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

MERMER ATIĞI KATKILI VERMİKÜLİT- VOLLASTONİT-KALSİT GEOPOLİMERİ ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE YAPAY SİNİR AĞLARIYLA MODELLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İrem MİRZALOĞLU

Danışman
Prof. Dr. Murat YAYLACI

RİZE
2025

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Prof. Dr. Murat YAYLACI danışmanlığında, İrem MİRZALOĞLU tarafından hazırlanan *Mermer Atığı Katkılı Vermikülit- Vollastonit-Kalsit Geopolimeri Üretimi, Karakterizasyonu ve Yapay Sinir Ağlarıyla Modellenmesi* adlı bu tez çalışması 18/11/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir."

Jüri Üyeleri		**Ünvanı, Adı SOYADI**	**İmza**
Başkan	:	Prof. Dr. Murat YAYLACI	
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLI BİNGÖL	
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ	

ETİK BEYAN

İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Mermer Atığı Katkılı Vermikülit- Vollastonit- Kalsit Geopolimeri Üretimi, Karakterizasyonu ve Yapay Sinir Ağlarıyla Modellenmesi” 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.
18/11/2025

İrem MİRZALOĞLU

ÖN SÖZ

Bu tez çalışması, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yapılan çalışma kapsamında, mermer atığı katkılı vermikülit- vollastonit-kalsit geopolimeri üretimi yapılarak karakterizasyonu sağlanmış ve elde edilen veriler kullanılarak yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur.

Tez sürecinin her aşamasında bilgi, tecrübe ve rehberliğiyle bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Murat YAYLACI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarında desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Tahsin BOYRAZ'a da katkılarından dolayı minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Bu süreçte sevgi, sabır ve anlayışla her zaman yanımda olan sevgili eşim Fatih Sultan MİRZALOĞLU'na, hayatıma neşe ve güç katan oğlum Mete MİRZALOĞLU'na, her daim desteklerini hissettiğim beni yetiştiren anne ve babama yürekten teşekkür ederim.

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü birimince desteklenmiştir. Proje Numarası: FYL-2025-1828

İrem MİRZALOĞLU
RİZE/2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY I
ETİK BEYAN II
ÖN SÖZ III
ÖZET VIII
ABSTRACT IX
KISALTMALAR X
TABLOLAR LİSTESİ XI
ŞEKİLLER LİSTESİ XII
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Geopolimer 3
1.1.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Ürünler 6
1.1.1.1. Metakaolin 7
1.1.1.2. Uçucu Kül 9
1.1.1.3. Vermikülit 10
1.1.1.4. Vollastonit 11
1.1.1.5. Kalsit 13
1.1.1.6. Mermer Atığı 14
1.1.2. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Alkali Aktivatörler 15
1.1.2.1. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) 15
1.1.2.2. Sodyum Hidroksit 15
1.1.2.3. Potasyum Hidroksit (KOH) 16
1.2. Makine Öğrenmesi 16
1.2.1. Makine Öğrenmesi Model Geliştirme Süreci 18
1.2.2. Model Performansının Değerlendirilmesi 19
1.2.3. Makine Öğrenmesi Algoritmaları 20
1.2.3.1. Denetimli Öğrenme Algoritmaları 20
1.2.3.1.1. Yapay Sinir Ağları (YSA) 24
1.2.3.1.1.1. Yapay Sinir Ağ Modelleri 25
1.3. Literatür Özeti 28

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 38
2. MATERYAL VE METOT 39
2.1. Geopolimer Harçların Üretimi ve Karakterizasyonu 39
2.1.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler 40
2.1.1.1. Mermer Tozu Atığı 40
2.1.1.2. Kalsit 40
2.1.1.3. Vermikülit 40
2.1.1.4. Vollastonit 41
2.1.1.5. Alkali Aktivatör 41
2.1.1.6. Çimento 41
2.1.1.7. Agrega 42
2.1.2. Geopolimer Harç Karışım Oranları ve Üretim Süreci 42
2.1.2.1. Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi 45
2.1.3. Numunelere Uygulanan Test ve Deneyler 48
2.1.3.1. Fiziksel Deneyler 48
2.1.3.1.1. Ağırlık Kaybı Deneyi 48
2.1.3.1.2. Su Emme Deneyi 48
2.1.3.1.3. Yoğunluk Deneyi 49
2.1.3.1.4. Porozite Deneyi 49
2.1.3.2. Mekanik Deneyler 50
2.1.3.2.1. Üç Nokta Eğme Dayanımı Deneyi 50
2.1.3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi 51
2.1.3.3. Yapısal Analizler 51
2.1.3.3.1. FT-IR 51
2.1.3.3.2. XRD 52
2.1.3.3.3. SEM- EDS 53
2.2. Geopolimer Harçların Dayanımlarının Makine Öğrenmesi ile Modellenmesi 54
2.2.1. Veri Seti ve Parametreler 54
2.2.2. Yapay Sinir Ağı Yapısı 56
2.2.3. Performans Kriterleri 57
2.2.4. Yapay Sinir Ağı Modeli Oluşturulması 57

3. BULGULAR VE TARTIŞMA 61
3.1. Geopolimer Harçlar 61
3.1.1. Fiziksel Deneyler 61
3.1.1.1. Ağırlık Kaybı 61
3.1.1.3. Su Emme 68
3.1.1.4. Deneysel Yoğunluk 71
3.1.1.5. Porozite Deneyi 74
3.1.2. Mekanik Deney Sonuçları 78
3.1.2.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları 78
3.1.2.2. Basınç Dayanımı Sonuçları 82
3.1.3. Yapısal Analizlerin Değerlendirilmesi 89
3.1.3.1. FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi 89
3.1.3.2. XRD Analizlerinin Değerlendirilmesi 94
3.1.3.2.1. Mermer Atığı 94
3.1.3.2.2. Kalsit 95
3.1.3.2.3. Vermikülit 96
3.1.3.2.4. Vollastonit 97
3.1.3.2.5. VKW-5M:1.5 98
3.1.3.2.6. 20C-15M:2.5 98
3.1.3.3. SEM-EDS Analizlerinin Değerlendirilmesi 101
3.1.3.3.1. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Numune SEM Analizi 102
3.1.3.3.2. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Numune SEM Analizi 103
3.1.3.3.3. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Numune EDS Analizi 105
3.1.3.3.4. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Numune EDS Analizi 106
3.2. Yapay Sinir Ağı Modeli Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 108
3.2.1. Model Performansının Değerlendirilmesi 108
3.2.1.1. YSA Modelinin Tekrarlanan Denemelerde Performansı 108
3.2.1.2. Nöron Sayısına Göre Performans Analizi 112
3.2.1.3. Regresyon Performans Analizi 113
3.2.1.4. Gerçek- Tahmin ve Hata Analizleri 115
3.2.1.5. Duyarlılık Analizi 116
3.2.2. Literatür Karşılaştırması ve Genel Değerlendirme 118

4. SONUÇLAR 120
4.1. Deneysel çalışmalar 120
4.2. Yapay Sinir Ağı (YSA) Analizi 121
4.3. Gelecek Çalışmalar İçin Tavsiye ve Öneriler 122
KAYNAKÇA 123

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Prof. Dr. Murat YAYLACI
Hazırlayan : İrem MİRZALOĞLU
Yıl : 2025
Sayfa Sayısı : 143

ÖZET

MERMER ATIĞI KATKILI VERMİKÜLİT- VOLLASTONİT- KALSİT GEOPOLİMERİ ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE YAPAY SİNİR AĞLARIYLA MODELLENMESİ

Bu çalışmada mermer atığı katkılı vermikülit–vollastonit–kalsit esaslı geopolimerlerin üretimi yapılarak mekanik ve mikro yapısal özellikleri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, farklı NaOH molariteleri (5, 10, 15 M), Na_2SiO_3/NaOH oranları (1.5, 2.0, 2.5) ve kalsine mermer atığı ikame oranları (%0, %10, %20) kullanılarak toplam 27 farklı geopolimer harç numunesi hazırlanmıştır. Numuneler kalıptan alındıktan sonra 75°C'de 24 saat ısıl kür işlemine tabi tutulmuş, ardından ortam koşullarında 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerini tamamlayan numuneler üzerinde fiziksel, mekanik ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, deneysel olarak elde edilen eğilme dayanımı verileri kullanılarak bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli geliştirilmiş; modelin tahmin performansı, duyarlılık analizi, regresyon analizi, korelasyon katsayısı ve hata parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Deneysel bulgulara göre, en yüksek basınç dayanımı (7.426 MPa) 28 günlük kür sonunda 10C–15M:2.5 numunesinde elde edilmiştir. NaOH molaritesi ve Na_2SiO_3/NaOH oranındaki artışın mekanik ve fiziksel özellikleri genel olarak iyileştirdiği belirlenmiştir. Kalsine mermer atığı ikamesinin %10 seviyesinde (10C serisi) dayanımı artırdığı, ancak %20 seviyesinde (20C serisi) basınç dayanımlarında düşüşe yol açtığı gözlemlenmiştir.

Geliştirilen YSA modelinin eğilme dayanımını (R^2 = 0.9747) yüksek doğrulukta tahmin ettiği tespit edilmiştir. Duyarlılık analizi sonuçlarına göre, eğilme dayanımı üzerinde en etkili değişkenin kürleme süresi (%62.75) olduğu; bunu NaOH molaritesi (%25.55), Na_2SiO_3/NaOH oranı (%6.74) ve CaO katkı oranının (%4.96) izlediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Vermikülit, Vollastonit, Kalsit, Mukavemet, Yapay Sinir Ağları

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies
Department : Civil Engineering
Thesis Type : Master Thesis
Supervisor : Prof. Dr. Murat YAYLACI
Author : İrem MİRZALOĞLU
Year : 2025
Pages : 143

ABSTRACT

PRODUCTİON AND CHARACTERIZATION OF VERMICULITE-WOLLASTONITE-CALCITE GEOPOLYMER WITH MARBLE WASTE ADDITIVES AND MODELING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

In this study, vermiculite-wollastonite-calcite-based geopolymers containing marble waste were produced and their mechanical and microstructural properties were comprehensively investigated. In the first phase of the study, a total of 27 different geopolymer mortar samples were prepared using different NaOH molarities (5, 10, and 15 M), Na_2SiO_3/NaOH ratios (1.5, 2.0, and 2.5), and calcined marble waste replacement ratios (0%, 10%, and 20%). After removing the samples from the molds, they were subjected to a 24-hour heat cure at 75°C. Physical, mechanical, and structural analyses were then performed on the samples after 7, 14, and 28 days of curing under ambient conditions.

In the second phase of the study, an Artificial Neural Network (ANN) model was developed using experimentally obtained flexural strength data. The model's predictive performance was evaluated through sensitivity analysis, regression analysis, correlation coefficient, and error parameters. According to experimental findings, the highest compressive strength (7.426 MPa) was obtained in the 10C–15M:2.5 sample after 28 days of curing. It was determined that increasing the NaOH molarity and the Na_2SiO_3/NaOH ratio generally improved the mechanical and physical properties. It was observed that substitution of calcined marble waste increased the strength at the 10% level (10C series), but decreased the compressive strength at the 20% level (20C series).

The developed ANN model was found to predict flexural strength (R^2 = 0.9747) with high accuracy. Sensitivity analysis results indicated that the most effective variable on flexural strength was the curing time (62.75%), followed by NaOH molarity (25.55%), Na_2SiO_3/NaOH ratio (6.74%), and CaO addition ratio (4.96%).

Keywords: Geopolymer, Vermiculite, Wollastonite, Calcite, Strength, Artificial Neural Networks

KISALTMALAR

cm	:	Santimetre
CO2	:	Karbondioksit
ÇLR	:	Çoklu Lineer Regresyon
DVM	:	Destek Vektör Makineleri
EDS	:	Enerji Dağılımlı Görünge Gözlemi
FFANN	:	Feed-Forward Artificial Neural Network
FTIR	:	Fourier Dönüşümlü Kizilötesi Spektrometresi
GB	:	Gradyan artırma
KA	:	Karar Ağaçları
K-NN	:	K-En Yakın Komşu
LR	:	Lineer Regresyon
MAE	:	Ortalama mutlak hata
MAPE	:	Ortalama mutlak yüzde hata
mm	:	Milimetre
MPa	:	Megapascal
N	:	Kuvvet
R	:	Korelasyon katsayısı
R^2	:	Determinasyon Katsayısı
RMSE	:	Ortalama kare hata
RO	:	Rastgele Orman
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
vd.	:	Ve diğerleri
XGBoost	:	Aşırı gradyan artırma
XRD	:	X-Işını Difraktometresi
YSA	:	Yapay Sinir Ağı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Geopolimer üretiminde kullanılan hammaddeler.....6
Tablo 2. Geopolimer üretiminde kullanılan atık malzemeler.....7
Tablo 3. Kullanılan alkali aktivatörlerin özellikleri 41
Tablo 4. Deneylerde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri 42
Tablo 5. Geopolimer kuru malzeme karışım oranları 43
Tablo 6. Numunelerin oluşturulmuş reçeteleri ve kodları.....46
Tablo 7. Yapay Sinir Ağı Modeli data parametreleri.....55
Tablo 8. Geopolimer harç numunelerin kür gün sayılarına göre % ağırlık kaybı.....61
Tablo 9. Geopolimer harç numune relatif yoğunluk analizi.....65
Tablo 10. Geopolimer harç numune su emme deneyi sonuçları 68
Tablo 11. Geopolimer harç numune yoğunluk deneyi sonuçları.....71
Tablo 12. Porozite deneyi sonuçları 74
Tablo 13. Geopolimer harç numune eğilme dayanımı deney sonuçları 79
Tablo 14. Geopolimer harç numune basınç dayanımı değerleri.....83
Tablo 15. Geopolimer harç numuneler EDS sonuçları 107
Tablo 16. Model parametre değerleri 109
Tablo 17. Model performans değerleri.....111
Tablo 18. En iyi modelin farklı veri setlerinde performansı 111
Tablo 19. En başarılı nöron yapıları.....113
Tablo 20. Düşük performans gösteren yapılar 113
Tablo 21. Bağımsız değişkenlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi.....116
Tablo 22. YSA literatür örnekleri 119

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Geopolimer oluşum reaksiyonları 4
Şekil 2. Geopolimerizasyon reaksiyon aşamaları.....5
Şekil 3. Sialat Si-O-Al-O ‘nin dörtyüzlü (tetrahedral) gösterimi 5
Şekil 4. Metakaolin oluşumu.....8
Şekil 5. Ham vermikülit ve Isıl İşlem İle Açılmış Vermikülit 10
Şekil 6. Vollastonitin parçacık morfolojisi (a), vollastonitin kristal yapısı (b)..... 12
Şekil 7. Kalsit Yapısı 13
Şekil 8. Sodyum Silikat (a), sodyum hidroksit (b), potasyum hidroksit (c) 16
Şekil 9. Makine öğrenmesi model oluşum şeması 20
Şekil 10. Rastgele orman algoritma yapısı 21
Şekil 11. Karar ağaçları algoritması şematik gösterimi.....21
Şekil 12. Gradien boosting algoritmasının şematik gösterimi 22
Şekil 13. XGBoost algoritmasının çalışma mekanizması 22
Şekil 14. K-En yakın komşu algoritma hesap adımları 23
Şekil 15. Biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir ağı. 24
Şekil 16. Yapay sinir ağı genel katman yapısı 25
Şekil 17. Tek katmanlı algılayıcı mekanizması 25
Şekil 18. İleri beslemeli sinir ağ yapısı 26
Şekil 19. Geri beslemeli yapay sinir ağı.....27
Şekil 20. Deneysel tasarım akış diyagramı.....39
Şekil 21. Kalsine edilmemiş vermikülit (a), kalsine edilmiş vermikülit (b) 40
Şekil 22. Sodyum silikat ve Sodyum hidroksit görseli.....41
Şekil 23. Harç numunelerde kullanılan ince sıva kumu 42
Şekil 24. Hassas terazi.....43
Şekil 25. Öğütme ve karıştırma işleminin gerçekleştirildiği alümina bilyalı değirmen 43
Şekil 26. Deneysel çalışmalarda ısıl işlemler için kullanılan etüv. 44
Şekil 27. Deneysel çalışmalarda kalsinasyon için kullanılan fırın. 44
Şekil 28. Mekanik deneyler için hazırlanan numuneler; basınç deneyi numunesi (a), eğme deneyi numunesi (b)..... 47

Şekil 29. Etüve yerleştirilen numuneler 47
Şekil 30. Deneysel çalışmalarda numune boyut ölçümlerinde kullanılan kumpas 48
Şekil 31. Arşimed deney düzeneği. 49
Şekil 32. 3 nokta eğme ve basma dayanımı test cihazı 50
Şekil 33. Kullanılan FT-IR cihaz 52
Şekil 34. XRD Rigaku / Smart Lab X-Işınları cihazı 52
Şekil 35. Jeol JSM-6610 SEM cihazı 53
Şekil 36. Numune kaplama cihazı (a), SEM analizi cihazı (b) 53
Şekil 37. YSA modellemesinde kullanılan veri seti 55
Şekil 38. Tanımlanan YSA Modelinin Blok Diyagramı.....57
Şekil 39. Yapay sinir ağı MATLAB program kodları 1.....58
Şekil 40. Yapay sinir ağı MATLAB program kodları 2.....59
Şekil 41. MATLAB program görüntüsü 60
Şekil 42. Na_2SiO_3/NaOH =1.5 geopolimer harç numune % ağırlık kayıpları.....62
Şekil 43. Na_2SiO_3/NaOH =2 geopolimer harç numune % ağırlık kayıpları.....63
Şekil 44. Na_2SiO_3/NaOH =2.5 geopolimer harç numune % ağırlık kayıpları.....63
Şekil 45. Geopolimer harç numunelerin kür gün sayılarına göre % ağırlık kaybı 64
Şekil 46. Na_2SiO_3/NaOH=1.5 geopolimer harç numune % relatif yoğunluk.....66
Şekil 47. Na_2SiO_3/NaOH=2 geopolimer harç numune % relatif yoğunluk.....66
Şekil 48. Na_2SiO_3/NaOH=2.5 geopolimer harç numune % relatif yoğunluk.....67
Şekil 49. Geopolimer harç numunelerin % relatif yoğunlukları 67
Şekil 50. Na_2SiO_3/NaOH=1.5 geopolimer harç numune % su emme değerleri.....69
Şekil 51. Na_2SiO_3/NaOH = 2 geopolimer harç numune su emme değerleri 69
Şekil 52. Na_2SiO_3/NaOH = 2.5 geopolimer harç numune su emme değerleri 70
Şekil 53. Geopolimer harç numune su emme değerleri 70
Şekil 54. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 deneysel yoğunluk grafiği 72
Şekil 55. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 deneysel yoğunluk grafiği 72
Şekil 56. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 deneysel yoğunluk grafiği 73
Şekil 57. Geopolimer harç numunelerinin deneysel yoğunluk grafiği.....73
Şekil 58. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 % porozite grafiği.....75
Şekil 59. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 % porozite grafiği.....76
Şekil 60. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 % porozite grafiği.....76

Şekil 61. Geopolimer harç numune % porozite grafiği 77
Şekil 62. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 Eğilme dayanımı grafiği.....80
Şekil 63. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 Eğilme dayanımı grafiği.....80
Şekil 64. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 Eğilme dayanımı grafiği.....81
Şekil 65. Geopolimer harç numuneleri eğilme dayanımı grafiği 82
Şekil 66. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 basınç dayanımı değerleri.....84
Şekil 67. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 basınç dayanımı değerleri.....84
Şekil 68. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 basınç dayanımı değerleri.....85
Şekil 69. Geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri 86
Şekil 70. Na_2SiO_3 / NaOH – Basınç Dayanımı grafiği.....87
Şekil 71. NaOH Molaritesi-Basınç Dayanımı grafiği 88
Şekil 72. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Örneği FT-IR Spektrumu 90
Şekil 73. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Örneği FT-IR Spektrumu 92
Şekil 74. 20C-15M:2.5 Ve VKW-5M:1.5 Geopolimer harç örnekleri FT-IR spektrumu 94
Şekil 75. Mermer atığı XRD grafiği.....95
Şekil 76. Kalsit XRD grafiği 96
Şekil 77. Vermikülit XRD grafiği.....97
Şekil 78. Vollastonit XRD grafiği.....97
Şekil 79. VKW-5M:1.5 geopolimer harç XRD grafiği 98
Şekil 80. 20C-15M:2.5 geopolimer harç XRD grafiği 100
Şekil 81. VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 XRD analiz karşılaştırması.....101
Şekil 82. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numune SEM görüntüsü 102
Şekil 83. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Numune SEM, EDS, Mapping görüntüleri 102
Şekil 84. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Numune EDS görüntüleri 103
Şekil 85. 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune SEM, EDS, Mapping görüntüleri 103
Şekil 86. VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune SEM görüntüleri 104
Şekil 87. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numune Mapping görüntüsü 105
Şekil 88. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numune EDS görüntüsü 105

Şekil 89. 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune Mapping görüntüsü.....106
Şekil 90. 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune EDS görüntüsü.....107
Şekil 91. Geopolimer harç numune genel EDS görüntüleri; (a): VKW-5M:1.5 108
Şekil 92. Model performans grafiği.....108
Şekil 93. Model parametre grafikleri.....110
Şekil 94. Regresyon analiz grafikleri 114
Şekil 95. Gerçek ve tahmin değerleri analizi.....115
Şekil 96. Tahmin hata dağılımı grafiği 116
Şekil 97. Duyarlılık analizi grafiği 117

GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte sanayileşmedeki artış çevresel sorunlara sebep olmaktadır. Tüketilen kaynaklar sonucunda atmosfere salınan sera gazları karbon ayak izi oluşturarak küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe kullanılan geleneksel Portland Çimentosu üretimi sırasında büyük bir enerji gerekmekte ve yüksek miktarda karbon emisyonu açığa çıkmaktadır. Bu durum sürdürülebilir çevreci inşaat malzemelerini merak konusu haline getirerek araştırmacıları geleneksel portland çimentosuna alternatif arayışına yöneltmektedir.

Geopolimerler çevre dostu oluşu, yüksek mekanik dayanımları, kimyasal dayanılıkları ve düşük enerji tüketimi ile dikkat çekmektedir. Farklı birçok bağlayıcı malzeme ile oluşturulabilmeleri kullanım alanlarını genişletmektedir. Atık malzemelerin , özellikle sanayi faaliyetleri ile ortaya çıkan atıkların, bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliği geopolimerleri araştırmaya ve geliştirmeye teşvik etmektedir. Endüstriyel atıkların geopolimer üretiminde kullanılması çevresel olduğu kadar ekonomik avantajlarda sunmaktadır. Uçucu kül, cüruf gibi atık malzemeler oldukça sık araştırmalara konu olmaktadır.

Geopolimerler geniş bağlayıcı malzeme seçeneği ve farklı alkali aktivatör kullanımına inkan tanımaktadır. Alkali aktivatörlerin derişimleri, karışım oranları, türü ve farklı bağlayıcılarla girdikleri tepkimeler her kombinasyon için farklı sonuçlar verebilmektedir. Çok sayıda değişken barındırmaları geopolimerlerin deneysel yöntemlerle optimizasyonunun zaman almasına ve maliyetli olmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar geopolimerlerin davranışlarını yapay sinir ağları ile tahmin etmeye yönelmektedir. Yapay sinir ağı modelleri karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilmede yüksek doğruluk oranları sunabilmektedir.

Bu tez çalışmasında mermer atığı katkılı vermikülit-vollastonit-kalsit bazlı geopolimerlerin üretimleri gerçekleştirilerek mekanik ve mikro yapısal karakterizasyonları yapılmıştır. İlk aşamada 27 farklı bileşene sahip geopolimer 3 farklı kür gün sürelerinde kürlenerek üretilmiştir. İkinci aşamada elde edilen deneysel veriler yapay sinir ağı modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışma, hem

sürdürülebilir malzeme geliştirilmesine katkı sağlamayı hem de yapay zekâ destekli modelleme tekniklerinin geopolimer araştırmalarına entegrasyonunu amaçlamaktadır.

