365–3384. https://doi.org/10.1002/suco.202200306

Fauzi, M. R. (2017). Signifikansi tembikar tera-tali dari situs Ceruk Landai (Merangin, Jambi) dalam rekonstruksi ekspansi neolitik di bagian barat Indonesia. Kalpataru, 26(1), 1-14.

Fauzi, M. R., Intan, F. S., & Wibowo, A. S. (2019). Newly discovered cave art sites from Bukit Bulan, Sumatra: Aligning prehistoric symbolic behavior in Indonesian prehistory. Journal of Archaeological Science: Reports, 24, 166-174. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.01.001

Fernández, M. V., Stern, C. R., & Leal, P. R. (2015). Geochemical analysis of obsidian from archaeological sites in northwestern Santa Cruz Province, Argentine Patagonia. Quaternary International, 375, 44-54. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.013

Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. Microporous and Mesoporous materials, 91(1-3), 111-119. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015

Firdous, R., Stephan, D., & Djobo, J. N. Y. (2018). Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. Construction and Building Materials, 190, 1251-1263. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.191

Fu, Q., Bu, M., Zhang, Z., Xu, W., Yuan, Q., & Niu, D. (2021). Hydration characteristics and microstructure of alkali-activated slag concrete: a review. Engineering. https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.07.026

Ganesh, A. C., & Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. Journal of Cleaner Production, 282, 124543. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124543

Giancaspro, J., Balaguru, P. N., & Lyon, R. E. (2006). Use of inorganic polymer to improve the fire response of balsa sandwich structures. Journal of materials in

civil engineering, 18(3), 390-397. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(390)

Gill, P., & Parveen. (2022). Development of detailed mix design methodology for low calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating opc and crumb rubber. Infrastructures, 7(11), 149. https://doi.org/10.3390/infrastructures7110149

Girgin , S.(2016). NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Afyonkarahisar, Türkiye: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Godfrey-Smith, D. I., & Haywood, N. (1984). Obsidian sources in Ontario Prehistory. Ont. Archaeol, 41(2).

Guler, S., & Akbulut, Z. F. (2022). Effect of high-temperature on the behavior of single and hybrid glass and basalt fiber added geopolymer cement mortars. Journal of Building Engineering, 57, 104809. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104809

Guo, G., Lv, C., Liu, J., & Wang, L. (2022). Properties of fiber-reinforced one-part geopolymers: A review. Polymers, 14(16), 3333. doi: 10.3390/polym14163333

Guo, X., & Pan, X. (2018). Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. Construction and Building Materials, 179, 633-641. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.198

Gülmez, N.(2018). Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi, *Doktora Tezi*. Antalya, Türkiye: Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gümüş, A.(2016). Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*. Afyonkarahisar, Türkiye: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Güngör, D.(2019). Doğal zeolit bazlı geopolimerlerin özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Güzelküçük, S.(2020). Isı yalıtım kabiliyetine sahip perlit esaslı geopolimer bağlayıcılı harçların geliştirilmesi, *Doktora Tezi*. Kırıkkale, Türkiye: Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Haddad, R. H., Ashteyat, A. M., & Lababneh, Z. K. (2019). Producing geopolymer composites using oil shale ash. Structural Concrete, 20(1), 225-235. https://doi.org/10.1002/suco.201800007

Haily, E., Zari, N., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2023). Natural fibers as an alternative to synthetic fibers in the reinforcement of phosphate sludge-based geopolymer mortar. Journal of Building Engineering, 67, 105947. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105947

Hamid, M.A.H.(2021). Mechanical and Durability of the Geopolymer Cement Produced with Pumice Powder and Fly Ash, *M.Sc. Thesis*. Van, Türkiye: Van Yuzuncuyil University Institute of Natural and Applied Sciences.

Han, J. (2011). M. Kamber, and J. Pei,"Data Mining Concepts and Techniques".

Hassan Sarkaz, A.M.(2020). Atık lastik katkılı geopolimer betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Kastamonu, Türkiye: Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. H. (2001). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, New York, NY.

Heweidak, M., Kafle, B., & Al-Ameri, R. (2022). Influence of Hybrid Basalt Fibres' Length on Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacted Ambient-Cured Geopolymer Concrete. Journal of Composites Science, 6(10), 292. https://doi.org/10.3390/jcs6100292

Higgins, D. (2006, March). Sustainable concrete: How can additions contribute. In Proceedings of the Institute of Concrete Technology Annual Technical Symposium. Institute of Concrete Technology Camberley, UK.