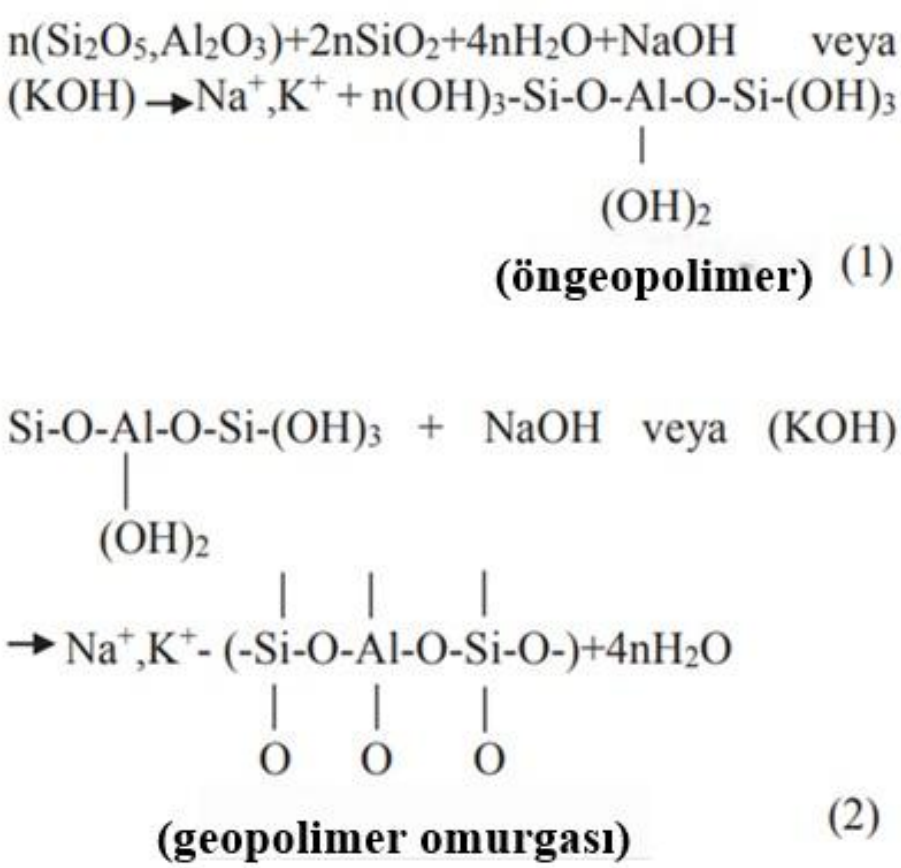
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Geopolimer

Geopolimer bir alkali aktivatör ve alüminosilikat bağlayıcı malzemenin bir dizi reaksiyon geçirmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. İnorganik polimerik malzemelerdir ve Portland çimentosuna alternatif olarak kullanılmaktadır (Madani vd.,2020) .Çimentosuz beton üretiminde kullanılan geopolimerler genellikle amorf alüminosilikatlardan oluşmaktadır ve çevreci oluşuyla ön pana çıkmaktadır. Geopolimer beton farklı malzemelerin kullanılabildiği geniş bir çalışma ve araştırma alanına sahiptir. Genellikle doğal mineraller, işlem görmüş metakaolin gibi mineraller, uçucu kül yüksek fırın cürufu gibi atık malzemelerden oluşmaktadır (Fernández Pereira vd., 2009; Alvarez-Ayuso vd., 2008).

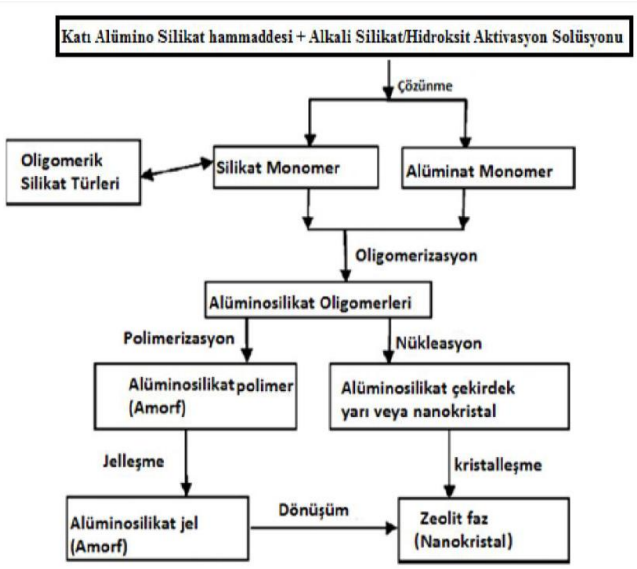
Glukhovsky geopolimerlerle ilgili çalışmaların temelini 1950'li yıllarda atmıştır (Provis & van Deventer, 2014). II. Dünya Savaşı sonrası Portland çimentosuna ulaşım sıkıntısı Glukhovsky ve arkadaşlarını çözüm arayışına yöneltmiştir. Glukhovsky bu soruna yüksek fırın cürufu kullanarak çözüm üretmiş ve analizler ortaya çıkan yeni malzemenin oldukça dayanıklı olduğunu ortaya koymuştur (Duxon ve ark. 2007). Bu bağlayıcı sistemi "toprak silikatları" ve "toprak çimentoları" olarak adlandırmıştır (Provis ve Van Deventer, 2014).. Silikat minerallerinin sodyum ve potasyum gibi alkali metaller ile reaksiyona girmesi sonucu bağlayıcı malzemeler oluşabileceğini öne sürmüştür (Davidovits, 2008). Gulkovski bu mekanizmayı üç bölümde gruplandırmıştır; (1) yıkım- koagülasyon; (2) koagülasyon- kondenzasyon; (3) kondenzsayon- kristalizasyon (Duxon ve ark. 2007b).

Davidovits (1978) ise ilk olarak alümina-silikat ağ yapısına sahip malzemeleri geopolimer olarak adlandırmıştır. Ayrıca yaptığı araştırmalar sonucunda cüruf ve metakaolin temelli geopolimerlerin yapısal dayanım ve dayanıklılık bakımından en üstün kompozitler olduğunu ileri sürmüştür (Davidovits, J., 1994). Davidovits'in açıkladığı yüksek alkali koşullar altında alümina-silikat oksitler arasında gerçekleşen reaksiyonlar sırası ile Şekil 1'de görülmektedir.



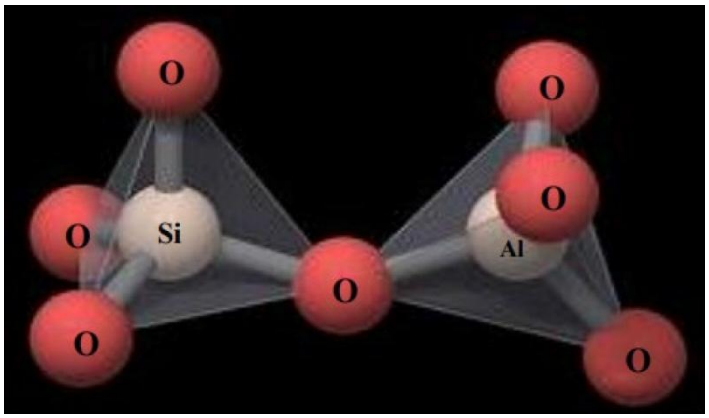
Şekil 1. Geopolimer oluşum reaksiyonları

Kimyasal tepkimelerin yapısı incelendiğinde bileşiminde silisyum ve alüminyum olan her bağlayıcı malzemenin alkali bir ortamda geopolimerizasyonu gerçekleştirebileceği görülmektedir. Geopolimerizasyon üç aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada alkali ortamda hammaddelerin çözünmesi gerçekleşmektedir. Çözünme sonucunda silikat ve alüminat monomerleri oluşmaktadır. Daha sonra bu monomerler alüminosilikat oligomerleri oluşturmaktadır. Bu olaya oligomerizasyon denmektedir. Alüminosilikat oligomerlerinin bir kısmı polimerizasyon tepkimeleri geçirerek alüminosilikat polimeri oluşturur. Bu amorf bir yapıdır ve jelleşerek alümino silikat jelini oluşturur. Bu oluşum üretim sırasında gözle görülmektedir. Alüminosilikat oligomerlerinin bir kısmı ise nükleasyon sonucu çekirdekleşir veya nanokristal yapıları oluşturur. En son bu yapıların kristalleşmesi ile ise zeolit faz (nanokristal) geopolimer ortaya çıkar (Kantarcı, 2013). Şekil 2 de geopolimerizasyon süreci şematik bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2. Geopolimerizasyon reaksiyon aşamaları (Kantarcı, 2013)

Geopolimerizasyon sırasında oluşan uzun zincirli Al-O-Si oligomerleri (Şekil 3) başarılı bir geopolimerizasyonun en önemli basamağıdır. Alüminosilikat içeren bağlayıcı malzeme belirli derişimlerde hazırlanan alkali aktivatör içerisinde çözünmektedir. Jel fazına geçen bu karışım sertleştikçe çözünmüş haldeki alüminosilikat parçacıklar birbirleri ile bağ oluşturmaktadır. Oluşan bağın uzunluğu alkali aktivatör içerisinde malzemenin ne kadar iyi çözündüğü ile alakalıdır. Bu da çözünme basamağını geopolimerizasyonun en önemli basamağı haline getirmektedir (Xu ve van Deventer 2000). Çözünme miktarı bağlayıcı malzeme miktarına, bileşimine ve alkali aktivatör pH'ına bağlıdır.



Şekil 3. Sialat Si-O-Al-O 'nin dörtyüzlü (tetrahedral) gösterimi (Thang, 2016)

Yapı malzemesi olarak geopolimerlerin ön plana çıkışı mekanik özelliklerini araştırma konusu haline getirmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde geopolimerizasyon sürecinin ürünlerin bileşimi, silikat/yüzey oranı, kür süresi ve sıcaklığı, alkali aktivatör derişimi gibi etkenlere bağlı olduğu görülmektedir (Palomo *vd.*, 2011).

1.1.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Ürünler

Yapısı gereği geopolimerizasyon tepkimeleri alüminyum ve sislisyum içeren tüm malzemelerin alkali koşullar altında geopolimer oluşturabileceğini göstermektedir. Geopolimer harç üretimi sırasında bağlayıcı, aktivatör ve agrega olarak kullanılan malzemelerin kimyasal içeriği ve karışım oranlarındaki değişim farklı yapısal özelliklerde geopolimerleri oluşturmaktadır. Bu durum geopolimer üretiminde çok sayıda farklı malzeme kullanımına imkan tanımaktadır. Literatürde bu alanda çalışılmış birçok hammadde ve atık bulunmaktadır. Geopolimer alanında yapılan çalışmalarda bağlayıcı olarak yaygın kullanılan bazı hammaddeler Tablo 1 ‘de görülmektedir.

Tablo 1. Geopolimer üretiminde kullanılan hammaddeler

Hammadde İsmi
Doğal Zeolit
Pomza
Vermikülit
Bazalt
Bor
Kaolin
Volkanik Tüf
Bazalt
Vollastonit
Kaolin Kili (Metakaolin olarak)

Çimento üretiminden kaynaklı karbon ayak izini azaltmasının yanı sıra atık malzemelerin geri dönüşümü için geniş bir alana sahip oluşu geopolimerlerin çevreci

yönünü güçlendirmektedir. Özellikle yapısında silis ve alüminyum içeren atık malzemeler bağlayıcı malzeme olarak büyük bir potansiyel taşımaktadır. İkincil bağlayıcı malzeme veya ikame katkı olarak ise çoğu atık malzeme deneysel çalışmalarda yine ilgi odağı olmaktadır. Güçlü bir alüminasilikat zincirinin başarılı bir geopolimerizasyon ve iyi bir dayanım sağladığı bilinmektedir. Öte yandan üretilen harç ve betonların durabilitesi, fiziksel özellikleri çoğu atık malzemeyi çalışma konusu haline getirmektedir. Tablo 2'de geopolimer alanında geri dönüşüm amacıyla kullanılan bazı atık malzemeler görülmektedir.

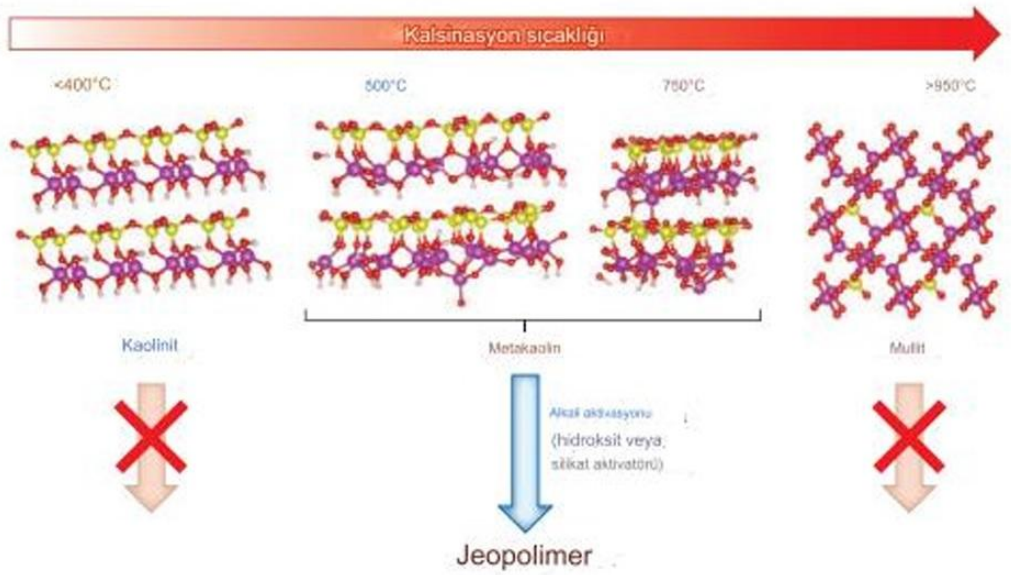
Tablo 2. Geopolimer üretiminde kullanılan atık malzemeler

Atık Malzeme İsmi
Uçucu Kül
Yüksek Fırın Cürufu
Atık Cam
Tuğla Tozu
İnşaat Yıkıntı Atığı
Seramik Atığı
Atık Lastik
Atık Mermer Tozu

Aşağıda geopolimer üretiminde oldukça yaygın kullanılan metakaolin, uçucu kül ve çalışma kapsamında kullanılan malzemeler hakkında genel bilgiler verilmektedir.

1.1.1.1. Metakaolin

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin kalsinasyonu ile üretilen beyaz renkli puzolanik bir malzemedir. Yaklaşık 500–800 ºC sıcaklıklarda kalsine edilen kaolin kilinin yapısından %14 oranında hidroksil suyu ayrılmaktadır (Kostuch vd., 1993; Yazıcı vd., 2010). Bu yöntemle aktive edilmiş yarı-kararlı haldeki metakaolin çimento ve kireç ile reaksiyona girebilmektedir. Ancak kalsinasyon sıcaklığı 900 C° üzerinde olduğunda kimyasal içeriğinin belirsizleşerek puzolanik özelliğini kaybetmektedir (Gültekin, 2014). Şekil 4'te kaolinden metakaolin oluşum süreci görülmektedir.



Şekil 4. Metakaolin oluşumu (Provis ve Bernal, 2014)

Metakaolinin bağlayıcı olarak çimento harcında kullanımı oldukça eskiye dayanmaktadır (Kandil, 2021).Kimyasal bileşeni sayesinde kalsiyum hidroksit ile birleşerek hidratlar oluşturan metakaolin betonun karakteristiğini olumlu etkilemektedir (Zhang ve Malhotra, 1995; Siddique ve Kalus, 2009; Khatib ve Hibbert, 2005). Yapılan araştırmalarda metakaolinin çimento ile birlikte beton üretiminde kullanımının betonun mekanik dayanımını artırdığı, buna ilaveten daha geçirimsiz bir beton yapısı oluşturarak betonun durabilite özelliklerini de iyileştirdiği tespit edilmiştir(Zhang ve Malhotra, 1995, Sabir vd., 2001, Siddique ve Kalus, 2009, Khatib ve Wild, 1998, Khatib ve Clay, 2004, Kim vd., 2007).Son yıllarda yapılan çalışmalar ise metakaolinin yalnızca betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda çevresel etkisini de önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Homayoonmehr vd., 2021; Ma vd., 2019; Tawfik vd., 2021)

Geopolimer alanında metakaolin içerdiği yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği sayesinde iyi bir bağlayıcı malzeme olma özelliğine sahiptir(Mobili vd. , 2016; Duan vd. , 2016; Yang vd., 2017; Sun ve Vollpracht, 2018). Metakaolin geopolimerin yapısında akışkanlığı iyileştirerek dolgu malzemesi görevi görmektedir (Jithendra vd., 2022). Ayrıca geleneksel portland çimentosu ile kıyaslandığında aşınma direncinin daha iyi veya ayın olduğu görülmüştür (Witzke vd., 2023).

1.1.1.2. Uçucu Kül

Kömür ülkemizde enerji üretiminde önde gelen hammaddelerdendir. Ülkemizdeki termik santrallerin çoğu kömürle çalışmaktadır. Bu termik santrallerin işlevleri sırasında kömürün yanması ile ortaya çıkan atık küller bacalarındaki elektro filtreler yardımı ile tutulmaktadır. Uçucu kül olarak adlandırılan bu yan ürün depolama ve çevre kirliliği gibi sorunlara sebep olmaktadır. Uçucu külün ince yapıda ve puzolanik özellikte oluşu ve çevreye verdiği zarar geri dönüşümünü cazip hale getirmektedir. Özellikle beton üretiminde çimento yerine kullanımı çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Betonda uçucu kül kullanımı portland çimentosuna olan ihtiyacı azaltarak klinker üretimi sırasında açığa çıkan CO_2 emisyonlarının düşmesine katkı sağlamaktadır(Chindaprasirt vd., 2007). Aynı zamanda uçucu külün geri dönüşümü sağlanarak bir diğer çevresel sorun ve depolama probleminin önüne geçilmektedir (Malhotra ve Mehta, 1996; Malhotra ve Mehta, 2002).

Uçucu kül sahip olduğu ince yapı ve puzolanik özellik sayesinde daha az gözenekli ve geçirimsiz bir beton yapısı oluşturmaktadır (Delikurt ve Sevim, 2015) . Aynı zamanda sahip olduğu küresel yapı sayesinde betonun işlenebilirliğini artırmaktadır (Subaşı vd., 2011). Artan işlenebilirlik betonun suya olan ihtiyacını azaltmaktadır (Durak vd., 2021). Su ihtiyacındaki bu azalma betonun boşluk miktarını azaltarak daha geçirimsiz bir beton sağlamaktadır. Bu durum ise betonun uzun vadede dayanımını artırmaktadır (Subaşı vd., 2011;Tulga ve Kılınç, 2018).

Geopolimer alanında uçucu kül konulu birçok çalışma bulunmaktadır. Uçucu küller içerdikleri yüksek oranda silis ve alüminadan dolayı geopolimerler için uygun bir hammadde kaynağıdırlar (Duxon vd. . 2007; Rattanasak ve Chindaprasirt 2009). Geopolimerler yapısal olarak geleneksel çimentolu betondan farklılık göstermektedir. Ancak uçucu kül temelli geopolimerler su/çimento - basınç dayanımı ilişkisi bakımından geleneksel beton ile benzer davranış göstermektedir (Hardjito ve Rangan, 2005). Öte yandan uçucu küller bileşim olarak fırındaki malzeme ve külün oluştuğu koşullara bağlı olarak farklı bileşen oranları içermektedir. Bu nedenle geopolimer yapısındaki etkileri farklı uçucu küller için farklı sonuçlar vermektedir. Aynı kaynaktan farklı zamanda alınan uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde ciddi oranda değişen dayanım sonuçları gözlemlenmiştir. Ayrıca bazı uçucu kül örneklerinde erken dayanımların son dayanım ile uyuşmadığı görülmüştür(Van Deventer vd. , 2007). Öte

yandan uçucu kül tabanlı geopolimerlerin geleneksel portland çimentosuna kıyasla kimyasal etkilere, donma- çözülmeye ve yüksek sıcaklıklara karşı daha iyi direnç gösterdiği çalışmalar mevcuttur (Ohno ve Li 2014). Ancak uçucu kül ile hazırlanan geopolimerlerin yüksek dayanım kazanabilmeleri için yüksek sıcaklıkta küre ihtiyacı vardır. Bu durum uçucu kül tabanlı geopolimerlerin uygulanabilirliği açısından sorun olmaktadır (Adak vd., 2017).

1.1.1.3. Vermikülit

Vermikülit, magnezyum alüminosilikat yapısında, genellikle tarım ve inşaat sektörlerinde kullanılan bir kil mineralidir. Minerolojik olarak farklı bir grubu temsil eden bu mineral, Britannica Ansiklopedisi'nde (2018) vermikülit yüksek iyon değiştirme kapasitesine sahip oluşuyla montmorillonite benzeyen su varlığında şişme eğilimi gösteren bir kil olarak tanımlanmaktadır. Özellikle genleşme kabiliyeti ve yüksek su tutma kapasitesiyle dikkat çeken vermikülit, aynı zamanda yangına dayanıklılığı ve ısı yalıtım özellikleri sayesinde yapı sektöründe önemli bir yer edinmiştir (Duman ve Tunç, 2008). Şekil 5'te ham vermikülit ve genleşmiş vermikülit görselleri bir arada görülmektedir.



Şekil 5. Ham vermikülit ve Isıl İşlem İle Açılmış Vermikülit

Vermikülitin düşük maliyeti, kolay uygulanabilirliği ve güçlü yalıtım özellikleri nedeniyle, çeşitli yapı malzemelerinin üretiminde tercih edilmesi giderek yaygınlaşmaktadır. Dünya genelinde birçok ülkede vermikülit rezervleri bulunmakta olup, Türkiye'de ise özellikle Sivas-Yıldızeli ve Malatya bölgelerinde önemli miktarlarda vermikülit rezervi bulunmaktadır (Toksoy, 1997).

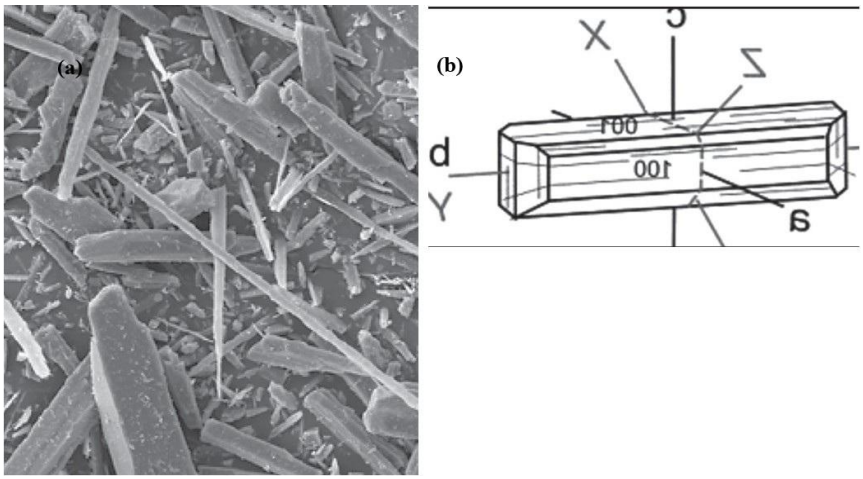
1950’li yıllara kadar vermikülit, yalnızca ısı yalıtımı amacıyla ve hafif agrega olarak alçı ve sıvalarda kullanılmıştır. Ancak sonrasında yapılan araştırmalar, bu mineralin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin, onu farklı alanlarda da işlevsel kılabileceğini göstermiştir (Toksoy, 1997). Hafif yapısı ve yüksek yalıtım kapasitesi sayesinde, portland çimentosu ile karıştırılarak döşeme betonlarında kullanılabilir hale gelmiştir (Okucu, 1992). Ayrıca, akustik ve ısı yalıtımının öncelikli olduğu yapılarda, genleştirilmiş vermikülit ile hazırlanan hafif beton karışımlarının olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir (Potter, 1991).

Vermikülitin beton bileşeni olarak kullanımı özellikle hafif betonlarda öne çıkmaktadır. Hafif yapısından dolayı betonun özgül ağırlını düşürebildiği çalışmalarla tespit edilmiştir (Naveenkumar vd., 2021). Özellikle beton yapısında ince agrega olarak kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. Öte yandan beton dayanımı üzerindeki etkileri kullanılan vermikülit oranı ile doğrudan ilişkilidir. Geleneksel betona kıyasla daha iyi dayanım sonuçları sağladığı çalışmalar mevcut olsa da ikame oranındaki değişim sonuçları belirgin bir şekilde etkilemektedir (Harmancı ve Kalem, 2022; Naveenkumar vd., 2021).

Bu bağlamda, vermikülitin yapı malzemesi olarak potansiyel kullanım alanlarının detaylı biçimde araştırılması, hem malzeme performansı hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, vermikülitin yapı sektöründeki potansiyel uygulamaları incelenerek, farklı oranlarda kullanımıyla malzeme performansına olan etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir.

1.1.1.4. Vollastonit

Vollastonit doğal olarak oluşan bir kalsiyum metasilikattır ($CaSiO_3$). Kalsiyum, silisyum ve oksijenin bileşiminden oluşmaktadır. Metalik olmayan, iğne uçlu kristal yapıya sahip, alkalin (pH 9.8), beyaz renkli bir mineraldir. Şekil 6’da vollastonitin parçacık morfolojisi ve kristal yapı geometrisi görülmektedir.



Şekil 6. Vollastonitin parçacık morfolojisi (a), (NYCO,2012), vollastonitin kristal yapısı (b),(ICL,2012)

Doğal vollastonit genellikle kuvars, kalsit, diyopsit gibi safsızlık içeren minerallerle birlikte bulunmaktadır. Bu nedenle, doğadan çıkarılan vollastonitin kullanılabilir hale getirilmesi için belirli arıtma ve zenginleştirme işlemlerinden geçirilmesi gerekmektedir. Ancak bu işlemler hem maliyetli hem de teknik olarak sınırlayıcı olabilmektedir. Bu durum, sentetik vollastonit üretimi konusunu gündeme getirmiştir. Laboratuvar ortamında kuvars (SiO_2) ve kalsit ($CaCO_3$) gibi kolay temin edilebilen hammaddelerden yararlanılarak, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen reaksiyonlarla sentetik vollastonit üretimi mümkündür. Bu yöntem sayesinde, istenilen saflıkta ve kontrollü özelliklere sahip sentetik vollastonit elde edilebilmektedir.

Ülkemizin zengin kuvars ve kalsit rezervlerine sahip olması, sentetik vollastonit üretimi açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. Dolayısıyla, hem doğal hem de sentetik vollastonitin malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemek, yerli kaynakların etkin ve verimli bir şekilde kullanımını sağlamak adına önem taşımaktadır.

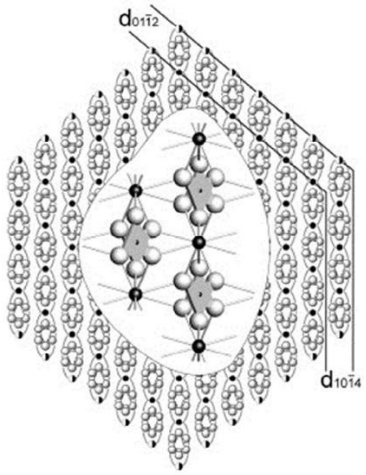
Vollastonitin ticari olarak kullanımını cazip hale getiren ana sebep, kristal yapısı ve kimyasıdır (Ciullo, 1996). Vollastonitin sahip olduğu pekçok özellik birçok alanda kullanımına zemin hazırlamaktadır. Seramiklerde, plastikler ve boyalar için dolgu malzemesi olarak, termal ve elektriksel yalıtkanlarda, sırlar için ergitici ile ıslatma ajanı ve metal ergitici olarak kullanılmaktadır (Springer, 1994; Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonitin beton harç ve sistemlerde performans artırıcı katkı malzemesi olarak kullanımının betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği

araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir (Gutha, 2010; Jindal vd., 2020 ; Mathur vd., 2007; Kumar ve Ramujee, 2017). Öte yandan kullanılan vollastonitin yapısı ve inceliği bağlayıcı malzemenin kıvamı ve işlenebilirliğini etkilemektedir (Ganesan vd.,2008; Temiz vd., 2007). Yapılan çalışmalarda kullanılan vollastonit miktarındaki artışın kıvamı artırdığı tespit edilmiştir (Ransınchung ve Kumar, 2010; Mathur vd.,2007 ; Ransınchung vd., 2009).

Son yıllarda vollastonit geopolimer beton alanında da araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar daha kısıtlı olmakla birlikte vollastonitin geleneksel beton ve harçlarda gösterdiği etkiyi geopolimer alanında da gösterdiğini söylemek mümkündür. Mineralin geopolimer yapıya ikamesinin işlenebilirliği azalttığı ancak mekanik performansta iyileşmeler sağladığını gösteren çalışmalar literatürde mevcuttur (Bong vd., 2019; Bong vd. , 2022 ;Alshaaer vd., 2025).

1.1.1.5. Kalsit

Kalsit, kristal formunda camsı parlaklıkta, renksiz ve saydam yapıda bir mineraldir. Kimyasal formülü $CaCO_3$ olan saf kalsit bileşiminde yaklaşık %56 CaO %44 CO_2 bulundurmaktadır. Ancak birlikte bulundukları kayaç ve minerallere göre az da olsa Mg, Fe, Mn,Zn,Sr,Cu,Pb,Co,Ba,Cr ve As içerebilmektedir (Şahin, 1978). Şekil 7'de yapısal kalsit ağı modeli görülmektedir.



Şekil 7. Kalsit Yapısı (Aquilano vd., 2016)

Yer kabuğunun yaklaşık %4 ünü oluşturan kalsit dünyadaki en yaygın minerallerden biri olmaktadır (Heberling vd., 2011).

Türkiye kalsit rezervleri bakımından oldukça zengin yataklanmalara sahiptir. $CaCO_3$ yüzdesi yüksek, silis ve demir safsızlıkları düşük oluşu ile bu rezervler oldukça kaliteli kaynaklardır (Çiftçi ve Erdağ, 2015). Bu sebeple diğer ülkelere kıyasla Türkiye'de kaliteli hammadde temini nispeten daha düşük maliyetlidir. Özellikle Niğde mermerleri, bileşeni, safsızlık oranı ve beyazlığı sayesinde Türkiye'nin en kaliteli kalsit rezervi olarak ön plana çıkmaktadır.

Kalsit, çimento esaslı malzemelerde çimento ikamesi olarak kullanım potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Yapı malzemeleri alanında kimyasal bileşiminden dolayı çimento esaslı malzemelerde kullanımına yönelik çalışmalar oldukça yaygındır. Betonun dayanım mekanizmasında rol oynayan C-S-H fazlarının oluşumuna katkı sağlayarak, hidratasyon sürecini desteklediği bilinmektedir (Matschei vd., 2007). Literatürde yapılan bazı çalışmalarda kalsit ikamesinin betonun basınç dayanımına katkı sağladığı gözlemlenmiştir (Sua-iam vd., 2016; Bekem, 2020)

1.1.1.6. Mermer Atığı

Mermer, kalker ve dolomitik kalkerlerin yeniden kristalleşmesiyle meydana gelmiş metamorfik bir kayaçtır. Bileşimlerinin %90-98'i $CaCO_3$, ten oluşmaktadır. $CaCO_3$ kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral "kalsit"tir. Kimyasal yapısı incelendiğinde kalsit kristallerinden oluştuğu görülmektedir.

Dünya çapında mermer rezervi toplam doğal taş üretiminin yaklaşık %50'si kadar büyük bir orana sahiptir (Komnitsas vd., 2021). Türkiye ise dünya genelindeki toplam mermer rezervinin yaklaşık %40'ına sahiptir. Bu oran 3872 milyon m3 mermer rezervini ifade etmektedir (Singh vd., 2019). Mermer bloklarının çıkarılması ve işlenmesi sırasında önemli miktarda parça ve toz halinde mermer atıkları oluşmaktadır. Bu atıklar başka uygulamalarda kullanılmak üzere depolanmakta ya da çöplüklere bırakılarak çevre kirliliğine yol açmaktadır (Komnitsas vd., 2021). Mermer atıklarının miktarı ve doğada biyolojik olarak parçalanamaması mermer atıklarının geri dönüşümü konusunu bir araştırma konusu haline getirmiştir. Özellikle içerdiği $CaCO_3$ miktarı göz önüne alındığında bu atıkların çimento ikame malzemesi, agrega, dolgu

malzemesi ve bağlayıcı olarak kullanımı ön plana çıkmaktadır (Ceylan vd., 2001; Akbulut ve Gürer, 2006).

Mermer atıklarının geopolimer alanında kullanımına dair geleneksel beton alanındakine kıyasla az olmakla beraber yapılan çalışmalar da mevcuttur (Simão vd., 2020; Kamseu vd., 2022; Tekin, 2016). Günümüzde hala mermer atığının geopolimerler üzerindeki etkisi merak konusudur.

1.1.2. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Alkali Aktivatörler

1.1.2.1. Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)

Sodyum silikat silisyum dioksit ve sodyum karbonatın 100 °C'nin üzerinde tepkimeye girmesi ile oluşmaktadır. Tepkime sonucunda karbondioksit açığa çıkmaktadır. Genel gösterimi Na_2SiO_3 olan sodyum silikat sıvı cam veya cam suyu olarakta bilinen bir malzemedir. Geniş bir kullanım alanına sahip olmakla beraber çimento ve tekstil sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Renksiz bir görünüme sahip olan sodyum silikat asit geçirmez beton yapımında ve betonun sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. İnşaat sektörünün yanı sıra petrol işleminde aşınmayı önlemede, seramik üretiminde, kereste işlenmesinde de sıklıkla kullanılmaktadır (Tecimer,2021). Şekil 8. (a)'da sodyum silikata ait görsel verilmektedir.

1.1.2.2. Sodyum Hidroksit

Genel gösterimi NaOH olarak bilinen sodyum hidroksit suda çözünebilen, beyaz renkli bir bileşiktir. Su ile tepkimesi ekzotermik olup yumuşak ve kaygan bir özelliğe sahiptir. Doğal formda bulunmayan NaOH sentetik olarak üretilen bir kimyasaldır. Şekil 8. (b)'de sodyum hidroksit görseli görünmektedir.

NaOH geopolimer yapısında en yaygın kullanılan alkali aktövatördür. Geopolimerlerin mekanik ve yapısal özelliklerini belirlemede önemli bir etkendir. NaOH derişimi geopolimerizasyon sürecinin çözünme basamağını doğrudan etkilemektedir (Panias vd., 2007). Geopolimer bileşeni olarak kullanılmasına ilaveten endüstriyel birçok maddenin yapımında boya, sabun ve petrol rafinelerinde oldukça sık kullanılmaktadır.

1.1.2.3. Potasyum Hidroksit (KOH)

Genel gösterimi KOH olarak bilinen potasyum hidroksit nem tutma özelliği ile bilinen katı ve beyaz renkte bir kimyasaldır. Geopolimer yapısında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ile birlikte kullanıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır (Duxon vd., 2007). Ayrıca sıvı sabun yapımı, kağıtların geri dönüşümü ve birçok temizlik ürününün üretiminde kullanılmaktadır (Tecimer, 2021). Şekil 8. (c)'de potasyum hidroksitin fiziksel görünüşü sunulmuştur.



a b c

Şekil 8. Sodyum Silikat (a), sodyum hidroksit (b), potasyum hidroksit (c) (Tecimer,2021)

1.2. Makine Öğrenmesi

Teknolojik gelişmeler insan hayatını oldukça kolaylaştırarak günümüzde köklü değişikliklere yol açmaktadır. Sanayi, eğitim, iletişim, inşaat ve daha pek çok alanda ortaya çıkan yeni teknolojiler, gündelik hayatı kolaylaştırarak zaman ve emek tasarrufu sağlamakta, karmaşık problemlerin çözümünde insan gücünü desteklemektedir. Özellikle yapay zeka sayesinde veri analizi ve bilgi işlem alanındaki ilerlemeler, büyük veri setlerinin işlenmesine ve kısa sürede anlamlı sonuçların elde edilmesine olanak sağlamaktadır (Eşidir , 2025; Tosunoğlu vd., 2021).

Yapay zeka (YZ), bilgisayar sistemleri ile insan zekasının; öğrenme, akıl yürütme ve karar verme gibi yetilerini taklit ederek anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlayan bir bilim dalıdır (Nabiyev,2012). Yapay zeka veriyi işlemekle sınırlı kalmayıp aynı zamanda çıkarım yaparak yeni durumlar karşısında karar verebilme yetisine sahiptir. Yapay zeka uygulamaları sayesinde, zaman alan, maliyetli ve karmaşık süreçler, daha kısa sürede yüksek doğruluk oranlarında, güvenilir bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Katatchambo, 2024).

Yapay zeka terimi ilk olarak 1956'da Hannover, New Hampshire, Dartmouth College'da yapılan bir konferansta kullanılmıştır. Ancak 1965-1970 yılları arasında yapay zeka kışı adı verilen bir döneme girilmiştir. Bu duraklama döneminde çok az ilerleme sağlanmıştır. 1970-1975 yılları arasındaki süreçte gelişmelerin önünün açıldığı bir döneme girilmiştir. Bu dönemi takip eden 5 yıllık kısa dönemde ise araştırmacılar, farklı bilim dallarında da yapay zekadan faydalanmaya başlamıştır. 1980 yılından günümüze kadar ulaşan bu bilimsel yolculukta yapay zeka laboratuvar araştırmalarından çıkıp gündelik hayatın bir parçası haline gelmiş durumdadır ve gelişimi devam etmektedir (Tekin,2006; Kaya, 2023).

Son yıllarda bilimsel çalışmalarda yapay zeka uygulamaları geniş bir çalışma alanı haline gelmiştir. Deneysel verilerin elde edilmesi çoğu zaman uzun bir zaman ve maliyet gerektirmektedir (Bülbül .,2024; Weng vd., 2023). Bu sebeple araştırmacılar deneysel verileri kullanarak yapay zeka modellerinin tahmin doğruluk oranları üzerinde çalışmaktadır (Sinap,2024). Özellikle inşaat mühendisliği alanında hazırlanan beton numunelerin yaş dayanımlarına göre gösterdikleri mekanik performans oldukça önemlidir (Vu ve Tran, 2023). Örneğin elde edilmek istenen beton numune 90. yaş basınç dayanımı için 90 gün beklenmesi gerekmektedir. Bu ciddi bir zaman kaybına sebep olmaktadır. Öte yandan çok daha karmaşık sistemler söz konusu olduğunda bileşenler ve mekanik performans arasındaki ilişkileri çözümlemek oldukça zor olabilmektedir. Özellikle geopolimerler birçok farklı değişkene bağlı, hassas karışım oranlarına sahip sistemlerdir. Geopolimer harç ve betonların bileşen oranları ve mekanik dayanımları arasında net bir matematiksel bağıntı kurulamamaktadır (Kurt,2023). Bu durum araştırmacıları geopolimer harç ve betonların mekanik dayanımlarında yapay zeka uygulamaları konusunda araştırmaya sevk etmektedir. Literatürde geopolimer harç ve betonların mekanik davranışlarını yüksek doğruluk oranında tahmin edebilen yapay zeka modelleri mevcuttur (Bartık, 2024; Rehman vd.,2022, Khan vd., 2021). Oluşturulan modelin doğruluğu tahmin değerlerinin deneysel verilere yakınlık oranıyla ölçülmekte ve aynı zamanda deney sürecinin güvenilirliğini de artırmaktadır.

Makine öğrenmesi, yapay zekanın kapsadığı, oluşturulan modelin deneyerek öğrenmesini amaçlayan bir alandır. Geleneksel yazılım yaklaşımında programcı tarafından tüm sınırların tanımlanması gerekirken makine öğrenmesinde sistem gerçek

veriler üzerinden öğrenir ve karşılaştığı yeni veriler için tahmin üretir. Bu özelliği sayesinde makine öğrenmesi özellikle veri setlerinin analizi ve karar verme süreçlerinde öne çıkmaktadır. Karmaşık mühendislik problemleri ve matematiksel modellerin yetersiz kaldığı durumlarda makine öğrenimi, yüksek doğrulukta tahminler sunmaktadır. Özellikle yapı malzemelerinin mekanik dayanımlarının tahmini gibi doğrusal olmayan ilişkilerin anlaşılmasında kullanılarak; deneysel çalışmalardan maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır.

1.2.1. Makine Öğrenmesi Model Geliştirme Süreci

Makine öğrenmesi modellerinde veri, eğitimin temelini oluşturmaktadır. Oluşturulan model veri sayesinde öğrenir. Bu yüzden verilerin güvenilir bir şekilde elde edilmesi, doğru biçimde işlenmesi ve temizlenerek modele uygun hale getirilmesi sürecin en kritik adımıdır. Model eğitim sırasında veriler üzerinden matematiksel bir yapı oluşturur. Daha sonra karşılaştığı yeni veriler için bu matematiksel yapıyı kullanarak tahmin yapar (Verma vd., 2023).

Makine öğrenmesi tabanlı modeller geliştirilirken gelen olarak izlenen adımlar şunlardır;

Veri Toplama: Modelin öğrenmesi ve sağlıklı tahmin yapabilme yeteneğini geliştirebilmesi için en kritik dayanağı deneysel verilerdir. Model eğitimi sırasında amaca uygun geniş veri setine ihtiyaç vardır. Bu sebeple deneysel çalışmaların sistematik bir şekilde toplanarak veri setlerinin oluşturulması gerekmektedir. Literatür verileri, deneysel çalışmalar veya simülasyon çıktıları kullanılarak kapsamlı ve güvenilir veri setleri oluşturulur.

Veri Ön İzleme ve Düzenleme: Model geliştirme sürecinin ikinci basamağında tüm veriler taranarak eksik ve hatalı veriler temizlenir. Veri özellikleri normalize edilerek model için uygun hale getirilir. Elde edilen veriler eğitim seti ve test seti gibi gruplara ayrılır. Her set için girdiler ve çıktılar olarak bağımlı değişkenler ve bağımsız değişkenler belirlenir (Tenza-Abril vd. ,, 2018).

Model Seçimi : Veri setinin yapısına ve modelin amacına uygun algoritmalar belirlenir.

Model Eğitimi: Eğitim veri seti kullanılarak model eğitilir ve girdiler ile çıktılar arasındaki karmaşık matematik bağıntıları öğrenir (Gür vd.,2024).

Model Doğrulama ve Test: Test setindeki veriler ile modelin tahmin verileri kıyaslanarak modelin genelleme yeteneği ve tahmin doğruluğu değerlendirilir.

Model geliştirme süreci basamakları model performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Eğitim ve test verilerinin sağlıklı belirlenip doğru oranlanması, model parametrelerinin doğru seçimi ve uygun algoritmaların kullanımı güvenilir bir model için gereklidir (Gür vd.,2024).

1.2.2. Model Performansının Değerlendirilmesi

Makine öğrenmesi modellerinin başarısı belirli performans ölçütleri ile değerlendirilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bazı ölçütler şunlardır (Jain vd., 2023):

Ortalama Kare Hata (MSE): Modelin tahmin verilerinin gerçek verilerden ne kadar saptığını gösterir (Sofuoğlu, 2022).

Ortalama Mutlak Hata (MAE): Tahmin verilerindeki hata sapmalarının mutlak ortalamasını ifade eder. Denklem (1) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{MAE}=\frac{\sum|y_i-\hat{}\{y\}_i|}{n} \quad (1)$$

Korelasyon Kat Sayısı (R): Test verileri ve tahmin verileri arasındaki ilişkiyi sayısal olarak gösterir. Denklem (2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$R^2 = 1 - (\frac{\sum(y_i-\hat{}\{y\}_i)}{\sum(y_i-\overline{\{Y\}})})^2 \quad (2)$$

y_i= Deneysel ölçüm değeri

$\hat{}\{y\}_i$= Yapay sinir ağı tahmini değeri

$\overline{\{Y\}}$= Tüm ölçümlerin ortalaması

Ortalama Karesel Hata (RMSE): Modelin ortalama tahmin hatasının ne kadar büyük olduğunu göstermektedir. Denklem (3) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum(y_i-\hat{}\{y\}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

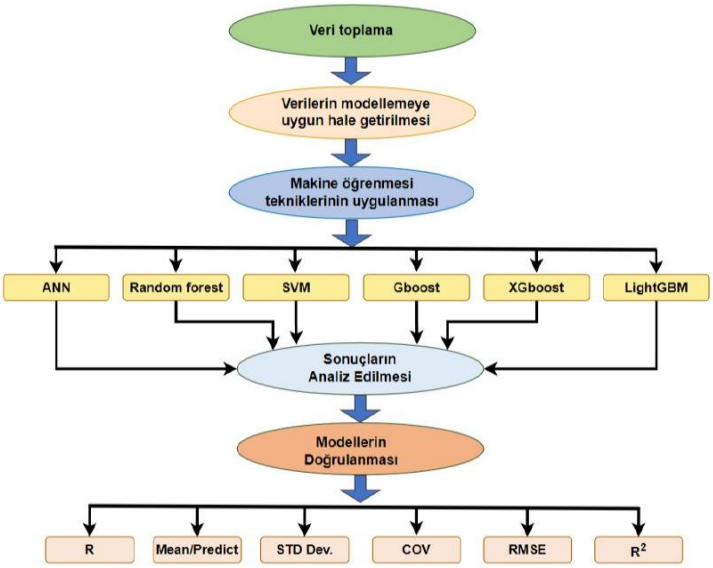
y_i= Deneysel ölçüm değeri

$\hat{}\{y\}_i$= Yapay sinir ağı tahmini değeri

n= Veri sayısı

Modelin güvenilirliği ve tahmin başarısı bu ölçütlerin yorumlanması ile tespit edilmektedir (Konak vd., 2024).

Şekil 9'da makine öğrenmesi model oluşturma ve sonuçların değerlendirilmesi süreci adım adım şematize edilmektedir.



Şekil 9. Makine öğrenmesi model oluşum şeması (Kaya,2023)

1.2.3. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine öğrenmesi modelleri genel olarak 4 ana başlıkta gruplandırılmaktadır (Altay, 2020):

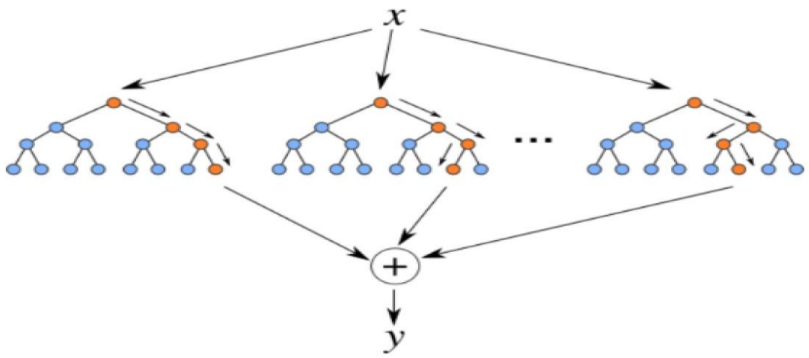
1. Denetimli öğrenme
2. Denetimsiz öğrenme
3. Pekişmeli öğrenme
4. Yarı gözetimli öğrenme

1.2.3.1. Denetimli Öğrenme Algoritmaları

Makine öğrenmesinin belirlenmiş bir veri seti yardımı ile gerçekleştiği yaklaşıma denetimli öğrenme adı verilmektedir. Bu yaklaşım genellikle sınıflandırma ve regresyon modelleri için kullanılmaktadır. Sonuç değişkeninin birden fazla bağımsız değişkene bağlı bir bağımlı değişken olduğu durumlarda genellikle bu yaklaşım tercih edilir. Bu yaklaşım ile hareket eden başlıca modeller şunlardır:

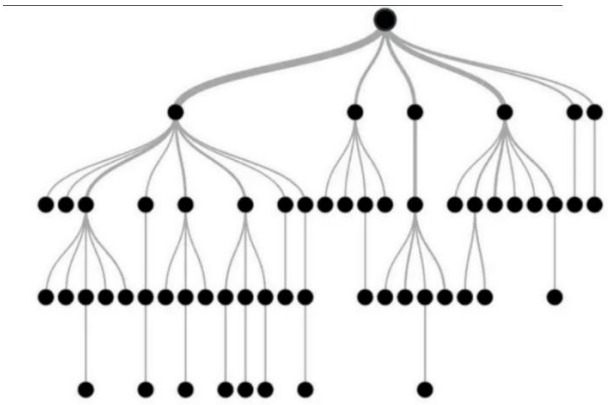
Rastgele Orman (Random Forest- RO): Rastgele orman bir eş zamanlı öğrenme modelidir. Algoritma eğitim veri setinden farklı birçok bootstrap (önyükleme) örneği çeker ve herbir örnek için bağımsız bir karar ağacı kurulur. Birden

fazla ağaç bir araya gelerek en yüksek puanı alan yöntemin seçilmesi prensibi kullanılarak topluluk sınıflandırılması yapılır (Shalev-Shwartz ve Ben-David, 2014). Her düğümde bölünme işlemi , tüm özellikler yerine rastgele seçilen bir alt küme kullanılarak yapılır (Parlak ve Kayri, 2022). Rastgele orman yöntemi aşırı öğrenmeye (overfitting) karşı oldukça dayanıklı bir yöntemdir. Şekil 10'da rastgele orman algoritmasının yapısı görülmektedir.