Ho, V. D., Gholampour, A., Losic, D., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Enhancing the performance and environmental impact of alkali-activated binder-based composites containing graphene oxide and industrial by-products. Construction and Building Materials, 284, 122811. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122811

Hossein, H. A., Hamzawy, E. M., El-Bassyouni, G. T., & Nabawy, B. S. (2023). Mechanical and physical properties of synthetic sustainable geopolymer binders manufactured using rockwool, granulated slag, and silica fume. Construction and Building Materials, 367, 130143. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130143

Huang, W., & Wang, H. (2021). Geopolymer pervious concrete modified with granulated blast furnace slag: Microscale characterization and mechanical strength. Journal of Cleaner Production, 328, 129469. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129469

Hughes, R. E., Werra, D. H., & Sulgostowska, Z. (2018). On the sources and uses of obsidian during the Paleolithic and Mesolithic in Poland. Quaternary International, 468, 84-100. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.11.013

Humur, G.H.(2018). Effect of Nano-silica On The Durability and Mechanical Performance of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, *M.Sc. Thesis*. Gaziantep, Turkey: University of Gaziantep Graduate School of Natural and Applied Science.

Huo, W., Zhu, Z., Sun, H., Ma, B., & Yang, L. (2022). Development of machine learning models for the prediction of the compressive strength of calcium-

based geopolymers. Journal of Cleaner Production, 380, 135159. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135159

Isa, M. N., & Awang, H. (2023). Characteristics of palm oil fuel ash geopolymer mortar activated with wood ash lye cured at ambient temperature. Journal of Building Engineering, 66, 105851. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105851

Jaglan, P., Dass, R., & Duhan, M. (2019). A comparative analysis of various image segmentation techniques. In Proceedings of 2nd International Conference on Communication, Computing and Networking: ICCCN 2018, NITTTR Chandigarh, India (pp. 359-374). Springer Singapore.

Jain, D., Bhadauria, S. S., & Kushwah, S. S. (2023). Analysis and prediction of plastic waste composite construction material properties using machine learning techniques. Environmental Progress & Sustainable Energy, e14094. https://doi.org/10.1002/ep.14094

Javed, U., Shaikh, F. U. A., & Sarker, P. K. (2022). Microstructural investigation of lithium slag geopolymer pastes containing silica fume and fly ash as additive chemical modifiers. Cement and Concrete Composites, 134, 104736. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104736

Jiang, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Ma, J., Xiao, R., Guo, F., & Huang, B. (2023). Influence of size effect on the properties of slag and waste glass-based geopolymer paste. Journal of Cleaner Production, 383, 135428. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135428

Kadhim, S., Çevik, A., Niş, A., Bakbak, D., & Aljanabi, M. (2022). Mechanical behavior of fiber reinforced slag-based geopolymer mortars incorporating artificial lightweight aggregate exposed to elevated temperatures. Construction and Building Materials, 315, 125766. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125766

Kalaycıklı, İ.E.(2020). Farklı geopolimer betonların dayanımlarının zamanla değişimi ve durabilitesi, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kalkan, Y.(2017). Farklı kür şartlarının Elazığ ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer betonların mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerine etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kanagaraj, B., Anand, N., Alengaram, U. J., & Jayakumar, G. (2023). Promulgation of engineering and sustainable performances of self-compacting geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 68, 106093. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106093

Kantarcı, F.(2013). Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kantarcı, F.(2018). Nano silis, mikro silis ve polimer katkılar içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması, *Doktora Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kantarcı, F., Türkmen, I., & Ekinci, E. (2019). Optimization of production parameters of geopolymer mortar and concrete: A comprehensive experimental study. Construction and Building Materials, 228, 116770. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116770

Karaaslan, C., Yener, E., Bağatur, T., Polat, R., Gül, R., & Alma, M. H. (2022). Synergic effect of fly ash and calcium aluminate cement on the properties of pumice-based geopolymer mortar. Construction and Building Materials, 345, 128397. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128397

Karadağ, S.(2021). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruf bazlı geopolimer betonların %5 sülfürik asit ortamında mekanik özelliklerinin ve kimyasal durabilitesinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karbassi, A., Mohebi, B., Rezaee, S., & Lestuzzi, P. (2014). Damage prediction for regular reinforced concrete buildings using the decision tree algorithm. Computers & Structures, 130, 46-56. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.10.006