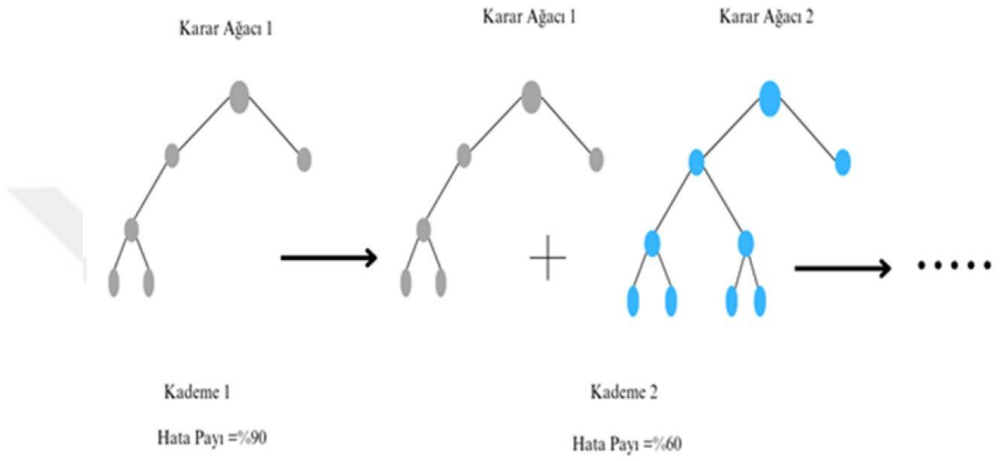
Şekil 10. Rastgele orman algoritma yapısı (Zilyas ve Yılmaz, 2023)

Karar Ağaçları (Decision Trees- KA): Bir sınıflandırma ve regresyon yöntemi olan model, yüksek güvenilirliği ve kolay yorumlanması nedeniyle oldukça yaygın kullanılan bir modeldir (Chowdhury vd.,2024). Karar ağaçları, veri setlerini çoklu katmanlara böler ve hiyerarşik bir karar mekanizması kullanarak sınıflandırır (Pekel, 2020). Şekil 11'de bu mekanizmanın yapısı görülmektedir. Öte yandan bu durum veri setindeki küçük bir değişikliğin tahminlerde büyük değişikliklere neden olmasına sebep olur. Modelin yüksek varyansa sahip olması en büyük sorunlardan biridir.



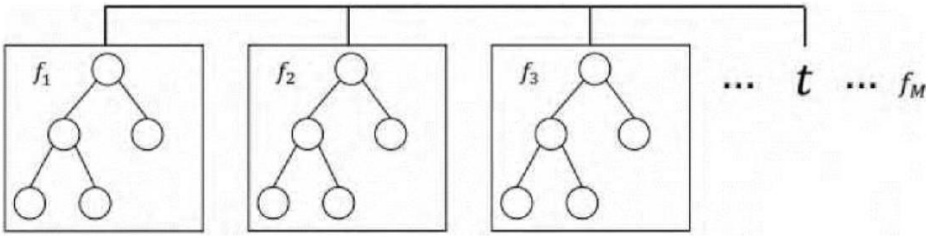
Şekil 11. Karar ağaçları algoritması şematik gösterimi (Zilyas ve Yılmaz, 2023)

Gradien Boosting (Gboost/Gradyan Artırma): Model genellikle karar ağaçları gibi zayıf tahmin modellerini ardışık bir şekilde geliştirerek model doğruluğunu artırmaktadır. Geliştirilen her yeni model, önceki modelin hatalarını düzeltmeye odaklanır (Friedman, 2001). Hata fonksiyonunu azaltmak için gradient descent benzeri bir optimizasyon tekniği ile her zayıf ağın katkısı ayarlanır. Şekil 12'de gradien boosting algoritmasının şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 12. Gradien boosting algoritmasının şematik gösterimi (Bartık, 2024)

XGBoost (Aşırı Gradyan Artırma): Makine öğrenmesi alanında en yaygın kullanılan ve başarı gösteren modellerden biridir. Sınıflandırma ve regresyon modellerinde sıkça kullanılan hızlı ve yüksek doğruluk oranına sahip bir modeldir. Geleneksel artırılmış ağaç modelinde yalnızca ilk türeve ait bilgi kullanılmasına karşın, XGBoost kayıp fonksiyonunda ikinci dereceden bir Taylor serisi kullanır (Chen ve Guestrin, 2016). Şekil 13'te XGBoost algoritmasının çalışma mekanizması görülmektedir.

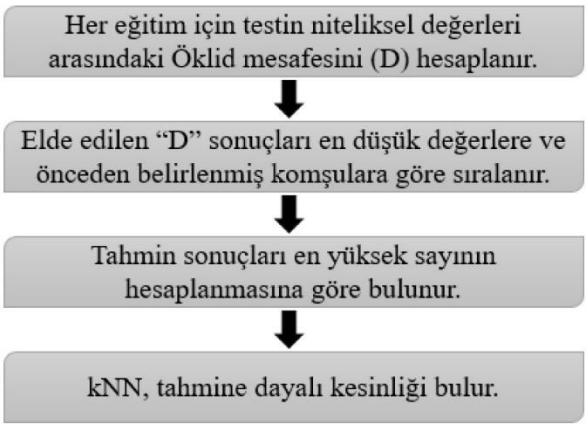


Şekil 13. XGBoost algoritmasının çalışma mekanizması (Dai vd.,2023)

LightGBM(Hafif Gradyan Artırma Makinesi): Microsoft tarafından geliştirilmiş bir gradyan artırma algoritmasıdır. Büyük veri setlerinde çok boyutlu özellikler için hızlı ve etkili sonuçlar sunmaktadır. Algortima büyük gradyanlara sahip örneklere odaklandığı için hızlı ve verimlidir. Öte yandan veri setinin küçük olduğu durumlarda aşırı öğrenme (overfitting) olasılığı artmaktadır (Rufo vd., 2021).

Destek Vektör Makineleri (SVR/DVM): Doğrusal ve doğrusal olmayan sınıflandırma ve regresyon problemleri için kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Destek vektör regresyonu (SVR), tahmin değerini test veri değerlerine yaklaştırmaz, onun yerine en iyi çizgiyi eşik değerine sığdırmaya çalışır (Goodfellow vd., 2016). Tahmin çizgisinin her iki yanında bulunan en yakın veri noktalarına destek vektörleri denir.

K-En Yakın Komşu (K-NN): Uygulaması kolay bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Algoritma tahmin etmek veya sınıflandırmak için, eğitim setindeki en yakın K komşusuna bakar. En yakın veri seçiminde yakınlık genellikle Öklid uzaklık hesaplaması ile belirlenir (Tanyildizi, 2021; Zhang vd. , 2020). Şekil 14'de K-en yakın komşu algoritmasının işleyiş şeması görülmektedir.



Şekil 14. K-En yakın komşu algoritma hesap adımları (Tanyildizi, 2021; Kurniadi vd., 2018)

Doğrusal Regresyon (Lineer Regresyon-LR)/ Çoklu Lineer Regresyon (ÇLR): Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkileri ifade eden matematiksel modeller oluşturmak amacıyla kullanılır. Regresyon modelleri doğrusal ilişkileri analiz edebilse de, komplike veri setleri içerisinde yeterli performansı sergileyememektedir (Han vd., 2011).

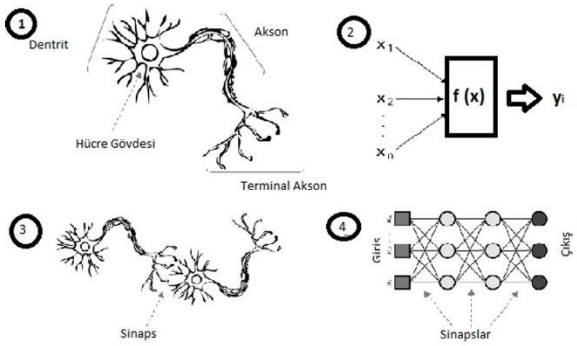
Torbalanmış Ağaçlar (Bagged-Trees- BTR): Torbalanmış ağaçlar birden fazla karar ağacından gelen tahminleri birleştiren bir algoritmadır. Karar ağacındaki varyans sorununu en aza indirmek için kullanılabilmektedir (Zilyas ve Yılmaz, 2023).

Ekstra Ağaçlar (Exstra Tree): Rastgele orman algoritmasına benzemekle birlikte ondan daha hızlı eğitilebilen bir algoritmadır. Ağaç oluşturulurken eğitim veri setinden rastgele bir alt küme seçilir. Bu durum modelin aşırı uyum sağlamasının önüne geçerek daha iyi genellemeler tespit etmeye olanak tanır (Geurts vd., 2006).

Yapay Sinir Ağları (ANN/YSA): İnsan beyninin biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli örnek alınarak geliştirilen makine öğrenmesi modeline yapay sinir ağları denilmektedir. Sistem girdi verileri, gizli katmanlar ve çıktı verilerinden oluşur. YSA neredeyse her türlü doğrusal olmayan fonksiyonu tahmin etme yeteneğine sahiptir.

1.2.3.1.1. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları insan beyninin biyolojik sinir sistemi örnek alınarak tasarlanmış bir makine öğrenmesi modelidir (Al-Swaidani ve Khwies, 2018). Sistem nöron adı verilen temel işlem birimlerinden oluşur. Nöronlar girdi verilerini alarak belirli eşik ve ağırlık değerler üzerinden işler ve oluşan çıktı verilerini diğer nöronlara iletir. Şekil 15'de biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir ağı yapısı bir arada görülmektedir.



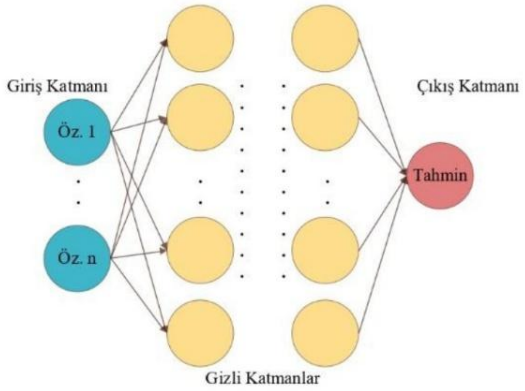
Şekil 15. Biyolojik sinir hücresi ve yapay sinir ağı (Maltarollo, 2013).

Yapı genel olarak 3 ana katmandan oluşmaktadır:

Girdi Katmanı (Input Layer): Modele verilen ham veriler bu katmanda yer almaktadır. Örneğin, geopolimer harç numune üretiminde kullanılan alkali aktivatör ve hammadde oranı, NaOH derişimleri giriş verileri olarak kullanılabilmektedir.

Gizli katmanlar (Hidden Layers): Girdi ve çıktı katmanları arasında bulunan katmanlardır. Girdi katmanındaki verileri işleyerek modelin karmaşık örüntüleri öğrenmesini sağlar.

Çıktı Katmanı (Output Layer): İşlenmiş verinin dışarı aktarıldığı, sonuçların bulunduğu katmandır. Tahmin veya sınıflandırma sonuçlarını verir. Örneğin; beton basınç ve eğilme dayanımı değerleri gibi çıkış verileri bu katmanda yer alır. Şekil 16'da genel bir yapay sinir ağ mekanizmasının katmanları görülmektedir.

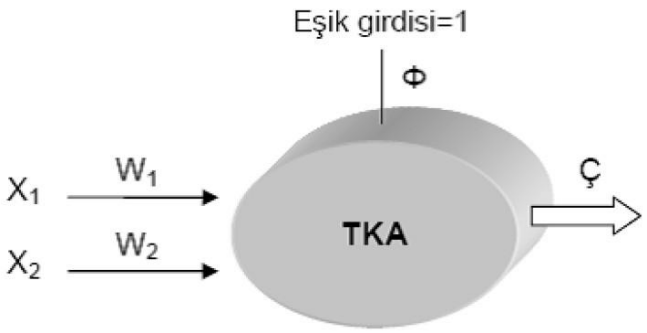


Şekil 16. Yapay sinir ağı genel katman yapısı (Bülbül,2024)

1.2.3.1.1.1. Yapay Sinir Ağ Modelleri

Yapay sinir ağ modelleri genel olarak 4 grupta incelenmektedir:

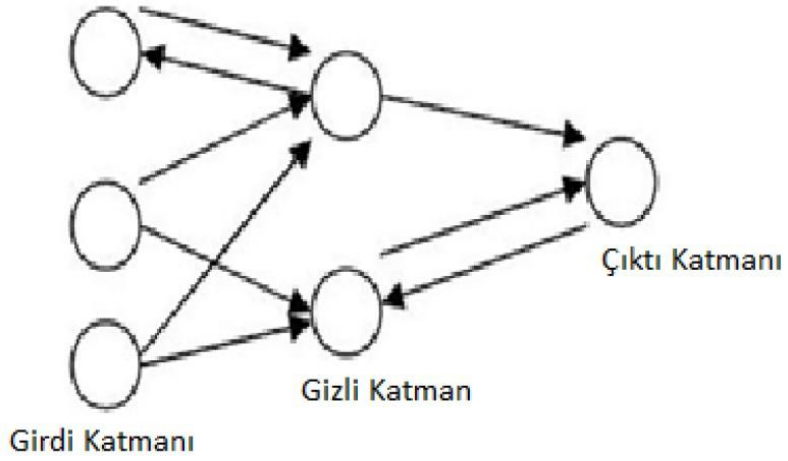
Tek Katmanlı Algılayıcılar: Bu algılayıcılarda gizli katmanlar bulunmamaktadır. Model yalnızca girdi ve çıktı katmanlarından oluşur. Genellikle sınıflandırma modeli olarak kullanılır. Çıktı fonksiyonu doğrusaldır. Model bir karar mekanizması öğrenerek verileri sınıflandırır (Öztemel,2006). Şekil 17 tek katmanlı algılayıcıların genel çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 17. Tek katmanlı algılayıcı mekanizması (Öztemel, 2003)

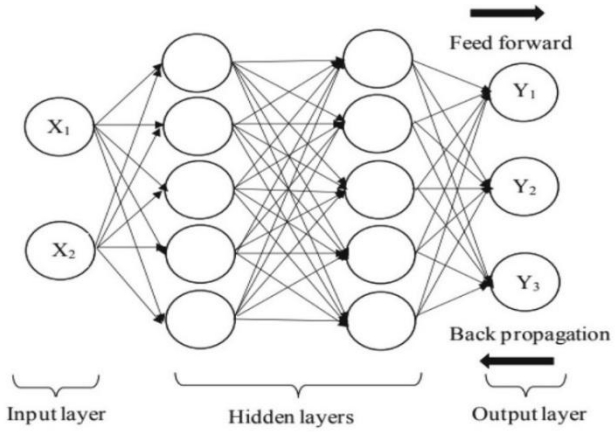
Çok Katmanlı Algılayıcılar: Doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonları için birçok farklı nöronun karmaşık bir düzende birbirine bağlandığı gizli katmanlarında yer aldığı çok katmanlı algılayıcılardır (Metin vd., 2020).

İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağı : İleri beslemeli yapay sinir ağı modellerinde katmanların sadece kendinden sonraki katmanlar ile bağı bulunmaktadır. Bilgi işleyişi ileriye doğru devam eder. Nöronlar arasında geri yayılım gerçekleşmez. Girdi katmanındaki veriler gizli katmanlara iletilir. Veriler gizli katmanlarda işlenerek çıktı katmanına iletilir ve öğrenme süreci tamamlanır (Öztürk ve Şahin, 2018). Şekil 18'de ileri beslemeli sinir ağ yapısı genel olarak şematize edilmiştir.



Şekil 18. İleri beslemeli sinir ağ yapısı (Öztürk ve Şahin, 2018)

Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı: İleri beslemeli sinir ağlarından farklı olarak katmanlardaki nöronlar işlenen verileri yalnızca kendinden sonra gelen nörona iletmez. Aynı zamanda kendinden önceki katman veya kendi katmanındaki bir nöron ile bağ kurabilir. Şekil 19'da geri beslemeli sinir ağ yapısı görülmektedir. Model doğrusal olmayan dinamik bir davranışa sahiptir (Doğan,2016). Aşağıda geri beslemeli yapay sinir ağlarında öğrenme süreci ile bilgiler verilmektedir.



Şekil 19. Geri beslemeli yapay sinir ağı (Nagajothi ve Elavenil, 2020)

İleri yayılım (Forward Propagation): Model öğrenme sürecinin ilk basamağında bir girdi verisini alıp çıktı verisini tahmin eder. Girdi katmanına veri sunulur. Modeldeki her nöron gelen veriyi belirli ağırlıklar ile çarparak bir aktivasyon fonksiyonu geliştirir. İşlenen veriler bir sonraki katmanlara iletilir. Bu işlem çıktı verileri elde edilene kadar devam eder. Elde edilen son veri grubu tahmin verileri olarak çıktı katmanına iletilir.

Hata hesaplama (Error Calculation): Çıktı katmanında yer alan tahmin verileri gerçek değerler ile karşılaştırılır. Oluşturulan model ikisi arasındaki farkı hesaplayarak bir hata değeri bulur. Tespit edilen bu değer modelin öğrenme kapasitesini ölçer. Hata ne kadar küçükse, model o kadar doğru tahmin yapıyor anlamına gelmektedir.

Geri yayılım (Backpropagation): Hata değeri hesaplandıktan sonra, model kullandığı ağırlıkları hatayı minimize edecek şekilde günceller. Hata çıktı katmanından başlayarak geriye doğru modelin önceki katmanlarına yayılır. Herbir nöron için ağırlıkların hata üzerindeki etkisi hesaplanır. İşlem sürecinde model hangi ağırlık değişkenlerinin hatayı azaltacağını öğrenir. Algoritma, hesaplamaları türev ve zincir kuralı kullanarak yapar (Kurnaz, 2014).

Optimizasyon: Model, hata oranı belli bir sayının altına düşene kadar ağırlık güncellemeye devam eder. Öğrenme süreci sonunda model veri setindeki örüntüleri öğrenmiş olur. Oluşturulan modelin performansı, belirli ölçüt değerleri üzerinden belirlenir.

1.3. Literatür Özeti

Geopolimer konusu üzerine literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ortak amacı, puzolanik ve atık malzemelerin geri dönüşümü yoluyla elde edilen geopolimer harç ve betonların dayanım ve durabilite özellikleri hakkında bilgi edinmektir. Literatürdeki araştırmalar genellikle karışım oranları, kür sıcaklığı ve süresi ile alkali bağlayıcı derişimi gibi değişkenler dikkate alınarak yürütülmüştür. Elde edilen geopolimerlerin karakterizasyonu yapılarak, bulgular ortaya konmuştur. Bu bağlamda, geopolimer alanında yapılan çalışmaların bazılarının kısa özetleri aşağıda sunulmuştur.

Koç, 2025; yaptığı çalışmada %47 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %53 metakaolin (MK) içeriğinde bağlayıcı malzeme kullanmıştır. Alklali aktivatör olarak Sodyum Silikat (SS) ve Sodyum Hidroksit (SH) 2/1 oranında kullanılmıştır. Deneyin ilk aşamasında 10 M , 12 M, 14 M ve 16 M olmak üzere 4 farklı molar derişim değişken olarak alınmıştır. Üretilen numuneler üzerinde 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanım değerleri kıyaslanarak en yüksek basınç dayanımı 14 M derişimi ile hazırlanan numunelerde elde edilmiştir. Deneylerin ikinci aşamasında 14 M serisindeki numunelere %20, %40, %60 oranlarında silis kumuna mermer tozu ikame edilerek mermer tozunun numuneler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Tüm numuneler üzerinde basınç , eğilme ve yüksek sıcaklık dayanımı testleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en düşük basınç ve eğilme dayanımı %60 mermer tozu ikameli numunelerde görülmüştür. 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklarda yapılan yüksek sıcaklık deneyi sonucunda ise ; %20 mermer atığı ikameli harçların, %0 mermer atığı ikameli harçlara kıyasla ağırlık kaybının daha az olduğu ve formunun korunduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası basınç dayanımı sonuçlarında ise en yüksek dayanım %20 mermer tozu atığı ikameli geoepolimer harçlarda elde edilmiştir.

Top, 2023; çalışmasında ana bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, ikame bağlayıcı olarak ise %5 ve %10 oranlarında metakaolin kullanmıştır. Geopolimer harçların üretiminde ise ince agrega olarak geri dönüştürülmüş beton parçaları kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak SH ve SS hacimsel olarak 1/3 oranında alınmıştır. SH derişimi 10 M seçilmiştir. Alkali aktivatör/ bağlayıcı oranı ise hacimsel olarak 1/ 2 oranında çalışılmıştır. Numuneler 24 saat kalıp alma süresinden sonra 72

saat etüvde 100 C° ‘de kürlenmiştir. Üretilen numuneler üzerinde eğilmede çekme ve basınç dayanımı, porozite, su emme deneyleri yapılarak yoğunlukları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda uçucu kül oranındaki artışın işlenebilirliği artırdığı görülmüştür. Öte yandan uçucu kül miktarındaki artışın aynı zamanda su emme miktarında artışa sebep olduğu görülmektedir. En yüksek su emme değeri %95 uçucu kül ve %5 metakaolin içeriğindeki numunelere aittir. En yüksek porozite değeri ise %25 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %75 uçucu kül serisinde tespit edilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerinin tayininde ise öğütülmüş yüksek fırın cürufu’nun etkin rol oynadığı görülmektedir. En yüksek mekanik dayanımlar %90 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %10 metakaolin serisinde elde edilmiştir. Bu seride en yüksek basınç dayanım değeri 30,50 MPa, en yüksek eğilme dayanımı ise 9,35 MPa’dır.

Irmak, 2024; çalışmasında yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tabanlı kendiliğinden yerleşen geopolimer harçlar üreterek sıcaklık altında dirençlerini araştırmıştır. İki farklı tabanda üretilen geoepolimerlerde aynı oranda silis dumanı ve metakaolin ikame bağlayıcı olarak kullanılmıştır. SS ve SH alkali aktivatör oranları 2, (2,25), (2,50) , (2,57), 3 olacak şekilde 5 farklı oran kullanılmıştır. Numuneler 80 C°’de yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerler için 8 saat, uçucu kül tabanlı geopolimerler için 24 saat olacak şekilde kürlenmiştir. Numunelerin bir kısmı 28 günlük su kürüne tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler üzerinde taze beton deneyleri, basınç ve eğilme deneyleri, kılcal su emme, yüksek sıcaklık ve sülfat etkisi deneyleri yapılmıştır. Bağlayıcı tiplerinin taze beton deney sonuçlarında etken olmadığı görülmüştür. SS/SH değeri yükseldikçe işlenebilirliğin azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek fırın cürufu içeren numunelerde en yüksek basınç dayanımı 33,14 ve 59,58 MPa ile 2,25 SS/SH değerinde elde edilmiştir. Minimum dayanım ise 3,0 SS/SH değerinde 1 ve 28 günlük ortam küründe sırasıyla 22,10 ve 43,76 MPa olarak belirlenmiştir. Uçucu kül tabanlı geopolimerlerde ise 2,75 SS/SH değerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu seride en kötü performans ise SS/SH değeri 2,50 de görülmüştür. Ayrıca kürleme süresi ile ters orantılı olarak gözeneklilikte azalma görülmüştür. Yüksek sıcaklık deneyi sonuçlarında ise uçucu kül tabanlı geopolimerlerde 150-450 C°’de mekanik dayanım artışı gözlemlenirken bazı numunelerde 600 ve 750 C°’de dayanım kaybı olmuştur. Yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerlerde ise sıcaklık artışı ile dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Uçucu kül bazlı

karışımlar, sülfat saldırısından sonra yüksek fırın cürufu bazlı karışımlarla karşılaştırıldığında daha düşük ağırlık artışı sergilemiştir.

Ulusu, 2025; çalışmasında uçucu kül tabanlı geopolimerler üretilerek bu karışımlara %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında yüksek fırın cürufu ikame etmiştir. Numune karışımları oluşturulurken değişken olarak farklı alkali aktivatör (SH) oranları (2M, 3M, 4M, 5M, 6M, 7M, 8M) kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 3, 7 ve 28. gün eğilme ve basınç testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlarda alkali aktivatör molaritesindeki artışla eğilme ve basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu kül tabanlı geopolimerlere yüksek fırın cürufu ikame oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımlarında artış görülmüştür. 8M harçlarda en yüksek eğilme dayanımı (7,33 MPa) 28 günlük %25 yüksek fırın cürufu ikameli harçta kaydedilmiştir.

Kiyan, 2024; çalışmasında uçucu kül esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer harçlara %0, %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında atık pet şişe ikame ederek harçların mekanik ve ısıl özelliklerini incelemiştir. Harç karışımlarında sodyum silikat, sodyum hidroksit, ilave su ve süper akışkanlaştırıcı katkı oranları sabit tutulmuştur. Numuneler 60 °C sıcaklıkta 24 saat etüvde kürlenmiştir. Elde edilen numuneler 28 gün oda sıcaklığında bekletilerek basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, termal iletkenlik ve kılcal su emme deneylerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarında %5 pet şişe ikamesinin basınç ve eğilme dayanımlarında belirgin bir etkisi görülmemiştir. Öte yandan pet şişe ikamesindeki artışla dayanımlarda düşüş görülmüştür. Yapılan su emme ve kılcal su emme deneyi sonuçlarında ise dalgalı değerler ortaya çıktığı için anlamlı bir sonuç elde edilememiştir.

Tokdemir, 2023; çalışmasında uçucu kül ve tuğla tozu kullanarak hafif agregalı ve gözenekli geopolimer kompozitler üretmiştir. Yapılan deneyler 2 aşamadan oluşmaktadır. Deneylerin ilk aşamasında agrega olarak pomza ve CEN standart kumu, alkali aktivatör olarak sodyum silikat çözeltisi ve köpükleştirici malzeme olarak EPS ve hidrojen peroksit kullanılmıştır. Numuneler 3 farklı oranda SiO_2/ NaO ve 2 farklı NaO / (alüminosilikat toz malzeme) oranı baz alınarak 6 farklı aktivatör çözeltisi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kürlendikten sonra basınç dayanımı en yüksek çıkan 4 tanesi referans karışım olarak seçilmiştir. Deneyin 2. aşamasında referans alınan numunelere alüminosilikat ağırlığının %0.5 , %1 ve %15'i oranlarında hidrojen

peroksit vey %0.2, %0.4 ve %0.8 oranlarında EPS köpük malzemesi eklenerek yeni gözenekli geopolimer harçlar üretilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı testleri yapılmıştır. Sonuçlar incelenerek Na_2O oranındaki artışın basınç dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu kül tabanlı harçların tuğla tozu tabanlı harçlara kıyasla daha iyi dayanım sonuçlarına sahip olduğu, pomza agreagası yerine CEN standart kumu kullanımının ise yine harçların dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Öte yandan CEN standart kumu ile hazırlanan numunelerde yüksek sıcaklık etkisi ile dayanım kaybı yaşandığı, pomza agregası ile üretilen harçlarda yüksek sıcaklık etkisi sonrası %375'lere varan dayanım artışı tespit edilmiştir.

Erdoğan, 2022; çalışmasında ince öğütülmüş ham perlit ve F sınıfı uçucu kül kullanarak geopolimer harçlar üretmiştir. Değişken kür koşulları, ham perlit / uçucu kül oranı ve yüksek sıcaklıkların hazırlanan numunelerin fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Harçlar 100/0 , 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 hap perlit / uçucu kül oranlarında hazırlanmıştır. 90 °C'de 4, 8 ve 24 saat olmak üzere 3 farklı kür süresi değişken alınmıştır. Hazırlanan numunelere 7. , 28. ve 90. gün basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. 90 günlük geopolimer harçlar 400 °C, 600°C ve 800 °C' ye maruz bırakılmıştır. 90°C'de 8 saat ısıl kür süresinin tüm numuneler için en uygun ısıl kür süresi olduğu tespit edilmiştir. Ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta en iyi performans 25/75 ham perlit/ uçucu kül bileşimli harçlarda gözlemlenmiştir.

Tokay,2019; çalışmasında vermikülit, silis kumu ve uçucu kül kullanarak geopolimer harçlar üretmiştir. Oluşturulan karışımlar 50/50/0, 35/50/15, 20/50/30, 30/70/0, 15/70/15, 0/70/30 oranlarında silis kumu/uçucu kül/vermikülit içermektedir. 2 farklı NaOH derişimi (10M, 5M) değişken kabul edilerek toplamda 12 farklı karışım hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde su emme, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, ısıl iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda en yüksek su emme değeri 15 M derişimli %30 vermikülit içeren numunede görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı değeri (4,61 Mpa) ise %50 uçucu kül katkılı 15 M derişimli numunelerde tespit edilmiştir. Karışımda vermikülit oranı arttıkça porozitenin arttığı belirtilmiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları 1,84 km/s ve 3 km/s arasında değişim göstermiştir. En

yüksek ultrasesi geçiş hızı (3 km/s) ve ısıl iletkenlik değeri (0,794 W/mK) 15 M derişimli %50 silis kumu %50 uçucu kül numunelerinde görülmüştür.

Özdil, 2025; çalışmasında mikronize vermikülit atığı dört farklı alkali aktövatör ile aktive ederek geopolimer harç üretimi yapmıştır. Harç üretimi sırasında numuneler 75 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Alkali aktövatör olarak kullanılan NaOH ve KOH çözeltilerinin su/bağlayıcı oranları 0,33 olarak belirlenmiştir. Çalışma esnasında aktövatör derişimleri 10 M, 12 M ve 14M olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Aktivatör olarak Ca(OH_2) kullanılan numunelerde aktivatör miktarı bağlayıcı miktarının %10'u olarak belirlenmiştir. Aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3'ün birlikte kullanıldığı numunelerde ise Na_2SiO_3/ NaOH oranları 1/1, 2/1 ve 3/1 çalışılmıştır. Üretilen numuneler 7, 15, 28 ve 45 gün süreyle bekletilerek basınç dayanımı deneyi, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümlü Kizilötesi Spektrometresi (FT-IR) analizleri yapılmıştır. FT-IR spektrometrisi bulgularında en belirgin geopelimerik yapı NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen geopolimerlerde tespit edilmiştir. Numuneler içerisinde en yüksek basınç dayanımı (7,7 MPa) NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen 28 günlük 3NN numunesinde gözlemlenmiştir.

Demirbağ, 2021; çalışmasında uçucu kül ve cüruf tabanlı geopolimerlere pirinç kabuğu külü ve sentetik vollastonit ikamesinin etkilerini araştırmıştır. %70 uçucu kül %30 cüruf içerikli kontrol geopolimeri Na_2SiO_3/ NaOH oranı 2,5 olan alkali aktivatör ile üretilmiştir. Alkali aktövatör oranı tüm karışımlarda sabit tutularak uçucu kül yerine pirinç kabuğu külü %3, sentetik vollastonit %6, pirinç kabuğu külü ve sentetik vollastonit %9 oranında ikame edilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde mekanik dayanım, kırılma tokluğu, kılcal su geçirimliliği deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda en yüksek ultrasonik titreşim hızı değerleri 7. Ve 28. Günlerde %6 sentetik vollastonit içeren numunelerde 3019 m/sn ve 3214 m/sn olarak ölçülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek basınç (62,23 MPa) ve eğilme (8,52 MPa) dayanımı yine %6 sentetik vollastonit içeren 28 günlük numunelerde tespit edilmiştir.

Tecimer, 2021; çalışmasında vollastonit katkılı uçucu kül tabanlı kendiliğinden yerleşen geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit bir arada kullanılmıştır. Na_2SiO_3/

NaOH oranları 1.5, 2 ve 2.5; vollastonit oranları ise %0, %4, %8 ve %12 olarak belirlenmiştir. Numuneler 80 °C ve 100 °C sıcaklıkta 24 saat kürlenmiştir. Üretilen numunelerin 28 günlük basınç, eğilme dayanımı, kılcallık ve çeşitli fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Vollastonit yüzdesindeki artışla işlenebilirliğin azaldığı su emme ve porozite değerleri arasında doğru orantı olduğu belirtilmiştir. En yüksek su emme ve porozite değeri 80 °C'de kürlenen 1.5 Na_2SiO_3/ NaOH oranına sahip %12 vollastonit içeren numunede (su emme %13.82, porozite %24) görülmüştür. 100 °C'de kürlenen 1.5 alkali aktövatör oranlı %8 vollastonit içeriğine sahip numune en yüksek basınç dayanımına (28,9 MPa) ulaşmıştır. Öte yandan en yüksek eğilme dayanımı 6,5 MPa olarak 80 °C'de kürlenen 2 alkali aktivatör oranına sahip %12 vollastonit içeren numuneye aittir.

Güneş, 2023; çalışmasında farklı parametrelerle ürettiği sentetik vollastonitlerin uçucu kül ve cüruf tabanlı geoepolimer kompozitlere ikamesinin etkisini araştırmıştır. Hazırlanan geopolimerlerin geçirimlilik, durabilite ve boyutsal stabilite özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %6 sentetik vollastonit (%45.74 CaO ve %50.71 SiO_2) içeren geopolimer kompozitlerde optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Arsoy vd. (2019) çalışmalarında Afyonkarahisar bölgesinden temin edilen mermer atıklarının beton agregası olarak kullanımını araştırmışlardır. Yapılan deney sonuçları ile mermer atıklarının betonda agrega olarak kullanılabileceğini tespit edilmiştir. Mermer atıklarının çimento ikamesi olarak kullanıldığında ise %5 oranında mermer atığı ikamesinin yapıdaki boşlukları doldurarak betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Ergün, 2011). Ancak mermer atığı ikame oranının %10 olduğu çalışmada malzemenin mekanik dayanımında azalmaya yol açtığı görülmüştür (Sharma ve Kumar, 2015; Alyousef ve diğ., 2019). İlaveten mermer atıklarının asfalt kaplamalarda agrega ve derz dolgu malzemesi olarak kullanıldığı çalışmalarda mevcuttur (Ceylan vd., 2001; Akbulut ve Gürer, 2006).

Wang vd. (2011) yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonların üretiminde agrega olarak mermer atığı ve granit atığını değerlendirmiştir. Deney sonuçlarında mermer atıklarının geopolimer matrisi ile agrega arasındaki aderansı granit atıklarına kıyasla artırdığı görülmüştür.

Tekin (2016) mermer traverteni ve volkanik tüf atıklarını bağlayıcı malzeme olarak kullanarak geopolimer üretimi yapmıştır. Geopolimer harçlarda 1 gün 45°C'de etüv kürünün en uygun olduğunu, 75°C'lik ısıl kür sonucunda geopolimer harçların çatladığını tespit etmiştir.

Toprak vd. (2022) pişmiş kil ve mermer atığı tozunu geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanmıştır. Çalışma sırasında numuneler pişmiş kil tozu (%50) ve mermer tozu (%50) , pişmiş kil tozu (%100) reçeteli hazırlanarak iki farklı kür sıcaklığında (60 ve 80 ℃) basınç dayanımları kıyaslanmıştır. En yüksek basınç dayanımı (28,50 MPa), %100 pişmiş kil tozu kullanılarak üretilen ve 80 ℃' de kür uygulanan 28 günlük geopolimer harçlarda görülmüştür.

Bartık, 2024; çalışmasında lifli geopolimer betonların basınç ve eğilme dayanımlarını makine öğrenmesi kullanarak analiz etmiştir. Çalışma kapsamında 20 farklı makaleden elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır. Basınç dayanımı tahmini için 227, eğilme dayanımı tahmini için 186 deney verisi toplanmıştır. İnceleme sırasında; fiber türü, fiberin geometrik özellikleri ve içeriği, bağlayıcı türü ve miktarı, kür sıcaklığı, kür yöntemi, alkali aktivatör/bağlayıcı oranı, ince agrega oranı ve kaba agrega oranı gibi parametreler dikkate alınmıştır. Makine öğrenmesi tekniği olarak Multi- Layer Perceptron (MLP), Rastgele Orman, Gradient Boosting (Gboost), XGBoost, LightGBM ve Extra Trees Regressor kullanılarak veriler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Gboost modeli hata değerlerinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu modelde R^2 değeri (0.99) değeri en yüksek doğruluk oranı olarak belirtilmiştir.

Rehman vd. , 2025; çalışmalarında lif takviyeli geopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini yapay sinir ağı modeli ile tahmin etmişlerdir. Çalışma kapsamında literatürden 425 deneysel veri toplanarak 18 girdi parametresi kullanılmış 4 çıktı parametresi tahmin edilmiştir. Girdi parametreleri karışım oranları ve içeriği hakkında bilgi içerirken çıktı verileri çatlama sonrası tepki ve kompozitlerin mekanik özelliklerini içermektedir. Veri seti iki gruba ayrılarak bir grup model için diğer grup ise doğrulama için kullanılmıştır. Çalışmada Levenberg-Marquardt Sinir Ağı (LMNN) yöntemi kullanılmıştır. Modelleme sonucunda basınç dayanımları için 0,88, çekme dayanımları için 0,91 R^2 değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca model ile %96'lık bir genel tahmin doğruluğuna ulaşılmıştır.

Eren, 2024; çalışmasında yapay sinir ağı modeli kullanarak çelik fiberli geopolimer betonların eğilme dayanımları tahminini yapmıştır. Çalışmak kapsamında literatürden geopolimer beton eğilme dayanımlarına ilişkin 104 deney verisi toplanarak bir veri seti oluşturulmuştur. Veri seti Python proglama dili ile modellenerek analiz edilmiştir. Modelleme sonucunda 0,994183 R^2 değerine ulaşılmıştır. YSA modeli için ortalama hata değeri ise 0.99872 olarak tespit edilmiştir.

Rehman vd., 2022; geopolimer betonun mekanik ve reolojik özelliklerini tahmin edebilen bir makine öğrenmesi modeli geliştirmişlerdir. Girdi parametresi olarak karışım bileşenleri bileşenleri kullanılmış, çıktı parametresi olarak ise geopolimer betonun mekanik ve reolojik özellikleri elde edilmiştir. Oluşturulan model sonucunda eğitim seti için ortalam karesel hata değerleri basınç dayanımı (2,53), elastisite modülü (0,72), eğilme dayanımı (0,121), çökme değeri (8,9) bulunmuştur. Kontrol seti için ise ortalam karesel hata değerleri basınç dayanımı (4,32), elastisite modülü (1,5), eğilme dayanımı (0,65), çökme değeri (19,7) olarak tespit edilmiştir. Elde edilen performans sonuçları ortalam karesel hata yöntemi (MAE) 'nin tahmin için kullanılmaya uygun olduğunu göstermiştir.

Katatchambo ve Bingöl, 2025; çalışmasında yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufunu 11 farklı oranda bağlayıcı olarak kullanarak geopolimer harç üretimi yapmıştır. Harçlar hazırlanırken su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak seçilmiştir. Agrega olarak öğütülmüş dere kumu kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak Na_2SiO_3 miktarı bağlayıcı miktarına göre 10 farklı oranda ayarlanmıştır. Numuneler 75 °C'de 24 saat kürlenerek basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı, deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen verilerden bir veri seti oluşturularak SPSS yazılımı ile analiz edilmiştir. Basınç dayanımı bağımlı değişken, ultrasonik darbe hızı, yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu miktarı, alkali aktivatör oranı ise bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımları regresyon analizi (CRA), çok değişkenli adaptif regresyon spline'ı (MARS), rastgele orman (RF), çoklu eklemeli regresyon ağaçları (TreeNet) ve yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak öngörülmüştür. Yöntemlerin model performansı, ortalama karekök hatası (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE) ve Nash-Sutcliffe verimliliği (NSE) performans istatistikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Regresyon tabanlı yöntemler arasında en iyi tahmini güç fonksiyonu yönteminin ürettiği tespit edilmiştir. MARS, TreeNet ve RF modelleri arasında ise TreeNet modeli en iyi tahmin

modeli olarak görülmüştür. Genel olarak YSA ile geliştirilen modellerin harçların basınç dayanımını çok yüksek bir doğrulukta tahmin edebildiği sonucuna varılmıştır.

Ekmen, 2021; çalışmasında 3 farklı sodyum silikat/ sodyum hidroksit (2.5, 2, 1.5), 2 farklı alkali aktivatör/ uçucu kül (0.45, 0.55), 2 farklı süper akışkanlaştırıcı 9.4kg/m^3, 8.8 kg/m^3) parametresi kullanarak 14 farklı karışım oranına sahip uçucu kül tabanlı geopolimer harç üretimi yapmıştır. Üretilen numunelerin mekanik özellikleri basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı deneyleri, yapısal özellikleri ise SEM ve FT-IR analizleri yapılarak belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında elde edilen deneysel veriler kullanılarak tepki yüzey metodu (TYM) ile optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca gen ekspresyon programlama (GEP) ve çoklu doğrusal regresyon (ÇDR) kullanılarak istatistiksel analiz ve modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir Alkali aktivatör/ Uçucu kül oranındaki artış tüm numunelerde viskozite değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. En yüksek eğilme dayanımı değeri 0.45 alkali aktivatör/uçucu kül oranı 14 M sodyum hidroksit ve 1.5 sodyum silikat/sodyum hidroksit oranına sahip karışım ile 28 gün yaş dayanımında sırasıyla 3.49 MPa ve 4.23 MPa olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımları eğilme dayanımları ile benzer sonuçlar göstermektedir. Ayrıca ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasında oldukça güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Çalışmanın ikinci safhasında gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda ise optimum alkali aktivatör/ uçucu kül oranı 0.45, sodyum silikat/ sodyum hidroksit oranı 1.5 ve sodyum hidroksit molaritesi 14 M olarak belirlenmiştir. GEP modeli kullanılarak ulaşılan veri tahminlerinin ÇDR modeli ile tahmin edilen verilere göre hedeflenen değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tonyalı, 2021; çalışmasında tuğla tozu, seramik tozu, mermer tozu, cam tozu, odun külü ve zeolit agregayla ikame edilerek geopolimer harçlar üretmiş ve bu harçların mekanik ve durabilite özellikleri incelemiştir. Geopolimer ana bağlayıcı olarak metakaolin kullanılmıştır. Üretilen numunleer üzerine ultrases hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. 28 günlük en yüksek basınç dayanımı değerleri tuğla tozu ikameli geopolimerlerde ortalama 63,5 MPa olarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçlarında belirgin bir sonuç elde edilememiştir. Ortalama eğilme dayanımı değerleri 8 MPa olarak belirlenmiştir. Endüstriyel atıkların eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olmadığı sonucuna varılmıştır.

Yarmada çekme dayanımı sonuçları eğilme dayanımı sonuçları ile benzer bir kanı oluşturmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak dayanım kayıpları gözlemlenmiştir. Cam tozu ikamel harçlar aşınma deneyinde en çok tahribata uğrayan harçlar olmuştur.

Güzelküçük, 2020; çalışmasını 3 aşamada gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında perlit ikameli geopolimer harçların dayanımları incelenmiştir. Aktivatör olarak farklı oranlarda sodyum hidroksit kullanılmıştır. 2 farklı su/bağlayıcı oranı (0.45, 0,5) çalışılmıştır. Numuneler 90 °C, 100 °C ve 110 °C sıcaklıklarda 24 ve 48 saat olmak üzere kürlenmiştir. İlk aşamada 24 farklı numune dökülmüştür. İkinci aşamada genleştirilmiş perlit standart kum yerine karışıma ikame edilerek üretilen geopolimerlerin karakterizasyonu yapılmıştır. İkinci aşamada hazırlana numunelerde su/bağlayıcı oranı 0.5, 0.55, 0.6, 1.3 olacak şekilde 26 farklı karışım üretilmiştir. Üçüncü aşamada ise belirli dayanım değerleri üzerindeki numunelerin birim hacim ağırlıkları, ısıl iletkenlikleri, cıvalı porozimetre deneyi ile boşluk miktarları ve mikro yapıları incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek basınç dayanımı 3,27 MPa, birim hacim ağırlığı 0,91 g/cm^3 , ısıl iletkenlik katsayısı ise 0,41 W/mK olan numunelerde elde edilmiştir. Standart kum ile elde edilen numunelerde ise en yüksek basınç dayanımı 47 MPa olarak tespit edilmiştir.

Ay, 2021; çalışmasında atık cam tabanlı geopolimer harçlara kalsiyum alüminat ikamesinin etkisini araştırmıştır. Kalsiyum alüminat çimentoları ayrı ayrı %5, %10 ve %15 oranlarında atık cam tozu tabanlı geopolimerlere ikame edilerek numuneler hazırlanmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat- sodyum hidroksit kullanılmıştır. Hazırlanan harçlar 90 °C'de 24 saat boyunca kürlenmiştir. Harçların fiziksel ve mekanik karakterizasyonu yapılarak SEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 28 günlük basınç dayanımlarında %15 kalsiyum alüminat çimento ikamesinin Isıdaç40 çimentosu için %55, Refro50 için %65 oranında artış sağladığı tespit edilmiştir.

Akçaözoğlu ve Güldür, 2017; yaptıkları çalışmada çimento ikame malzemesi olarak kalsit kullanımının bir miktar işlenebilirlik kaybına yol açtığını ancak belirgin bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Öte yandan minerallerin betonun donma çözülme durabilitesine olumlu etkisini ortaya koymuşlardır(Postacıoğlu, 1987,

Akçaözoğlu ve Güldür, 2017) Aydın ve Yıldırım ise yaptıkları çalışma sonucunda kalsit ikameli numunelerin ileri yaş dayanımlarının düşük çıktığını görmüştür. Kalsitin puzolanik özelliği olmayışının bu durumun sebebi olabileceğini öne sürmüştür (Aydın ve Yıldırım, 2012). Çimento ikamesi olarak oldukça başarılı sonuçlar gösteren kalsit polimer kompozitlerde dolgu malzemesi olarakta sıklıkla kullanılmaktadır (Uçurum vd., 2015; Yüce, 2022).

Cwirzen vd. (2014), metakaolin bazlı geopolimerlerde %30-50 oranındaki kalsit ikamesinin mekanik dayanımı artırdığını, ancak %70 oranına çıkıldığında bağlayıcılık etkisinin azaldığını ve dayanımın düştüğünü ortaya koymuştur. Benzer şekilde, düşük oranlarda kalsit ikamesinin geçirimsizliği artırdığı, su emme kapasitesini azalttığı ve işlenebilirliği olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir (Aboulayt, 2017). Ancak yüksek oranlı kalsit ikamesi, gözenekli bir matris yapısı oluşturarak hem dayanım hem de dayanıklılık açısından zayıf sonuçlar doğurabilmektedir (Rashad, 2022; Qian ve Song, 2015).