Keklik, U.(2020). Silis dumanı içeren geopolimer betonların % 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. Journal of materials science, 42, 729-746. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4

Kim, G. W., Oh, T., Lee, S. K., Banthia, N., & Yoo, D. Y. (2023). Development of Ca-rich slag-based ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete (UHP-FRGC): Effect of sand-to-binder ratio. Construction and Building Materials, 370, 130630. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130630

Kim, H. J., & Khalid, H. R. (2022). The effects of calcium aluminate cement substitution on physicochemical properties of geopolymer–zeolite composites. Arabian Journal for Science and Engineering, 1-6. https://doi.org/10.1007/s13369-021-06394-w

Kocot, A., Ćwirzeń, A., Ponikiewski, T., & Katzer, J. (2021). Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortars with the Addition of PET Flakes. Materials, 14(21), 6274. https://doi.org/10.3390/ma14216274

Koleżyński, A., Król, M., & Żychowicz, M. (2018). The structure of geopolymers–Theoretical studies. Journal of Molecular Structure, 1163, 465-471. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.03.033

Köker, T.Ş.(2019). Hafif agrega katkılı geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde, Türkiye: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kuranlı, Ö.F.(2020). Farklı Bağlayıcı ve Lif İçeren Geopolimer Betonların Mekanik Ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Kurniadi, D., Abdurachman, E., Warnars, H. L. H. S., & Suparta, W. (2018, December). The prediction of scholarship recipients in higher education using k-Nearest neighbor algorithm. In IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 434, p. 012039). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/434/1/012039

Kurt, Z, Ustabaş, İ, Cakmak, T. Novel binder material in geopolymer mortar production: Obsidian stone powder. Structural Concrete. 2023; 24(4): 5600–5613. https://doi.org/10.1002/suco.202201089

Kuzmin, Y. V. (2017). The origins of pottery in East Asia and neighboring regions: An analysis based on radiocarbon data. Quaternary International, 441, 29-35. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.10.011

Kürklü, G. (2016). The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar. Composites part b: engineering, 92, 9-18. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.043

Kwami, M.I.A.(2020). Mikrodalga kürüne ilave hava kürü süresinin f sınıfı uçucu kül geopolimer dayanımı üzerindeki etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Lahoti, M., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2019). A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. Construction and Building Materials, 221, 514-526. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076

Li, C., Chai, X., Liu, H., Cheng, H., Jia, D., Di, L., ... & Jin, Y. (2022). Research on the Mechanical Properties and Microstructure of Modified Silt Sediment Geopolymer Materials. Gels, 8(12), 792. https://doi.org/10.3390/gels8120792

Li, Y., Shen, J., Lin, H., Li, H., Lv, J., Feng, S., & Ci, J. (2022). The data-driven research on bond strength between fly ash-based geopolymer concrete and reinforcing bars. Construction and Building Materials, 357, 129384. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129384

Liang, G., Zhu, H., Zhang, Z., & Wu, Q. (2019). Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer. Construction and Building Materials, 222, 872-881. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.200

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R news, 2(3), 18-22.

Liew, Y. M., Heah, C. Y., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. Progress in Materials Science, 83, 595-629. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002

Lin, H., Liu, H., Li, Y., & Kong, X. (2023). Effects of wood fiber on the properties of silicoaluminophosphate geopolymer. Journal of Building Engineering, 64, 105652. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105652

Lin, Y., Liao, Y., Yu, Z., Fang, S., & Ma, X. (2017). A study on co-pyrolysis of bagasse and sewage sludge using TG-FTIR and Py-GC/MS. Energy Conversion and Management, 151, 190-198. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.062

Ling, Y., Wang, K., Li, W., Shi, G., & Lu, P. (2019). Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. Composites Part B: Engineering, 164, 747-757. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092

Liu, J., & Lv, C. (2022). Durability of Cellulosic-Fiber-Reinforced Geopolymers: A Review. Molecules, 27(3), 796. https://doi.org/10.3390/molecules27030796

Liu, X., Zhao, X., Yin, H., Chen, J., & Zhang, N. (2018). Intermediate-calcium based cementitious materials prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: hydration characteristics and heavy metals solidification behavior. Journal of Hazardous Materials, 349, 262-271. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.072

Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N., & Shi, D. (2020). Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. Cement and Concrete Composites, 112, 103665. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103665