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

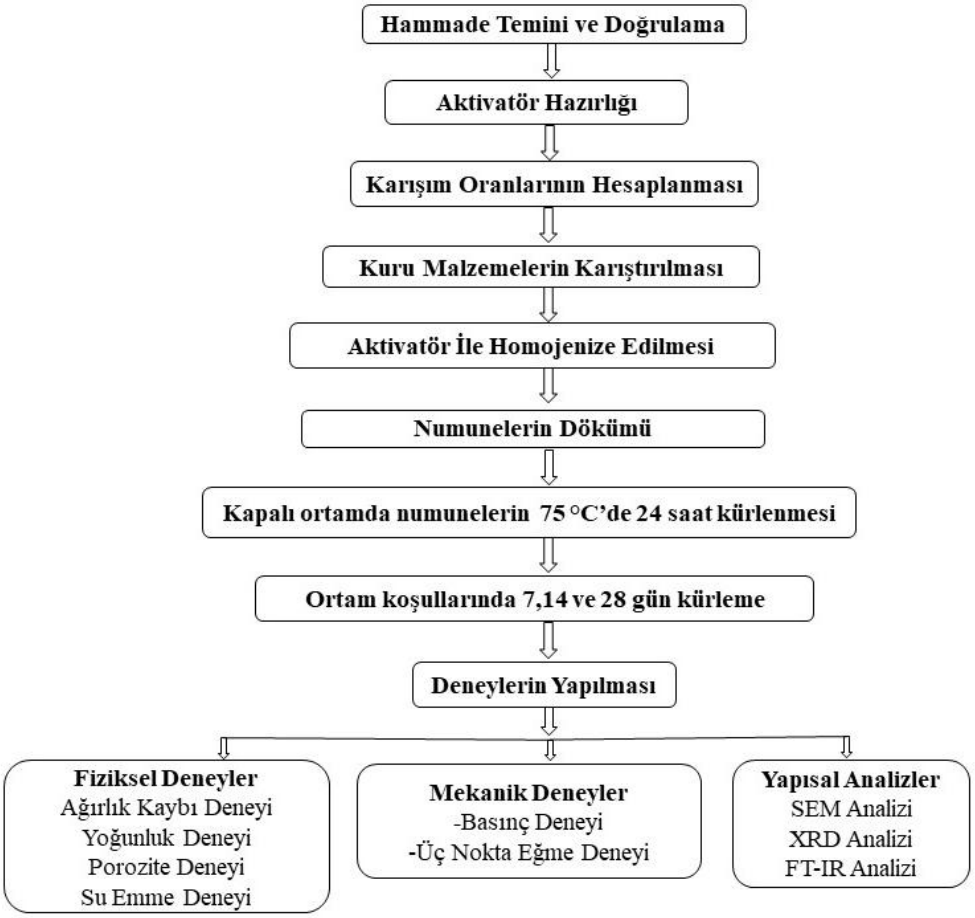
Bu tez çalışmasının temel amacı, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen alternatif bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktır. Bu kapsamda, mermer atığı katkılı vermikülit–vollastonit–kalsit esaslı geopolimerlerin üretimi gerçekleştirilerek mermer atığı ikamesinin geopolimerler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numuneler üzerinde fiziksel, mekanik deneyler ve yapısal analizler yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında 27 farklı karışım içeriğine sahip geopolimerin üretimi gerçekleştirilmiştir. NaOH derişimi, Na_2SiO_3/NaOH oranları, kür gün süreleri ve mermer atığı ikame oranları değişken olarak alınmıştır. Üç farklı NaOH molaritesi (5M-10M-15M) , Na_2SiO_3/NaOH oranı (1.5,2,2.5), kür gün sayısı (7,14,28) ve mermer atığı ikame oranı (%0, %10, %20) çalışılmıştır. İkinci aşamada ise, elde edilen deneysel veriler yapay sinir ağı (YSA) modeli ile analiz edilerek, geopolimerlerin mekanik davranışlarının tahmin edilebilirliği araştırılmıştır.

Bu yönüyle çalışma, hem endüstriyel atıkların yüksek katma değerli bir malzemeye dönüştürülmesine hem de yapay zekâ tabanlı modelleme yaklaşımlarının geopolimer araştırmalarında etkin biçimde kullanılmasına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Geopolimer Harçların Üretimi ve Karakterizasyonu

Geopolimer harçların üretimi sırasında bağlayıcı malzeme olarak kalsit, vollastonit ve vermikülit belirli karışım oranlarında kullanılmıştır. Vermikülit , kalsit, vollastonit tabanlı üretilen geopolimer harçlarda mermer atığı ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bütün kuru malzemeler karışımda kullanılmadan önce kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 20'de geopolimer harç üretim sürecinin akış şeması görülmektedir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat belirli oranlarda birlikte kullanılmıştır. Aşağıda başlıklar altında geopolimer üretimi sırasında kullanılan malzemelerin özellikleri ve geçirdikleri işlemler hakkında bilgiler verilmektedir.



Şekil 20. Deneysel tasarım akış diyagramı

2.1.1. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler

2.1.1.1. Mermer Tozu Atığı

Çalışmada yerel mermer işleme atölyelerinden temin edilen mermer atığı kullanılmıştır. Toplanan mermer atıkları 1050 °C sıcaklıktaki etüv fırınında 1 saat kalsine edilmiştir. Kalsinasyon işlemi tamamlandıktan sonra mermer atığı Şekil 25'te görülen bilyalı değirmende öğütülmüştür.

2.1.1.2. Kalsit

Çalışmada geopolimer bağlayıcı hammaddesi olarak kullanılan kalsit. 1050 °C sıcaklıkta etüv fırınında 1 saat kalsine edilen kalsit daha sonra Şekil 25'te görülen bilyalı değirmende öğütülmüştür.

2.1.1.3. Vermikülit

Çalışma kapsamında Sivas/ Yıldızeli bölgesindeki Organik Maden İşletmeleri'nden ham vermikülit temin edilmiştir. Elde edilen ham vermikülit 1050 °C sıcaklıkta etüv fırınında 1 saat kalsine edilmiştir. Vermikülitin etüv fırınına girmeden önceki ve kalsinasyon işleminden sonraki hali Şekil 21'de görülmektedir. Kullanılan ham ve kalsine vermikülitin kimyasal bileşen oranları Tablo 4'te verilmektedir.



Şekil 21. Kalsine edilmemiş vermikülit (a), kalsine edilmiş vermikülit (b)

2.1.1.4. Vollastonit

Vollastonit olarak doğal yollardan elde edilmiş Refsan'dan temin edilen vollastonit kullanılmıştır. Öncelikle 1050 °C sıcaklıkta 1 saat kalsine edilmiştir. Kullanılan vollastonitin kimyasal bileşen oranları Tablo 4'te verilmektedir.

2.1.1.5. Alkali Aktivatör

Çalışma kapsamında alkali aktivatör olarak Ref-San marka, cam suyu olarakta bilinen Na_2SiO_3 ve piyasadan temin edilen NaOH kullanılmıştır. Şekil 22'de görselleri verilen alkali aktivatörlerin özellikleri Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan alkali aktivatörlerin özellikleri

Na_2SiO_3 Solüsyonu	Sodyum Hidroksit (NaOH)
Na_2O: %26.98	M: 40 g/mol
SiO_2: %8.77	NaOH ≥ % 99,0
H_2O: %64.25	



Şekil 22. Sodyum silikat ve Sodyum hidroksit görseli

2.1.1.6. Çimento

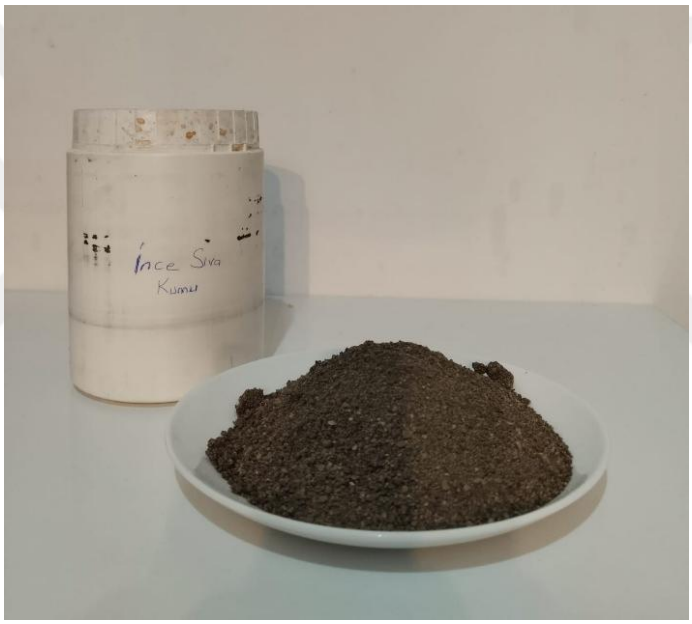
Şahit numunelerin hazırlanması sırasında Portland CEM 42 çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşen oranları Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Deneylerde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri

	SiO_2 %	Al_2O_3 %	TiO_2 %	Fe_2O_3 %	CaO %	MgO %	Na_2O %	K_2O %	MnO %	KK %
Ham vermikülit	36,90	17,70	2,18	11,20	3,54	16,4	0,15	2,64	0,15	9,14
Kalsine vermikülit	40,61	19,48	2,40	12,31	3,90	18,05	0,17	2,91	0,17	0.00
Portland çimento	21,28	6,03	0,00	3,05	65,95	2,53	0,32	0,85	0,00	0,00
Wollastonit	51,69	0,00	0,00	0,00	48,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.1.1.7. Agrega

Harç numunelerin üretiminde agrega görevi görmesi amacıyla ince sıva kumu kullanılmıştır. Kullanılan malzemeye ait görsel Şekil 23'de görülmektedir.



Şekil 23. Harç numunelerde kullanılan ince sıva kumu

2.1.2. Geopolimer Harç Karışım Oranları ve Üretim Süreci

Çalışma kapsamında 27 farklı içerikte karışım hazırlanmıştır. Öncelikle numuneler kodlanarak Tablo 5'te verilen oranlara göre hassas terazi (Şekil 24) yardımıyla tartılmış, kuru karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde kodlama işlemi ürünlerin ilk harfi (Vermikülit (V),Kalsit (K), Wollastonit (W), Mermer (M), Portland (P)) olacak şekilde yapılmıştır. Tablo 5'te ağırlıkça yüzde oranlarına göre karışım oranları her kod için görülmektedir.

Tablo 5. Geopolimer kuru malzeme karışım oranları

%,Gr	Kodu	Portland	Vermikülit	Kalsit	Wollastonit	VKW	Mermer CaO
1	P	100	0	0	0	0	0
2	VKW	0	25	50	25	100	0
3	10C	0	22,5	45	22,5	90	10
4	20C	0	20	40	20	80	20



Şekil 24. Hassas terazi

Tartılan karışımlar ve tozların Şekil 25'te verilen alümina bilyalı değirmenlerde öğütme ve karıştırma işlemleri yapılmıştır.



Şekil 25. Öğütme ve karıştırma işleminin gerçekleştirildiği alümina bilyalı değirmen

Isıl işlem çalışmaları Şekil 26'da verilen etüvde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 26. Deneysel çalışmalarda ısıl işlemler için kullanılan etüv.

Kalsinasyon işlemleri ise Şekil 27'de verilen fırında yapılmıştır.



Şekil 27. Deneysel çalışmalarda kalsinasyon için kullanılan fırın.

Çalışmaların bir kısmı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Seramik Laboratuvarında bir kısmı da Rize Tayyip Erdoğan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve Merkezi Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır.

2.1.2.1. Numunelerin Hazırlanması ve Üretimi

Temin edilen hammaddelerin ve vermikülit'in bünyelerindeki nemi gidermek amacıyla, her biri ayrı ayrı Şekil 25'deki etüv de 1050 ℃'de 24 saat bekletilmiştir. Her bir farklı karışım oranından 3 er adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde kodlama işleminde ürünlerin ilk harfi (Vermikülit (V),Kalsit (K), Wollastonit (W), Mermer (M)), NaOH Molar oranı (5-10-15), Na_2SiO_3/NaOH oranı (1,5-2,0-2,5) ve % CaO (mermer; 10-20) kullanılarak kodlama işlemi yapılmıştır. Önek alırsak "VKW5M:1,5" Vermikülit, kalsit, wollastonit, 5 M NaOH ve Na_2SiO_3/NaOH=1,5 numunesini ifade etmektedir. 20C-15M:2,5 Vermikülit, kalsit, wollastonit + %20 CaO - 15 M NaOH ve Na_2SiO_3/NaOH=2,5 numunesini ifade etmektedir. Deneylerde kullanılan hammaddelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları Tablo 4'te, kodlamalara göre hammadde ve mermer atığı katkı miktarı Tablo 5'te gösterilmiştir.

Numunelerin hazırlanması aşamasına geçmeden önce karışım tozlarına ve oranlarına karar verilmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılmıştır. NaOH derişimi 5-10-15 M olacak şekilde 3 farklı derişim çalışılmıştır. Na_2SiO_3/ NaOH oranı ise 1.5-2-2.5 olmak üzere 3 farklı oran alınmıştır. Hazırlanan geopolimerlerin kuru malzeme karışım oranları ise Tablo 5'te yüzdelik olarak verilmektedir. Tabloda portland çimentosu (P), Vermikülit- kalsit- vollastonit karışımı (VKW), %10 mermer atığı katkılı vermikülit- kalsit- vollastonit (10C) ve %20 mermer atığı katkılı vermikülit- kalsit- vollastonit (20C) olarak kodlanmıştır.

Değişken kombinasyonları göz önüne alındığında 27 farklı içerikte numune söz konusu olmaktadır. Tablo 6'da numunelerin oluşturulmuş reçeteleri ve kodları verilmektedir.

Tablo 6. Numunelerin oluşturulmuş reçeteleri ve kodları

		V	K	W	M	Kum	NaOH	Na2SiO3,	Na2SiO3 /NaOH	NaOH, M
		gr	gr	gr	gr	gr	ml	ml		
1	VKW5M:1,5	6	12	6	0	64	14,08	21,12	1,5	5
2	VKW10M:1,5	6	12	6	0	64	14,08	21,12	1,5	10
3	VKW15M:1,5	6	12	6	0	64	14,08	21,12	1,5	15
4	10C-5M:1,5	5,4	10,8	5,4	2,4	64	14,08	21,12	1,5	5
5	10C-10M:1,5	5,4	10,8	5,4	2,4	64	14,08	21,12	1,5	10
6	10C-15M:1,5	5,4	10,8	5,4	2,4	64	14,08	21,12	1,5	15
7	20C-5M:1,5	4,8	9,6	4,8	4,8	64	14,08	21,12	1,5	5
8	20C-10M:1,5	4,8	9,6	4,8	4,8	64	14,08	21,12	1,5	10
9	20C-15M:1,5	4,8	9,6	4,8	4,8	64	14,08	21,12	1,5	15
10	VKW5M:2	6	12	6	0	64	11,73	23,47	2	5
11	VKW10M:2	6	12	6	0	64	11,73	23,47	2	10
12	VKW15M:2	6	12	6	0	64	11,73	23,47	2	15
13	10C-5M:2	5,4	10,8	5,4	2,4	64	11,73	23,47	2	5
14	10C-10M:2	5,4	10,8	5,4	2,4	64	11,73	23,47	2	10
15	10C-15M:2	5,4	10,8	5,4	2,4	64	11,73	23,47	2	15
16	20C-5M:2	4,8	9,6	4,8	4,8	64	11,73	23,47	2	5
17	20C-10M:2	4,8	9,6	4,8	4,8	64	11,73	23,47	2	10
18	20C-15M:2	4,8	9,6	4,8	4,8	64	11,73	23,47	2	15
19	VKW5M:2,5	6	12	6	0	64	10,06	25,14	2,5	5
20	VKW10M:2,5	6	12	6	0	64	10,06	25,14	2,5	10
21	VKW15M:2,5	6	12	6	0	64	10,06	25,14	2,5	15
22	10C-5M:2,5	5,4	10,8	5,4	2,4	64	10,06	25,14	2,5	5
23	10C-10M:2,5	5,4	10,8	5,4	2,4	64	10,06	25,14	2,5	10
24	10C-15M:2,5	5,4	10,8	5,4	2,4	64	10,06	25,14	2,5	15
25	20C-5M:2,5	4,8	9,6	4,8	4,8	64	10,06	25,14	2,5	5
26	20C-10M:2,5	4,8	9,6	4,8	4,8	64	10,06	25,14	2,5	10
27	20C-15M:2,5	4,8	9,6	4,8	4,8	64	10,06	25,14	2,5	15

Mekanik özelliklerin tayini için 7. , 14. ve 28. gün yaş dayanımları göz önüne alınmış, her numuneden üçer tane hazırlanmıştır. Bu bağlamda her mekanik dayanım deneyi için 243 adet (270x50x30 mm) olacak şekilde 586 adet geopolimer numune hazırlanmıştır. Geopolimer harç karışımları sıvı/kuru oranı 0,50, % 64 ince sıva kumu olacak şekilde hazırlanmıştır. Şahit numuneler Portland çimentosu (P), ince sıva kumu ve su karışımı; su / çimento oranı 0,50, kuru malzeme/sıvı malzema oranı 88/12 olacak şekilde hazırlanmıştır.

Geopolimer karışım oranları belirlendikten sonra numunelerin hazırlanması aşamasına geçilmiştir. NaOH ve su tepkimesi ekzotermik bir tepkime olduğu için 5-

10 ve 15 M derişimlerde önceden hazırlanarak soğumaya bırakılmıştır. Bağlayıcılar ve atık mermer tozu Tablo 5'te görülen oranlarda karıştırılarak hazır hale getirilmiştir. Harç dökümünden hemen önce kuru karıştırma yöntemi ile ince sıva kumu ve bağlayıcı malzemelerin kuru karışımı yapılmıştır. Önceden hazırlanan NaOH çözeltisi 1.5-2-2.5 oranlarında olacak şekilde Na_2SiO_3 ile karıştırılmıştır. Üretimin son safhasında kuru malzemeler ve alkali aktivatör çözeltisi homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılarak basınç dayanımı için 50x50 mm ebatlarında, eğilme dayanımı için 230x50x30 mm ebatlarında numune kalıplarına dökülmüştür. 24 saat kalıp alma süresinden sonra numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Şekil 28'de basınç ve eğilme dayanımı deneyi için hazırlanan numuneler görülmektedir.



Şekil 28. Mekanik deneyler için hazırlanan numuneler; basınç deneyi numunesi (a), eğme deneyi numunesi (b)

Kalıptan çıkarılan numuneler alüminyum folyoya sarılarak 75 °C 'de etüv fırınında 24 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuştur. Şekil 29'da etüve yerleştirilen numuneler görülmektedir. Daha sonra 7-14 ve 28 gün yaş dayanımlarına kadar oda sıcaklığında beklemeye bırakılmıştır.



Şekil 29. Etüve yerleştirilen numuneler

2.1.3. Numunelere Uygulanan Test ve Deneyler

Hazırlanan geopolimer harçlara; Fiziksel Testler (% ağırlıkça küçülme, deneysel yoğunluk, porozite ve su emme testleri), Mekanik testler (3 nokta eğme dayanımı deneyi ve basınç dayanımı deneyi), FT-IR, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı Görünge Gözlemi (EDS) Analizi ile faz analizleri için X-Işını Difraktometresi (XRD) yapılmıştır. Ölçümler ve hesaplamalar 3 tekrarlı olarak yapılmış ve bunların aritmetik ortalamaları alınmıştır.

2.1.3.1. Fiziksel Deneyler

2.1.3.1.1. Ağırlık Kaybı Deneyi

Geopolimer harç numunelerin % ağırlıkça küçülmesi hassas terazi kullanılarak ölçülmüş ve Denklem (4) kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçümlerde Şekil 30'da gösterilen hassas terazi kullanılmıştır.

$$[(W_0 - W_p)/W_0] \times 100 \quad (4)$$

W_o= Geopolimer harcın döküm sonraki ağırlığı (gr)

W_p= Geopolimer harcın 7,14 veya 28 gün sonraki ağırlığı (gr)



Şekil 30. Deneysel çalışmalarda numune boyut ölçümlerinde kullanılan kumpas

2.1.3.1.2. Su Emme Deneyi

1050°C'de etüvde 24 saat kuruma işlemine tabi tutulan numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilip, tartımları alınmıştır ve belirlenen bir kaba konan numunelerin hepsi su içinde kalacak şekilde, su ilavesi yapılmıştır. Yoğunluğu ölçülecek numunelerin gözeneklerinde mevcut olan havanın çıkarılması ve gözeneklerin suyla dolması için her bir numune 24 saat süreyle suda bekletilmiştir. 24 saat suda bekletilen numunelerin yüzeyleri kabaca kurulama yapıldıktan sonra yeniden tartım alınarak doygun ağırlıklarının ölçümü yapılmıştır. Denklem (5)'de gösterilen formül ile su emme miktarı hesaplanmıştır (Boyraz,2008; Önen, 2013;Tapik,2019).

$$\left[\frac{W_2 - W_1}{W_1}\right] \times 100 \quad (5)$$

W_1: Kuru ağırlık (gr),

W_2: Su emdirilmiş doymuş ağırlık (gr),

2.1.3.1.3. Yoğunluk Deneyi

Sinterlenmiş olan numunelerin Şekil 31'deki Arşimet prensibine göre porozite ve yoğunluk hesaplamaları Denklem (6)'da gösterilen formül ile hesaplanmıştır.

$$\left[\frac{W_1}{W_3 - W_2}\right] \times 100 \quad (6)$$

W1: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

W2: 24 saat suda bekletme ile suya doygun hale getirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W3: 24 saat suda bekletme a ile suya doygun hale getirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (gr).



Şekil 31. Arşimed deney düzeneği.

2.1.3.1.4. Porozite Deneyi

Sinterlenmiş olan numunelerin Şekil 30'daki Arşimet prensibine göre % porozite hesaplamaları Denklem(7)'de gösterilen formül ile hesaplanmıştır.

$$\frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (7)$$

W_1: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

W_2: 24 saat suda bekletme ile suya doygun hale getirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W_3: 24 saat suda bekletme ile suya doygun hale getirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (gr).

2.1.3.2. Mekanik Deneyler

Numunelerin dayanım deneyleri Şekil 32'de gösterilen Yüksel Kaya Makine üretimi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Seramik Laboratuvarında bulunan 1 N yük hassasiyetli ve 5 kN gücündeki mekanik test cihazında yapılmıştır. Her bir numune için 5'er adet ölçüm yapılmış ve ortalama sonuçlar numunelerin mukavemet değerleri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 32. 3 nokta eğme ve basma dayanımı test cihazı

2.1.3.2.1. Üç Nokta Eğme Dayanımı Deneyi

Numunelerin eğme dayanımı TS EN 12390-5 standardına uygun olarak üç noktalı eğme testi ile bulunmuştur. Makineye yerleştirilen numunelere artan yükle kırılıncaya kadar basınç uygulanmış ve Denklem (8) kullanılarak dayanım belirlenmiştir (Boyraz,2008; Önen, 2013;Tapik,2019).

$$\sigma = \frac{3\times P\times L}{2\times b\times h^2} \times 100 \qquad (8)$$

P: Kırılma Yükü (N)

L: Destekler Arası Uzaklık (mm)

b: Numunenin Kırılan Yüzeyinin Eni (mm)

h: Numunenin Kırılan Yüzeyinin Yüksekliği (mm)

2.1.3.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Numunelerin basınç dayanımı TS EN 12390-4 standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyi ile bulunmuştur. Makineye yerleştirilen numunelere artan yükle kırılıncaya kadar basınç uygulanmış ve Denklem (9) kullanılarak basınç dayanımı belirlenmiştir.

$$fc = P/A \quad (9)$$

f_c: Basma dayanımı, MPa (N/mm²)

P: Kırılma anındaki maksimum yük, N

A: Numunenin yük altında kalan yüzey alanı, mm²

2.1.3.3. Yapısal Analizler

2.1.3.3.1. FT-IR

Çalışma kapsamında numunelerin fonksiyonel gruplarının ve bağ yapılarının berlilenmesi amacıyla PerkinElmer Spectrum 100 FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi) cihazı kullanılmıştır. Cihaz IR (kızılötesi) ışınımın geçişini veya engellenmesini inceleyerek numunenin optik özelliklerinin doğrulanması prensibi ile çalışmaktadır. Yüksek ölçüm tekrarlanabilirliği sağlayan özel ışık kaynağı ve, hatasız örnekleme sağlayan akıllı aksesuarları sayesinde güvenilir sonuçlar vermektedir. Sahip olduğu donanımlar sayesinde PerkinElmer Spectrum 100 FTIR, çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerinin kimyasal bağ yapılarını, Si–O–Al ve Si–O–Si titreşim piklerini belirlemede yüksek doğrulukla kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan FT-IR cihazına ait görsel Şekil Şekil 33'de görülmektedir.

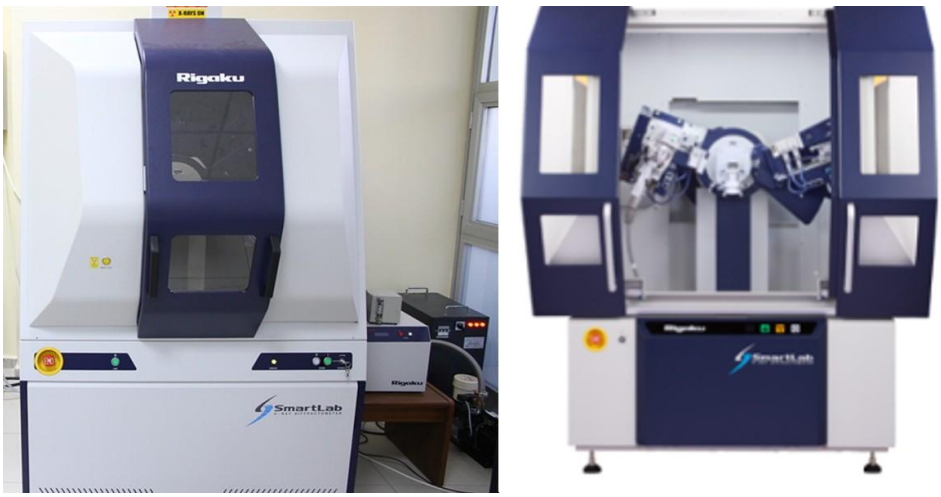


Şekil 33. Kullanılan FT-IR cihaz

FTIR analizleri VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 kodlu geopolimer betonlara uygulanmıştır. Belirlenen aralık 4000-650 cm -1 dir.

2.1.3.3.2. XRD

XRD analizleri kalsine malzemelere ve VKW-5M:1.5, 20C-15M:2.5 kodlu geopolimer harçlara uygulanmıştır. Şekil 34'deki Rize Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi araştırma laboratuvarın bünyesinde bulunan Rigaku / Smart Lab X-Işınları cihazı kullanılarak 10º ile 90º 2-teta aralığında X-ışınları analizi yapılmıştır. Cu-Kbeta radyasyonu kullanılan tüpün voltajı, analiz yapılırken 40 kV ve akımı 30 mA olarak belirlenmiştir. XRD paternlerinin faz analizlerinin tespiti Pananalitical X'Pert High Score programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 34. XRD Rigaku / Smart Lab X-Işınları cihazı

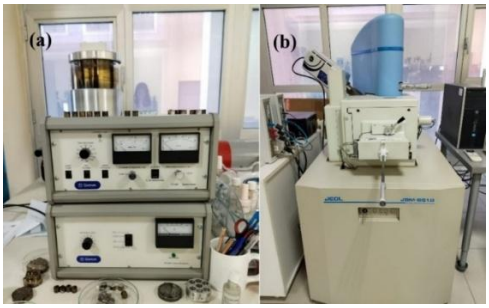
2.1.3.3.3. SEM- EDS

SEM analizleri VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 kodlu geopolimer harçlara uygulanmıştır. Analizler Şekil 35'teki Rize Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi araştırma laboratuvarın bünyesinde bulunan Görüntü İnceleme, EDS Spektrum ve Mapping özellikleri olan Jeol JSM-6610 SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numuneler iletkenlik sağlanması açısından önceden altınla kaplanmıştır. Numunelerin altın kaplamasının yapıldığı cihaz Şekil 36'da SEM cihazı ile birlikte görülmektedir.

JEOL JSM-6610, , 1–30 kV arasındaki geniş gerilim aralığında parlak ve yüksek kaliteli görüntüler elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Cihaz 10 cm çapa kadar olan örnek yüzeylerinden nanoyapılara kadar geniş bir büyütme aralığında gözlem yapabilme yeteneğine sahiptir. Sahip olduğu Oxford X-Max SDD (Silicon Drift Detector) dedektörü enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizlerinin yüksek sayım hızında ve yaklaşık 125 eV enerji çözünürlüğüyle gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu özellikleri sayesinde JEOL JSM-6610 metaller, polimerler ve geopolimer malzemeler gibi geniş bir malzeme yelpazesinde mikroyapısal, kimyasal ve kristalografik karakterizasyon çalışmalarında yüksek doğruluk ve detay vermektedir.



Şekil 35. Jeol JSM-6610 SEM cihazı



Şekil 36. Numune kaplama cihazı (a), SEM analizi cihazı (b)

2.2. Geopolimer Harçların Dayanımlarının Makine Öğrenmesi ile Modellenmesi

2.2.1. Veri Seti ve Parametreler

Çalışma kapsamında geopolimer harçların eğilme dayanımını tahmin etmek amacıyla bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Modelde kullanılan veriler laboratuvar ortamında yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Deneysel tasarımda farklı kimyasal bileşimler ve kürleme koşulları uygulanarak her biri belirli bir kombinasyonu temsil eden numuneler üretilmiştir. Böylece ağın farklı parametre düzeylerine duyarlılığı incelenebilmiştir. Yapay sinir ağı modeli MATLAB programı kullanılarak oluşturulmuştur.

Deneysel yöntemlerle oluşturulan eğme dayanımı veri seti %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test verisi olacak şekilde rastgele üç gruba ayrılmıştır. Bu oranlama, MATLAB'ın Neural Network Toolbox kütüphanesinde yaygın olarak önerilen dağılım olup, modelin hem öğrenme başarısını hem de genelleme kabiliyetini değerlendirmek için yeterli görülmektedir.

Modelde dört bağımsız değişken kullanılarak oluşturulmuştur:

%CaO içeriği: Geopolimer karışımında kullanılan katkı malzemesinin kalsiyum oksit oranı, bağlayıcı fazın oluşumunu ve dolayısıyla mekanik dayanımı etkileyen önemli bir faktördür.

NaOH molaritesi (M): Aktivasyon çözeltisinde kullanılan sodyum hidroksit derişimi, geopolimerizasyon reaksiyonunun hızını ve matrisin kimyasal bağ yapısını belirler.

Na_2SiO_3/NaOH oranı: Alkali aktivatör bileşenleri arasındaki oran, sistemin viskozitesini, çözünme davranışını ve nihai dayanım değerini doğrudan etkiler.

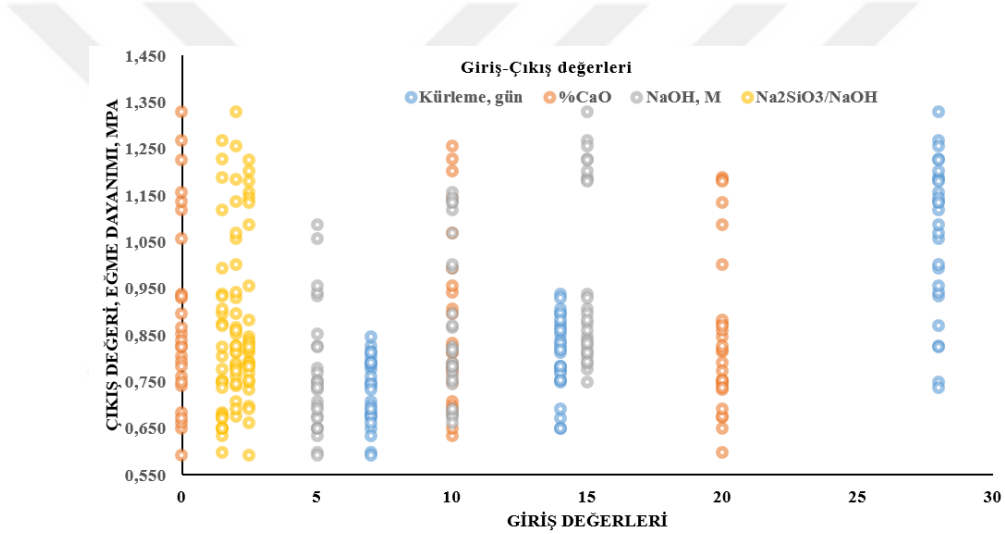
Kürleme süresi (gün): Numunelerin belirli sıcaklıkta ve nem koşulunda bekletilme süresi, reaksiyonun tamamlanma derecesini belirleyen en kritik parametrelerden biridir.

Bu dört parametre modelin girdi katmanını oluşturmuş; modelin çıktı (hedef) değişkeni ise geopolimer harçların eğilme dayanımı (MPa) olarak tanımlanmıştır. Tablo 7'de yapay sinir ağı modeli data parametreli verilmektedir.

Tablo 7. Yapay Sinir Ağı Modeli data parametreleri

Parametre	Birim	Yapı
Kürleme süresi	Gün	X_1 → Giriş
CaO miktarı	%	X_2 → Giriş
NaOH	Molarite	X_3 → Giriş
Na_2SiO_3/NaOH	Sayı	X_4 → Giriş
Eğme dayanımı	MPa	Y_1 → Çıkış

Veri seti, toplam 81 adet deneysel gözlemden oluşmaktadır. Her bir gözlem satırı, yukarıda belirtilen dört girdiye ve bir çıktıya karşılık gelen beş bileşeni içermektedir. Şekil 37'de yapay sinir ağı modellemesinde kullanılan veri seti parametreleri görülmektedir.



Şekil 37. YSA modellemesinde kullanılan veri seti

Deney sonuçları MATLAB ortamına aktarılmış, verilerin tutarlılığı kontrol edilmiş ve eksik ya da uç değerler bulunmadığı doğrulanmıştır.

Veri setindeki düzenlemelerden sonra model eğitimi öncesinde tüm değişkenler [0–1] aralığına normalize edilmiştir. Bu işlem, farklı büyüklükteki verilerin ağın öğrenme sürecini olumsuz etkilemesini engellemek amacıyla yapılmıştır. Normalizasyon, aşağıdaki Denklem (10) kullanılarak gerçekleştirilmiştir:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (10)$$

Bu formül kullanılarak her bir veri, kendi minimum ve maksimum değerleri arasında ölçeklendirilmiştir. Bu sayede tüm değişkenler aynı önem düzeyinde modele

girdi olarak verilmiştir. Bu yöntem ile yapay sinir ağının öğrenme hızını artırmak ve ağırlık güncellemelerinin daha kararlı gerçekleşmesini sağlamak amaçlanmıştır.

2.2.2. Yapay Sinir Ağı Yapısı

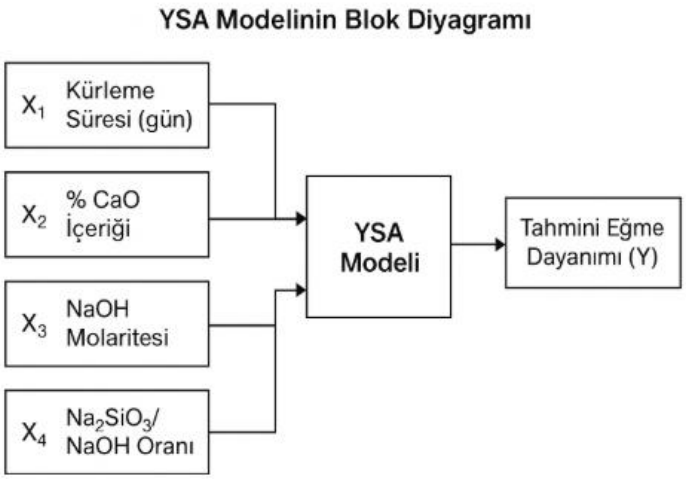
Bu çalışmada, geopolimer harçların eğilme dayanımını tahmin etmek amacıyla ileri beslemeli yapay sinir ağı (Feed-Forward Artificial Neural Network – FFANN) yapısı kullanılmıştır. Model, girdi katmanı, gizli katman(lar) ve çıktı katmanı olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Girdi katmanı dört nörondan oluşmakta olup, bu nöronlar %CaO içeriği, NaOH molaritesi, Na_2SiO_3/NaOH oranı ve kürleme süresini temsil etmektedir. Çıktı katmanında ise tek bir nöron bulunmaktadır ve bu nöron modelin tahmin ettiği eğilme dayanımı (MPa) değerini üretmektedir.

Gizli katmanlardaki nöron sayısı modelin doğruluğu ve genelleme yeteneği açısından en kritik parametrelerden biridir. Bu nedenle farklı nöron sayıları (örneğin 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 nöronlu yapılar) için denemeler yapılmış ve en yüksek korelasyon katsayısı (R) ile en düşük hata değerlerini (RMSE, MAE, MAPE) veren yapı en uygun model olarak belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda gizli katmanda 16 nöron içeren yapı en uygun model olarak seçilmiştir.

Küçük ve orta büyüklükte veri setlerinde yüksek doğruluk ve hızlı yakınsama sağladığı için eğitim algoritması olarak Levenberg–Marquardt (trainlm) yöntemi seçilmiştir. Ağırlık ve bias değerleri eğitim sürecinde hatayı minimize edecek şekilde seçilmiştir.

Aktivasyon fonksiyonu olarak gizli katmanda tanjant sigmoid (tansig) çıkış katmanında ise lineer (purelin) fonksiyonları kullanılmıştır. Tanjant sigmoid fonksiyonu, girdilerin doğrusal olmayan ilişkilerini öğrenmede etkili olurken, çıktı katmanındaki lineer fonksiyon tahmin değerlerinin sürekli (reel) aralıkta olmasını sağlamıştır.

Kürleme süresi 7-14-28 gün, CaO ilavesi 0-10-20, NaOH molaritesi 5-10-15, Na_2SiO_3/NaOH 1.5-2.-2.5 olacak şekilde bağımsız değişkenler belirlenmiştir. Eğme dayanımı değerleri ise 0,592-1,328 MPa aralığında değişmektedir. Şekil 38'de yapay sinir ağı blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 38. Tanımlanan YSA Modelinin Blok Diyagramı

Modelin eğitimi sırasında hata değerinin minimuma indirilmesi amacıyla ortalama karesel hata (Mean Squared Error, MSE) performans kriteri kullanılmıştır. Eğitim süreci, hata değerinin belirli bir eşik değerin altına düşmesi veya maksimum iterasyon sayısına ulaşılması durumunda sonlandırılmıştır.

2.2.3. Performans Kriterleri

Modelin tahmin başarısı, aşağıdaki istatistiksel kriterler üzerinden değerlendirilmiştir:

Korelasyon katsayısı (R)

Ortalama kare hata (RMSE)

Ortalama mutlak hata (MAE)

Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE)

Bu parametreler, modelin doğruluğu, genelleme gücü ve hata dağılımını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

2.2.4. Yapay Sinir Ağı Modeli Oluşturulması

Kullanılan veri seti ve parametreler modellemeye uygun hale getirilip yapay sinir ağ yapısı belirlendikten sonra MATLAB programında model oluşturulmuştur. Şekil 39 ve Şekil 40'da oluşturulan yapay sinir ağı MATLAB programı kodları görülmektedir.

```
%% Jeopolimer harç - Eğilme dayanımı (MPa) tahmini için YSA modeli
% geopolimer.xlsx dosyasından veri okur

clear; close all; clc;
rng('default'); % tekrarlanabilirlik için

%% 1) VERİYİ EXCEL'DEN OKU
% Excel dosyasında başlık satırı olmalı:
% Kürleme | %CaO | NaOH | Na2SiO3/NaOH | Eğilme dayanımı
filename = 'geopolimer.xlsx';
data=readtable("geopolimer.xlsx", 'VariableNamingRule', 'Preserve');

% Eğer başlıklar farklıysa elle değiştirilebilir, örn:
% data = readtable(filename, 'VariableNames',
{'Cure','CaO','NaOH','Ratio','Flexural'});

% Girdi (X) ve hedef (T) ayrımı
X_raw = data{:, 1:4}';  % 4x81
T_raw = data{:, 5}';    % 1x81

%% 2) NORMALİZASYON
[Xn, Xps] = mapminmax(X_raw, -1, 1);
[Tn, Tps] = mapminmax(T_raw, -1, 1);

%% 3) AĞ MİMARİSİ TANIMI
hiddenNeurons = 10; % Başlangıç için 10 nöron
net = fitnet(hiddenNeurons, 'trainlm');

% Eğitim / doğrulama / test oranları
net.divideFcn = 'divideblock';
net.divideParam.trainRatio = 0,70;
net.divideParam.valRatio   = 0,15;
net.divideParam.testRatio  = 0,15;
% Eğitim ayarları
net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.max_fail = 20;
net.performFcn = 'mse';

%% 4) EĞİTİM
[net, tr] = train(net, Xn, Tn);

%% 5) TAHMİN VE PERFORMANS
Yn = net(Xn);
Y_pred = mapminmax('reverse', Yn, Tps);
T_true = mapminmax('reverse', Tn, Tps);

% Performans metrikleri
mse_all = mse(T_true - Y_pred);
rmse_all = sqrt(mean((T_true - Y_pred),^2));
mae_all = mean(abs(T_true - Y_pred));
R_all = corrcoef(T_true, Y_pred); R_all = R_all(1,2);

fprintf('--- MODEL PERFORMANSI ---\n');
fprintf('MSE  : %,5f\n', mse_all);
fprintf('RMSE : %,5f\n', rmse_all);
fprintf('MAE  : %,5f\n', mae_all);
fprintf('R    : %,4f\n', R_all);

%% 6) GRAFİKLER
```

Şekil 39. Yapay sinir ağı MATLAB program kodları 1

```
figure; plotperform(tr); title('Eğitim Performansı (MSE)');
figure; plotregression(T_true, Y_pred); title('Regresyon: Gerçek vs Tahmin');

figure;
plot(T_true, 'o-'); hold on;
plot(Y_pred, 'x--');
legend('Gerçek','Tahmin');
xlabel('Örnek No'); ylabel('Eğilme Dayanımı (MPa)');
title('Gerçek vs Tahmin (Tüm Veri)');
grid on;

%% 7) MODELİ KAYDET
save('geopolimer_ann_model,mat','net','Xps','Tps','tr');

%% 8) YENİ GİRİŞ DEĞERİ İLE TAHMİN ÖRNEĞİ
% Örnek: 28 gün, %10 CaO, 10M NaOH, oran 2,0
newX = [28; 10; 10; 2];
newXn = mapminmax('apply', newX, Xps);
newYn = net(newXn);
newY = mapminmax('reverse', newYn, Tps);
fprintf('Yeni örnek tahmini: %,3f MPa\n', newY);

%% 9) Sonuçları Excel'e aktar
filename = 'geopolymer_results.xlsx';

% Tüm veri (gerçek vs tahmin)
T = table((1:length(T_true))', T_true', Y_pred', errors', ...
    'VariableNames', {'OrnekNo','Gercek_Egilme','Tahmin_Egilme','Hata'});

% Performans metriklerini ayrı sayfaya ekle
metrics = {
    'R', R_all;
    'MSE', MSE_all;
    'RMSE', RMSE_all;
    'MAE', MAE_all;
    'MAPE', MAPE_all
    };

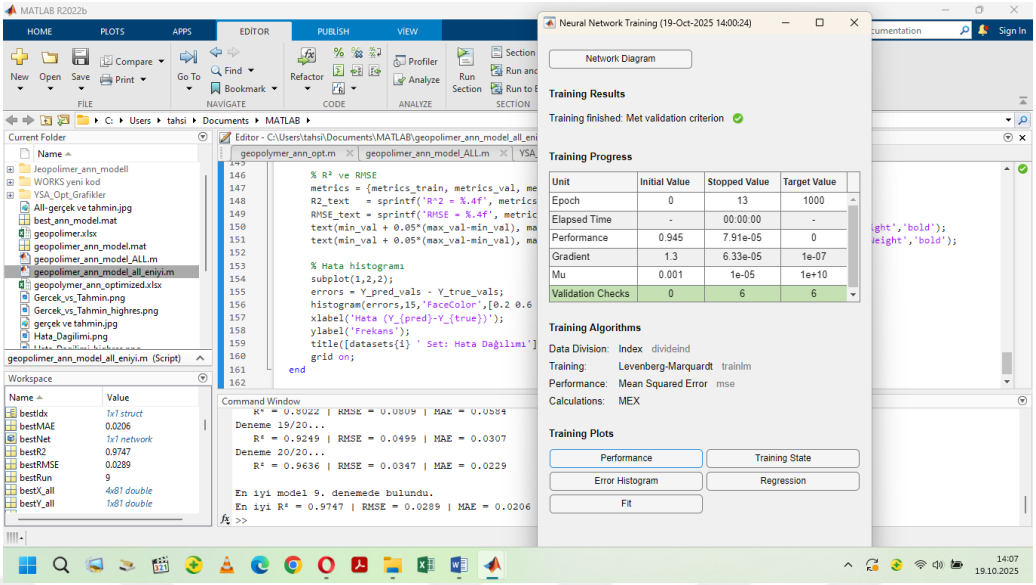
metricsTable = cell2table(metrics, 'VariableNames', {'Metrik','Deger'});

% Excel dosyasına yaz
writetable(T, filename, 'Sheet', 'Veriler');
writetable(metricsTable, filename, 'Sheet', 'Performans');

fprintf('\nSonuçlar Excel dosyasına kaydedildi: %s\n', filename);
```

Şekil 40. Yapay sinir ağı MATLAB program kodları 2

Parametrelerin belirlenmesi deneme-yanılma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Model başlangıçta belirlenen parametrelerle eğitilmiş ve ardından performansı değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, sistem performansını en iyi temsil eden ve istatistiksel parametreler için en uygun değerleri sağlayan YSA modelini seçmeye özen gösterilmiştir. Şekil 41'de MATLAB program çalışma görüntüsü görülmektedir.



Şekil 41. MATLAB program görüntüsü

20 deneme üzerinden gerçekleştirilen model eğitimleri sonucunda, performans metrikleri; R^2 (korelasyon katsayısı), RMSE (Root Mean Square Error – Ortalama Kare Hata Kökü) ve MAE (Mean Absolute Error – Ortalama Mutlak Hata) üzerinden değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Geopolimer Harçlar

3.1.1. Fiziksel Deneyler

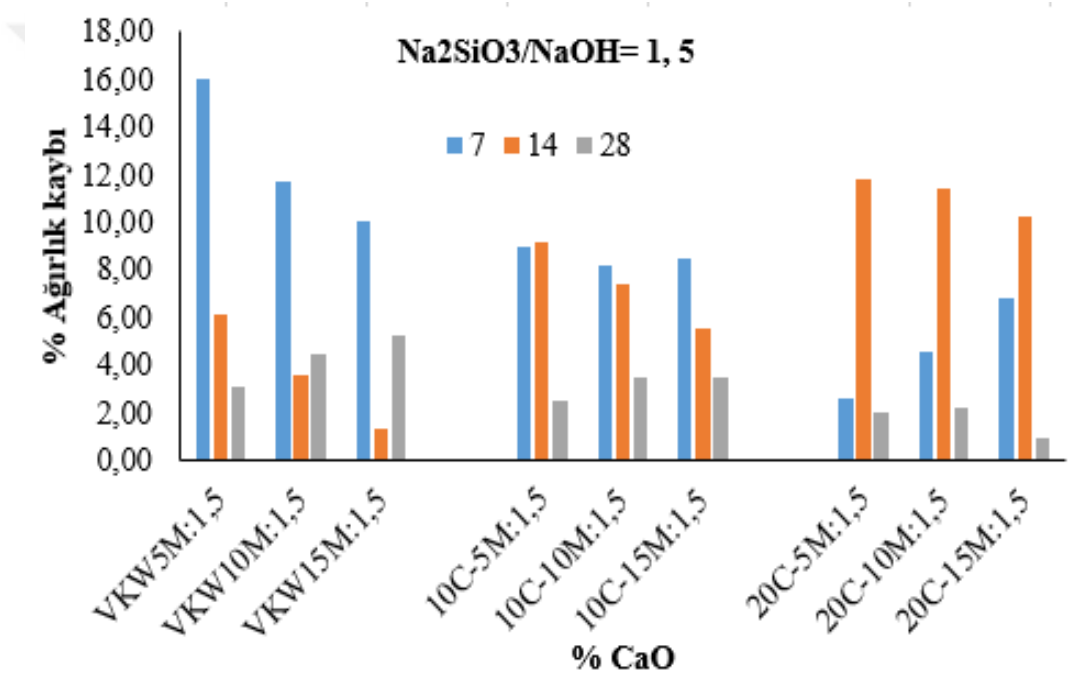
3.1.1.1. Ağırlık Kaybı

Çalışma kapsamında 27 farklı karışım oranına sahip geopolimer harç numune için ağırlık kaybı analizi yapılmıştır. Tablo 8'de geopolimer harçların kür gün sürelerine göre ağırlık kayıpları görülmektedir.