Lyon, R. E., Balaguru, P. N., Foden, A., Sorathia, U., Davidovits, J., & Davidovics, M. (1997). Fire-resistant aluminosilicate composites. Fire and materials, 21(2), 67-73. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1018(199703)21:2<67::AID-FAM596>3.0.CO;2-N

Ma, C. K., Awang, A. Z., & Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. Construction and Building Materials, 186, 90-102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111

Ma, H., & Wu, C. (2022). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-slag material under sustained moderate temperature effect. Cement and Concrete Composites, 134, 104744. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104744

MacKenzie, K. J., Smith, M. E., Wong, A., Hanna, J. V., Barry, B., & Barsoum, M. W. (2011). Were the casing stones of Senefru's Bent Pyramid in Dahshour cast or carved?: Multinuclear NMR evidence. Materials letters, 65(2), 350-352. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.10.035

Mahmoodi, O., Siad, H., Lachemi, M., Dadsetan, S., & Sahmaran, M. (2021). Development of normal and very high strength geopolymer binders based on concrete waste at ambient environment. Journal of Cleaner Production, 279, 123436. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123436

Mahmud, G.M.(2016). Effect of Molarity of NaOH on Strength of Geopolymer Mortar, *M.Sc. Thesis*. Gaziantep, Turkey: Hasan Kalyoncu University Graduate School of Natural and Applied Science.

Mallikarjuna Rao, G., & Gunneswara Rao, T. D. (2015). Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. Arabian journal for science and engineering, 40, 3067-3074. https://doi.org/10.1007/s13369-015-1757-z

Mamaseni, B.M.Z.(2021). Development and Properties of Pumice Based Geopolymer Incorporated Nanosilica with Sodium and Pottasium Based Activators at Various Rest Period, *M.Sc. Thesis*. Van, Türkiye: Van Yuzuncuyil University Institute of Natural and Applied Sciences.

Maraş, M.M.(2013). Elazığ Ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer çimentolu betonların sülfat direncinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Mashri, M. O. M., Johari, M. A. M., Ahmad, Z. A., & Mijarsh, M. J. A. (2023). Enhancing the properties of UPOFA-based geopolymer mortar via the incorporation of eggshell ash and silica fume. Journal of Building Engineering, 65, 105677. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105677

McCaffrey, R. (2002). Climate Change and the Cement Industry, Environmental overview. GCL Magazine, environmental special issue. London, UK: Cement Trends.

McNulty, E. (2009). Geopolymers: an environmental alternative to carbon dioxide producing ordinary Portland cement. Department of Chemistry, The Catholic University of America.

Merta, I., Poletanovic, B., Dragas, J., Carevic, V., Ignjatovic, I., & Komljenovic, M. (2022). The Influence of Accelerated Carbonation on Physical and Mechanical Properties of Hemp-Fibre-Reinforced Alkali-Activated Fly Ash and Fly

Ash/Slag Mortars. Polymers, 14(9), 1799. https://doi.org/10.3390/polym14091799

Mobasheri, F., Shirzadi Javid, A. A., Mirvalad, S., Azizi, S., & Mowlaei, R. (2022). Durability and mechanical properties of pumice-based geopolymers: a sustainable material for future. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 46(1), 223-235. https://doi.org/10.1007/s40996-021-00651-6

Mozgawa, W., & Deja, J. (2009). Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. Journal of Molecular Structure, 924, 434-441. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.12.026

Naenudon, S., Wongsa, A., Ekprasert, J., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2023). Enhancing the properties of fly ash-based geopolymer concrete using recycled aggregate from waste ceramic electrical insulator. Journal of Building Engineering, 68, 106132. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106132

Nath, S. K., & Kumar, S. (2013). Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. Construction and Building Materials, 38, 924-930. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.070

Nawar, A.(2018). Investigation of Investigation of Durability Properties of Geopolymer Containing Metakaolin-Based Geopolymers Mortar Production and Application in Construction, *M.Sc. Thesis*. İstanbul, Türkiye: Yıldız Technical University Graduate School of Natural and Applied Science.

Nazari, A., Bagheri, A., Sanjayan, J. G., Dao, M., Mallawa, C., Zannis, P., & Zumbo, S. (2019). Thermal shock reactions of Ordinary Portland cement and geopolymer concrete: Microstructural and mechanical investigation. Construction and Building Materials, 196, 492-498. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.098

Nguyen, K. T., Le, T. A., Lee, J., Lee, D., & Lee, K. (2017). Investigation on properties of geopolymer mortar using preheated materials and thermogenetic admixtures. Construction and Building Materials, 130, 146-155. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.110

Nguyen, M. H., Mai, H. V. T., Trinh, S. H., & Ly, H. B. (2023). A comparative assessment of tree-based predictive models to estimate geopolymer concrete compressive strength. Neural Computing and Applications, 35(9), 6569-6588. https://doi.org/10.1007/s00521-022-08042-2

Nyale, S. M., Babajide, O. O., Birch, G. D., Böke, N., & Petrik, L. F. (2013). Synthesis and characterization of coal fly ash-based foamed geopolymer. Procedia Environmental Sciences, 18, 722-730. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.04.098

Oluwafemi, J., Ofuyatan, O., Adedeji, A., Bankole, D., & Justin, L. (2023). Reliability assessment of ground granulated blast furnace slag/cow bone ash-based geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 64, 105620. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105620

Omur, T., Miyan, N., Kabay, N., Birol, B., & Oktay, D. (2023). Characterization of ferrochrome ash and blast furnace slag based alkali-activated paste and mortar. Construction and Building Materials, 363, 129805. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129805

Ou, Z., Feng, R., Mao, T., & Li, N. (2022). Influence of mixture design parameters on the static and dynamic compressive properties of slag-based geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 53, 104564. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104564

Oyebisi, S., Ede, A., Olutoge, F., & Omole, D. (2020). Geopolymer concrete incorporating agro-industrial wastes: Effects on mechanical properties, microstructural behaviour and mineralogical phases. Construction and Building Materials, 256, 119390. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119390

Örklemez, E.(2019). Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda diatomit ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öz, H. Ö., Güneş, M., & Yücel, H. E. (2023). Rheological and microstructural properties of FA+ GGBFS-based engineered geopolymer composites (EGCs) capable of comparing with M45-ECC as mechanical performance. Journal of Building Engineering, 65, 105792. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105792

Özcan, A.(2018). Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özer, C.(2018). Geopolimer harçların reolojik davranışı üzerinde zeolit etkisinin incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özsoy, A.(2021). Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Farklı Sıcaklık ve NaOH Oranlarında Diatomit İkamesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Kayseri, Türkiye: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. Construction and building Materials, 22(7), 1305-1314. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015

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

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. Cement and concrete research, 29(8), 1323-1329. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9

Paruthi, S., Husain, A., Alam, P., Khan, A. H., Hasan, M. A., & Magbool, H. M. (2022). A review on material mix proportion and strength influence parameters of geopolymer concrete: Application of ANN model for GPC strength prediction. Construction and Building Materials, 356, 129253. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129253

Peng, J., & Yan, Z. B. (2014). Recent research progress of geopolymer. China Non-metallic Mining Industry Herald, 1, 16-19.

Polat, B.(2019). Geopolimer harcın mikro organizmalar yardımıyla kendiliğinden iyileşmesinin araştırılması, *Doktora Tezi*, İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Prabha, V. C., Revathi, V., & Sivamurthy Reddy, S. (2022). Ambient cured high calcium fly ash geopolymer concrete with dolomite powder. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26(15), 7857-7877. https://doi.org/10.1080/19648189.2021.2012262

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier.

Provis, J. L., Duxson, P., Van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2005). The role of mathematical modelling and gel chemistry in advancing geopolymer technology. Chemical Engineering Research and Design, 83(7), 853-860. https://doi.org/10.1205/cherd.04329

Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. Journal of the Society of Chemical Industry, 59(9), 191-202.

Rajamane, N. P., Nataraja, M. C., Dattatreya, J. K., Lakshmanan, N., & Sabitha, D. (2012). Sulphate resistance and eco-friendliness of geopolymer concretes. Indian Concrete Journal, 86(1), 13.

Ranjbar, N., & Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. Cement and Concrete Composites, 107, 103498. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498

Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U. J., Metselaar, H. S. C., & Jumaat, M. Z. (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. Construction and building materials, 65, 114-121. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.064

Rasheed , A.A.(2019). Effect of Nano Silica and Steel Fiber on Fresh State and Mechanical Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete, *M.Sc. Thesis*. Gaziantep, Türkiye: Gaziantep University Graduate School of Natural and Applied Science.

Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements opportunities and challenges. Cement and concrete research, 29(2), 249-254. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00093-3

Sabir, B. B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Cement and concrete composites, 23(6), 441-454. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5

Salehi, H., & Mazloom, M. (2019). Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete. Construction and Building Materials, 222, 622-632. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.183

Shaikh, F. U. A. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. International Journal of Sustainable Built Environment, 5(2), 277-287. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.05.009

Sharma, A., Singh, P., & Kapoor, K. (2022). Utilization of recycled fine powder as an activator in fly ash based geopolymer mortar. Construction and Building Materials, 323, 126581. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126581

Shen, J., Li, Y., Lin, H., Li, H., Lv, J., Feng, S., & Ci, J. (2022). Prediction of compressive strength of alkali-activated construction demolition waste geopolymers using ensemble machine learning. Construction and Building Materials, 360, 129600. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129600

Sherwani, A. F. H., Younis, K. H., & Arndt, R. W. (2022). Fresh, Mechanical, and Durability Behavior of Fly Ash-Based Self Compacted Geopolymer Concrete: Effect of Slag Content and Various Curing Conditions. Polymers, 14(15), 3209. https://doi.org/10.3390/polym14153209

Shi, X., Zhang, C., Wang, X., Zhang, T., & Wang, Q. (2022). Response surface methodology for multi-objective optimization of fly ash-GGBS based geopolymer mortar. Construction and Building Materials, 315, 125644. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125644

Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. Construction and building materials, 85, 78-90. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036

Singh, P. S., Bastow, T., & Trigg, M. (2005). Structural studies of geopolymers by 29 Si and 27 Al MAS-NMR. Journal of materials science, 40, 3951-3961. https://doi.org/10.1007/s10853-005-1915-x

Singh, P., & Kapoor, K. (2022). Development of mix design method based on statistical analysis of different factors for geopolymer concrete. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 16(10), 1315-1335. https://doi.org/10.1007/s11709-022-0853-x

Sinha, A. K., & Talukdar, S. (2021). Enhancement of the properties of silicate activated ultrafine-slag based geopolymer mortar using retarder. Construction and Building Materials, 313, 125380. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125380

Sofuoğlu, T.(2022). Şeker Üretim Sürecinde Açığa Çıkan Pres Filtre Atığının Geopolimer Harç Üretiminde Kullanılması, *Doktora Tezi*. Eskişehir, Türkiye: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Solihin, S., Rizqiadi, A., & Handayani, I. (2020). An analysis of the formation mechanism of geopolymer made from obsidian mineral and its potential application as a slow release fertilizer. Analytical Sciences, 36(11), 1401-1405. https://doi.org/10.2116/analsci.20P182

Song, H., Ahmad, A., Farooq, F., Ostrowski, K. A., Maślak, M., Czarnecki, S., & Aslam, F. (2021). Predicting the compressive strength of concrete with fly ash admixture using machine learning algorithms. Construction and Building Materials, 308, 125021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125021

Spriggs, M., Reepmeyer, C., Lape, P., Neri, L., Ronquillo, W. P., Simanjuntak, T., & Tiauzon, A. (2011). Obsidian sources and distribution systems in Island Southeast Asia: a review of previous research. Journal of Archaeological Science, 38(11), 2873-2881. https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.06.015

Talling, B. (2002). Geopolymers give fire safety to cruise ships. Geopolymers 2002. Turn Potential into Profit.

Tan, J., Cai, J., Huang, L., Yang, Q., Mao, M., & Li, J. (2020). Feasibility of using microwave curing to enhance the compressive strength of mixed recycled aggregate powder based geopolymer. Construction and Building Materials, 262, 120897. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120897

Tanyildizi, H. (2021). Predicting the geopolymerization process of fly ash-based geopolymer using deep long short-term memory and machine learning. Cement and Concrete Composites, 123, 104177. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104177

Tanyildizi, H., & Yonar, Y. (2016). Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. Construction and Building Materials, 126, 381-387. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.001

Tekin, I. (2016). Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. Construction and Building Materials, 127, 607-617. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.038

Thang, X. N. (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2278-0181.

Tian, Z., Tang, X., Xiu, Z., Zhou, H., & Xue, Z. (2022). The mechanical properties improvement of environmentally friendly fly ash-based geopolymer mortar using bio-mineralization. Journal of Cleaner Production, 332, 130020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130020

Tokay, H.(2019). Vermikülit ve uçucu kül katkılı geopolimer harç üretilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Bartın, Türkiye: Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Topal, Ö.(2020). Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Toprak, M.U.(2011). Termik santral taban küllerinden alkali aktivasyon ile geopolimer üretilmesi, *Doktora Tezi*. Eskişehir, Türkiye: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Toufigh, V., & Jafari, A. (2021). Developing a comprehensive prediction model for compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete (FAGC). Construction and Building Materials, 277, 122241. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122241

TS EN 196-1 "Çimento Deney Metodları- Bölüm 1: Dayanım Tayini" Türk Standardları Enstitüsü.Ankara.2002.

Turhan, D.(2020). Perlit esaslı geopolimer betonda endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Erzurum, Türkiye: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Turkmen, I., Ekinci, E., Kantarci, F., & Karakoç, M. B., (2017). The Usage Of Nano And Polymer Additives In Geopolymer Concrete . 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17) (pp.3318-3326). Elazığ, Turkey

Tuyan, M.(2017). Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi, *Doktora Tezi*. İzmir, Türkiye: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Uğurlu, A.İ.(2020). Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine geri dönüştürülmüş agreganın etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*. Malatya, Türkiye: İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ulugöl, H., Günal, M. F., Yaman, İ. Ö., Yıldırım, G., & Şahmaran, M. (2021). Effects of self-healing on the microstructure, transport, and electrical properties of 100% construction-and demolition-waste-based geopolymer composites. Cement and Concrete Composites, 121, 104081. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104081

URL-1. (2023). Retrieved Haziran 3, 2023, from https:// www.kompozitshop.com/bazalt-fiber-kirpilmis-24mm

URL-2. (2023). Retrieved Haziran 3, 2023, from https:// https://www.zafercivi.com/tr/beton-donati-urunleri/celik-lif?p=14

URL-3. (2023). Retrieved Haziran 3, 2023, from https:// https://turkish.alibaba.com/product-detail/Polyvinyl-alcohol-pva-fiber-for-cement-1600492229583.html

Ustabaş, İ., & Kaya, A. (2018). Comparing the pozzolanic activity properties of obsidian to those of fly ash and blast furnace slag. Construction and Building Materials, 164, 297-307. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.185

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. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129718

Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2016). Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan. Construction and Building Materials, 114, 290-296. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.204

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Lukey, G. C. (2007). Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. Journal of hazardous materials, 139(3), 506-513. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.044

Venu, M., & Rao, T. G. (2017). Tie-confinement aspects of fly ash-GGBS based geopolymer concrete short columns. Construction and Building Materials, 151, 28-35. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.065

Vural, T.(2019). Atık külün geopolimer kompozit malzeme üretiminde kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde, Türkiye: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Wang, Q., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., Mohamed, A., & Vatin, N. I. (2022). Application of soft computing techniques to predict the strength of geopolymer composites. Polymers, 14(6), 1074. https://doi.org/10.3390/polym14061074

Wang, R., Shi, Q., Li, Y., Cao, Z., & Si, Z. (2021). A critical review on the use of copper slag (CS) as a substitute constituent in concrete. Construction and

Building Materials, 292, 123371. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123371

Wang, Y., Chan, C. L., Leong, S. H., & Zhang, M. (2020). Engineering properties of strain hardening geopolymer composites with hybrid polyvinyl alcohol and recycled steel fibres. Construction and Building Materials, 261, 120585. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120585

Weng, L., & Song, S. (2005). Development of Novel Cementious Geopolymers [J]. Materials Review, 19(2), 67-68.

White, C. E., Provis, J. L., Proffen, T., & van Deventer, J. S. (2012). Molecular mechanisms responsible for the structural changes occurring during geopolymerization: multiscale simulation. AIChE Journal, 58(7), 2241-2253. https://doi.org/10.1002/aic.12743

Xiao, S., Cai, Y., Guo, Y., Lin, J., Liu, G., Lan, X., & Song, Y. (2021). Experimental study on axial compressive performance of polyvinyl alcohol fibers reinforced fly ash—slag geopolymer composites. Polymers, 14(1), 142. https://doi.org/10.3390/polym14010142

Xie, Z., & Xi, Y. (2001). Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. Cement and Concrete Research, 31(9), 1245-1249. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3

Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International journal of mineral processing, 59(3), 247-266. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5

Xu, J., Kang, A., Wu, Z., Xiao, P., & Gong, Y. (2023). Evaluation of workability, microstructure and mechanical properties of recycled powder geopolymer reinforced by waste hydrophilic basalt fiber. Journal of Cleaner Production, 396, 136514. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136514

Yaddollahi, M.M.(2013). Hasankale pomzasından alkali aktivasyon yöntemiyle geopolimer çimentosunun üretilebilirliğinin araştırılması, *Doktora Tezi*. Erzurum, Türkiye: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yalghuz , M.R.(2020). Farklı tip malzemeler kullanılarak geopolimer harç üretimi ve dayanıklılığın incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir, Türkiye: Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yao, Z., & Ruzzo, W. L. (2006, March). A regression-based K nearest neighbor algorithm for gene function prediction from heterogeneous data. In BMC bioinformatics (Vol. 7, No. 1, pp. 1-11). BioMed Central. https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-S1-S11

Yegin, Y.(2020). Isparta Gölcük Yöresi Volkanik Külünden Üretilen Geopolimer Betonun Özelliklerinin Fabrika Atıkları ve Nano Malzemeler ile

İyileştirilmesi, *Doktora Tezi*. Erzurum, Türkiye: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yilmazoglu, A., Yildirim, S. T., Behçet, Ö. F., & Yıldız, S. (2022). Performance evaluation of fly ash and ground granulated blast furnace slag-based geopolymer concrete: a comparative study. Structural Concrete, 23(6), 3898-3915. https://doi.org/10.1002/suco.202100835

Yip, C. K., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. Cement and concrete research, 35(9), 1688-1697. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.042

Yolcu, F.(2019). Geopolimer yapı malzemesi üretiminde atık döküm kumu kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde, Türkiye: Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yonar, Y.(2014). Geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı, *Yüksek Lisans Tezi*. Elazığ, Türkiye: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

You, I., Seo, S., Kim, M., Lee, S. J., Lee, N., Lee, Y., & Yoo, D. Y. (2023). ASR potential of alkali-activated soda-lime glass powder in the absence of calcium sources. Cement and Concrete Composites, 139, 105027. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105027

Yu, P., Kirkpatrick, R. J., Poe, B., McMillan, P. F., & Cong, X. (1999). Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-infrared spectroscopy. Journal of the American Ceramic Society, 82(3), 742-748. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb01826.x

Zahid, M., Shafiq, N., Razak, S. N. A., & Tufail, R. F. (2020). Investigating the effects of NaOH molarity and the geometry of PVA fibers on the post-cracking and the fracture behavior of engineered geopolymer composite. Construction and Building Materials, 265, 120295. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120295

Zakira, U., Zheng, K., Xie, N., & Birgisson, B. (2023). Development of high-strength geopolymers from red mud and blast furnace slag. Journal of Cleaner Production, 383, 135439. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135439

Zeini, H. A., Al-Jeznawi, D., Imran, H., Bernardo, L. F. A., Al-Khafaji, Z., & Ostrowski, K. A. (2023). Random Forest Algorithm for the Strength Prediction of Geopolymer Stabilized Clayey Soil. Sustainability, 15(2), 1408. https://doi.org/10.3390/su15021408

Zhang, D., Yang, Z., Kang, D., Fang, C., Jiao, Y., Wang, K., & Mi, S. (2023). Study on the mechanism of Ca2+ and Na+ interaction during the hydration of multi-

source solid waste geopolymers. Journal of Building Engineering, 69, 106177. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106177

Zhang, J., Huang, Y., Aslani, F., Ma, G., & Nener, B. (2020). A hybrid intelligent system for designing optimal proportions of recycled aggregate concrete. Journal of Cleaner Production, 273, 122922. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122922

Zhang, M., Yao, Y., Zhang, J., Wang, L., Wang, F., Ma, Z., & Wang, B. (2023). Mechanical properties of hybrid fiber reinforced ternary-blended alkali-activated materials. Construction and Building Materials, 366, 129841. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129841

Zhang, Y., Chen, J., & Xia, J. (2022). Compressive Strength and Chloride Resistance of Slag/Metakaolin-Based Ultra-High-Performance Geopolymer Concrete. Materials, 16(1), 181. https://doi.org/10.3390/ma16010181

Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G., & Zheng, Y. (2021). Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. Journal of Cleaner Production, 307, 127085. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127085

Zhao, Q., Ma, C., Huang, B., & Lu, X. (2023). Development of alkali activated cementitious material from sewage sludge ash: Two-part and one-part geopolymer. Journal of Cleaner Production, 384, 135547. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135547

Zhou, H., Wang, X., Wu, Y., & Zhang, X. (2021). Mechanical properties and micro-mechanisms of marine soft soil stabilized by different calcium content precursors based geopolymers. Construction and Building Materials, 305, 124722. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124722