Tablo 8. Geopolimer harç numunelerin kür gün sayılarına göre % ağırlık kaybı

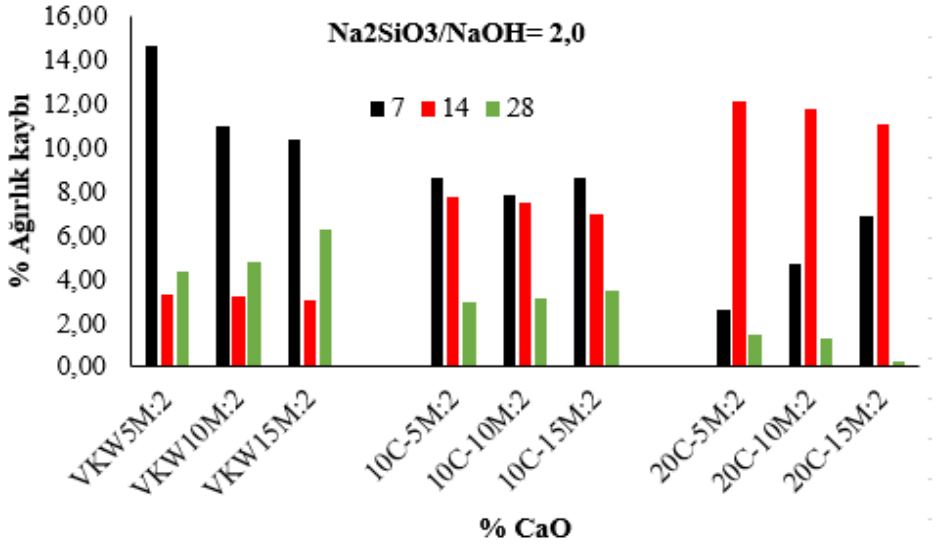
	Numune kodu	7 gün	14 gün	28 gün
1	VKW5M:1,5	15,99	6,17	3,09
2	VKW10M:1,5	11,66	3,60	4,47
3	VKW15M:1,5	10,00	1,33	5,26
4	10C-5M:1,5	8,95	9,13	2,53
5	10C-10M:1,5	8,19	7,40	3,48
6	10C-15M:1,5	8,52	5,50	3,47
7	20C-5M:1,5	2,60	11,81	1,96
8	20C-10M:1,5	4,53	11,41	2,22
9	20C-15M:1,5	6,83	10,25	0,92
10	VKW5M:2	14,64	3,35	4,38
11	VKW10M:2	10,99	3,24	4,78
12	VKW15M:2	10,38	3,04	6,27
13	10C-5M:2	8,63	7,75	2,99
14	10C-10M:2	7,85	7,49	3,10
15	10C-15M:2	8,66	6,97	3,49
16	20C-5M:2	2,64	12,14	1,50
17	20C-10M:2	4,70	11,74	1,28
18	20C-15M:2	6,87	11,05	0,22
19	VKW5M:2,5	14,42	9,93	4,58
20	VKW10M:2,5	11,64	10,91	4,86
21	VKW15M:2,5	10,54	11,46	6,98
22	10C-5M:2,5	8,40	11,23	2,75
23	10C-10M:2,5	8,24	11,49	2,58
24	10C-15M:2,5	8,71	11,64	3,33
25	20C-5M:2,5	2,67	12,48	1,04
26	20C-10M:2,5	4,86	12,07	0,35
27	20C-15M:2,5	6,91	11,82	0,02

Şekil 42'de Na_2SiO_3/NaOH =1.5 oranındaki numunelerin yüzde ağırlık kayıp grafiği görülmektedir. VKW serilerinde en yüksek ağırlık kayıplarının 7 günlük numunelerde olduğu 14 günlük ağırlık kayıplarının genel olarak 28 günlük kayıplara kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Bu durum molar derişim oranındaki değişiminin reaksiyon sürecini etkilemesi ile açıklanmaktadır.10C serilerinde diğer serilere kıyasla daha dengeli bir ağırlık kaybı görülmektedir. Yapı mekanizması kür gün sayısı arttıkça daha kararlı bir hale gelmektedir. 20 C serisinde ise 14 günlük ağırlık kayıplarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. En az ağırlık kaybı da 20 C serisinin 28 günlük ağırlık kayıplarında tespit edilmiştir.



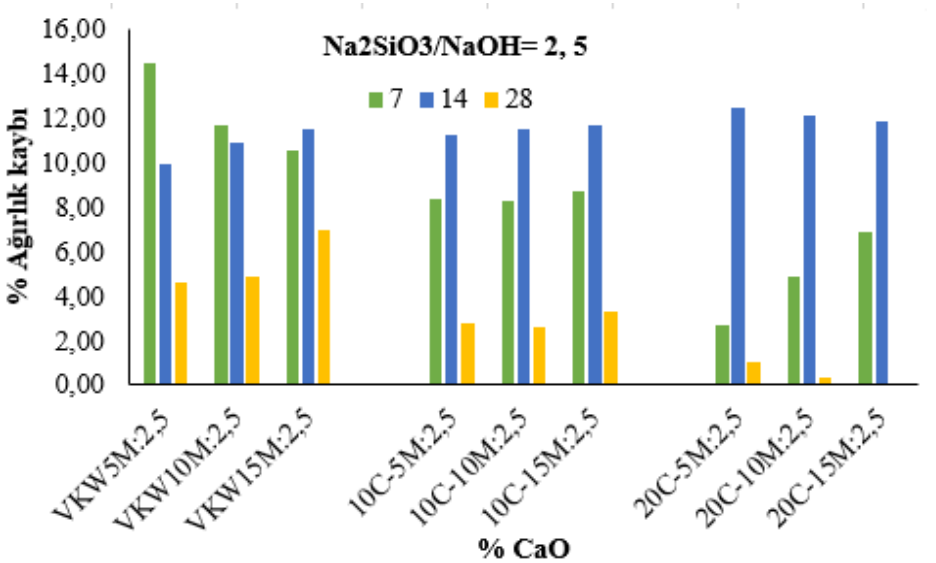
Şekil 42. Na_2SiO_3/NaOH =1.5 geopolimer harç numune % ağırlık kayıpları

Şekil 43'de Na_2SiO_3/NaOH =2 oranındaki numunelerin yüzde ağırlık kayıp grafiği görülmektedir. Grafik değerleri incelendiğinde mermer atığı ikamesi arttıkça 7 ve 28 günlük ağırlık kayıplarında belirgin bir azalma görülmektedir. Öte yandan 14 günlük ağırlık kayıplarında mermer atığı ikamesindeki artış ağırlık kaybını artırmaktadır. 28 günlük numunelerin molar derişim artışları değerlendirildiğinde VKW serisinde NaOH derişimi arttıkça ağırlık kaybında artış gözlemlenmiştir. Ancak 10 C numunelerinde artış oranı azalırken 20 C serisinde ağırlık kayıpları azalmaya başlamıştır.



Şekil 43. Na_2SiO_3/NaOH =2 geopolimer harç numune % ağırlık kayıpları

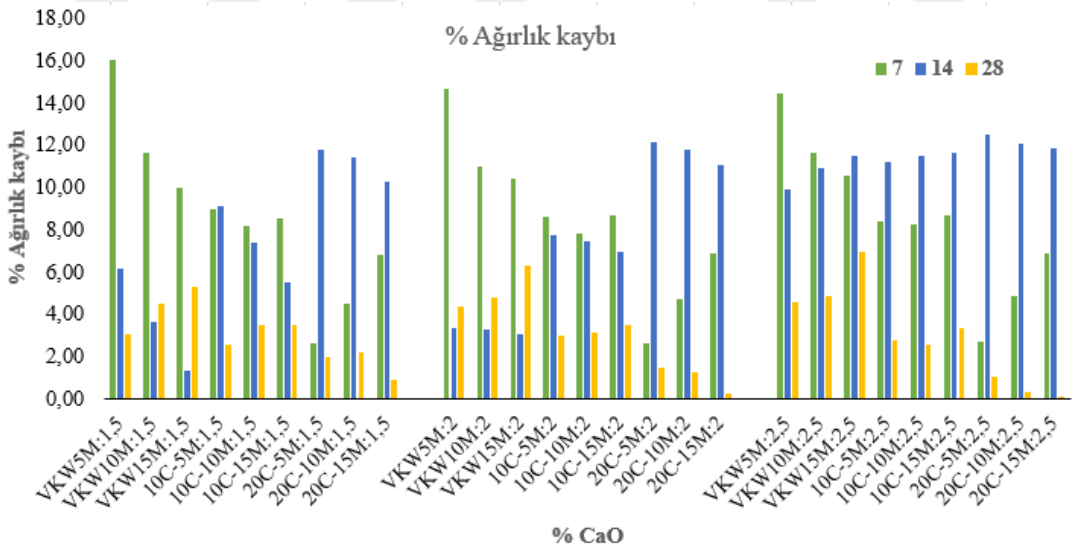
Şekil 44'te Na_2SiO_3/NaOH =2.5 oranındaki numunelerin yüzde ağırlık kayıp grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde VKW serisinde 7 ve 14. Gün ağırlık kayıplarının birbirine yakın olduğu ve mermer ikamesindeki artışla 7. Gün ağırlık kayıplarında azalma 14. Gün ağırlık kayıplarında artış gözlemlenmiştir. Ayrıca mermer ikamesindeki artışın 28 günlük ağırlık kayıplarında belirgin bir azalmaya neden olduğu da görülmektedir.



Şekil 44. Na_2SiO_3/NaOH =2.5 geopolimer harç numune % ağırlık kayıpları

Şekil 45 incelendiğinde genel olarak kür gün süresi arttıkça ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir. 7 günlük sonuçlarda özellikle düşük molariteli nuumnelerde

yüksek değerler görülmektedir. Örneğin, VKW5M:1,5 karışımı 7 günde %15,99 iken 28 günde %3,09'a düşmüştür. Bu duruma erken yaşta bağlayıcı jellerin yapısının zayıf oluşunun neden olduğu düşünlmektedir. Kür süresi uzadıkça geopolimer matrisi gelişerek daha kararlı bir yapı oluşturmaktadır. Özellikle VKW serisinin 7 günlük ağırlık kaybı yüksek değerler alırken (%10–16), mermer tozu ikamesinin artmasıyla (10–20C) azalmaktadır. Bu durum, yüksek kalsiyum içeriğinin erken dönemde jelin yapısını stabilize ederek su kaybını sınırladığını düşündürmektedir. 14. Günlük numunelerde özelikle 20C numunelerinde ağırlık kaybında ani bir artış görülmektedir. Bu durum yüksek kalsiyum içeriğinin karbonatlaşmaya veya gözenekli bir yapıya neden olması ile ilişkilendirilmektedir. 28 günlük kür sonunda VKW:1.5,2 serileri hariç tüm numunelerde ağırlık kaybı belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Geopolimerleşmenin ilerleyen döneminde oluşan matrisin daha düzenli bir hale gelerek numunelerin stabilitesini artırdığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, Na_2SiO_3 / NaOH oranının artışı (2 ve 2,5) ağırlık kaybının uzun dönemde daha düşük olmasına katkı sağlamıştır. Optimum ağırlık kaybı değerleri 10C numunelerde 10 M ve 15 M çözeltilerde elde edilmiştir.



Şekil 45. Geopolimer harç numunelerin kür gün sayılarına göre % ağırlık kaybı

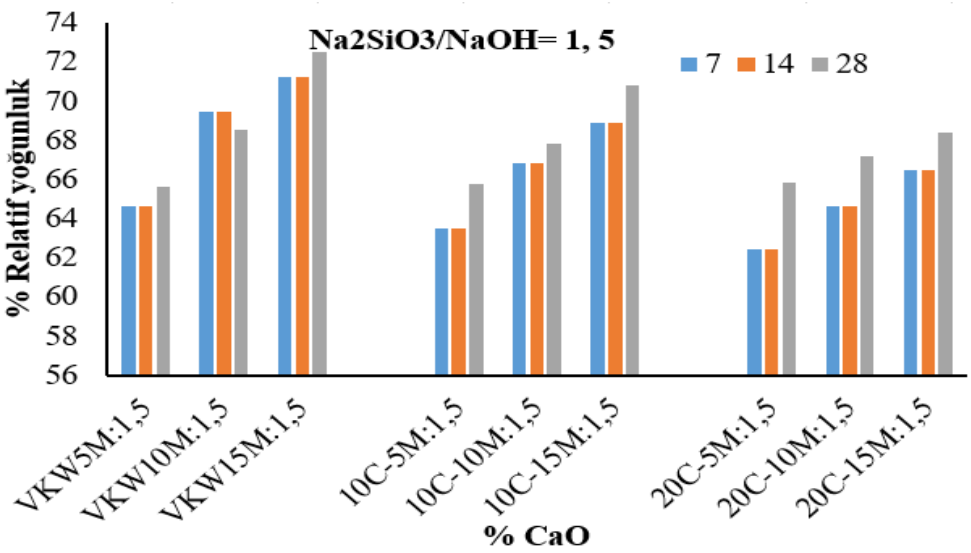
3.1.1.2. Relatif Yoğunluk

Relatif yoğunluk analizi yapılan geopolimer harç numunelerin Tablo 9'da analiz sonuçları % olarak verilmektedir.

Tablo 9. Geopolimer harç numune relatif yoğunluk analizi

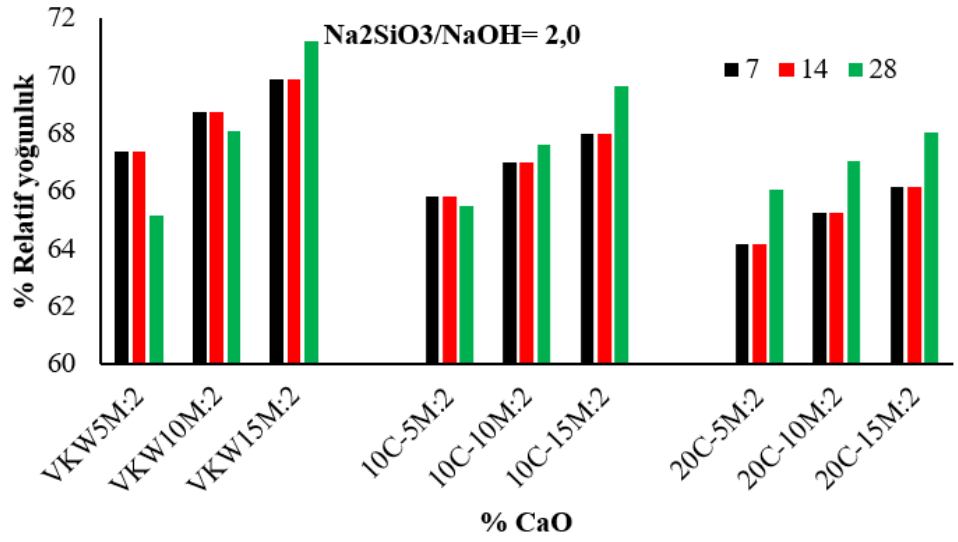
		7 gün	**14 gün**	**28 gün**
1	VKW5M:1,5	64,6188	64,619	65,6362
2	VKW10M:1,5	69,4644	69,464	68,5373
3	VKW15M:1,5	71,2539	71,254	72,54
4	10C-5M:1,5	63,4757	63,476	65,7644
5	10C-10M:1,5	66,8516	66,852	67,821
6	10C-15M:1,5	68,8865	68,886	70,7993
7	20C-5M:1,5	62,4697	62,470	65,8752
8	20C-10M:1,5	64,6204	64,620	67,2092
9	20C-15M:1,5	66,4565	66,457	68,4172
10	VKW5M:2	67,4004	67,400	65,133
11	VKW10M:2	68,7452	68,745	68,0896
12	VKW15M:2	69,9064	69,906	71,2089
13	10C-5M:2	65,8233	65,823	65,4782
14	10C-10M:2	66,9931	66,993	67,6253
15	10C-15M:2	67,9732	67,973	69,6676
16	20C-5M:2	64,1717	64,172	66,0764
17	20C-10M:2	65,264	65,264	67,0461
18	20C-15M:2	66,1621	66,162	68,0466
19	VKW5M:2,5	69,0243	69,024	64,5404
20	VKW10M:2,5	68,9851	68,985	65,4156
21	VKW15M:2,5	66,4109	66,411	70,404
22	10C-5M:2,5	67,3269	67,327	65,5347
23	10C-10M:2,5	67,3782	67,378	66,2695
24	10C-15M:2,5	66,1346	66,135	69,0233
25	20C-5M:2,5	65,8162	65,816	65,9987
26	20C-10M:2,5	65,8606	65,861	66,9555
27	20C-15M:2,5	65,8991	65,899	67,5094

Şekil 46'da Na_2SiO_3/NaOH =1.5 geopolimer harç numunelerin % relatif yoğunlukları görülmektedir. Grafik incelendiğinde genel olarak mermer ikamesindeki artışın relatif yoğunlukta azalmaya nede olduğu görülmektedir. Ayrıca her seri kendi içinde incelendiğinde sistematik bir şekilde NaOH derişimdeki artışın relatif yoğunlukta artışa neden olduğu tespit edilmiştir. En yüksek relatif yoğunluk VKW15M:1.5 numunesinde gözlemlenirken en düşük relatif yoğunluğun 20C-5M:2.5 numunesine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 46. Na_2SiO_3/NaOH=1.5 geopolimer harç numune % relatif yoğunluk

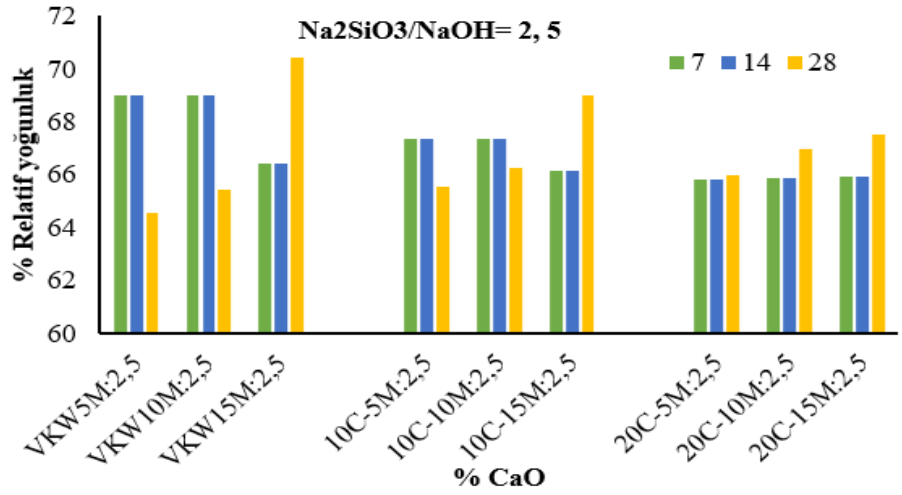
Şekil 47'de Na_2SiO_3/NaOH =2 geopolimer harç numunelerin % relatif yoğunlukları görülmektedir. Genel olarak NaOH derişimi arttıkça relatif yoğunlukta artış gözlemlenmiştir. Ayrıca mermer ikamesindeki artışın relatif yoğulukta azalmaya sebep olduğu görülmektedir.



Şekil 47. Na_2SiO_3/NaOH=2 geopolimer harç numune % relatif yoğunluk

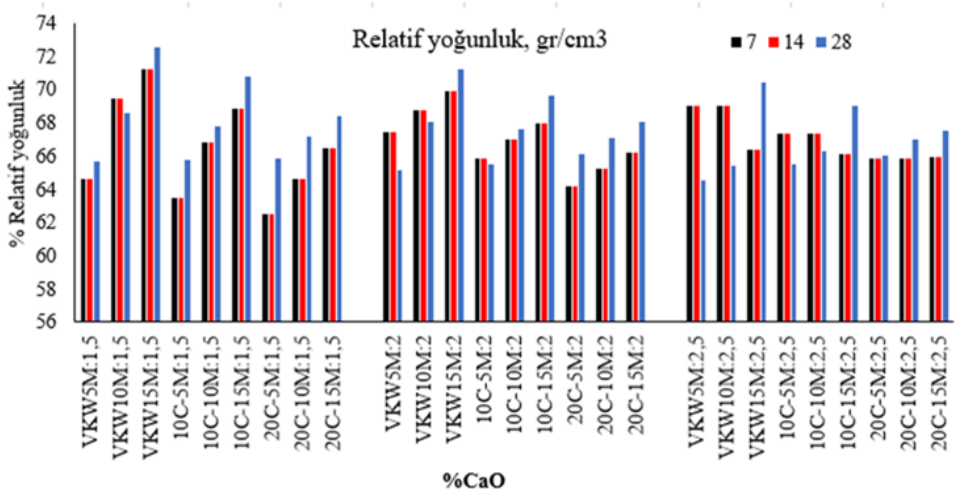
Şekil 48'de Na_2SiO_3/NaOH =2.5 geopolimer harç numunelerin % relatif yoğunlukları görülmektedir. Grafik verileri incelendiğinde 1.5 ve 2 Na_2SiO_3/NaOH oranlarına kıyasla NaOH molarite artışının 28 günlük relatif yoğunlukların artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. 7 ve 14. Gün relatif yoğunluklarında ise molarite artışı

ile ters bir orantı olsa da mermer atığı tozu ikamesi ile bu farkın kapandığı görülmektedir. 20 C serisinde molarite artışı relatif yoğunluklar arasında diğer serilere kıyasla daha az bir etki göstermiştir.



Şekil 48. Na_2SiO_3/NaOH=2.5 geopolimer harç numune % relatif yoğunluk

Genel olarak numunelerde kür gün süresi arttıkça relatif yoğunluğun arttığı görülmektedir. Özellikle 20 C numunelerinin tümünde ileri kür gün sayılarında relatif yoğunlukta artış gözlemlenmiştir. Öte yandan Şekil 49 'daki grafik incelendiğinde tüm numuneler arasında 20 C geopolimer harç numunelerinin relatif yoğunluklarının daha düşük kaldığı görülmektedir.



Şekil 49. Geopolimer harç numunelerin % relatif yoğunlukları

Na_2SiO_3 / NaOH oranının artışı 7 ve 14. Gün relatif yoğunluklarında artışa neden olmuştur. Na_2SiO_3 / NaOH 1.5 grafiğinde tüm 28. gün değerleri en yüksek

değerler olurken oranın 2 olduğu durumda VKW 5M-10M numunelerinde 28. gün relatif yoğunluğun azaldığı 2.5 olduğunda ise bu azalmanın daha net görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum geopolimerler için optimum oranın ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Her durumda en düşük relatif yoğunluğun 20C serisinde gözlemlenmesi bu serideki numunelerin daha boşluklu ve çatlaklı bir yapıya sahip olabileceğini düşündürmektedir.

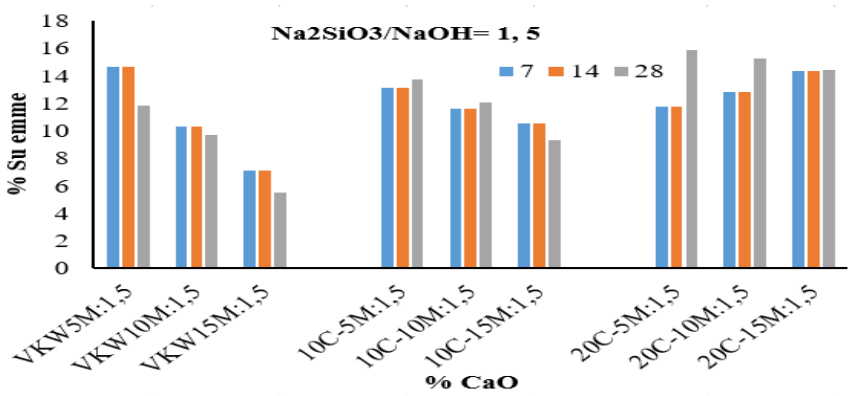
3.1.1.3. Su Emme

Relatif yoğunluk analizi yapılan geopolimer harç numunelerin Tablo 10'da analiz sonuçları % olarak verilmektedir.

Tablo 10. Geopolimer harç numune su emme deneyi sonuçları

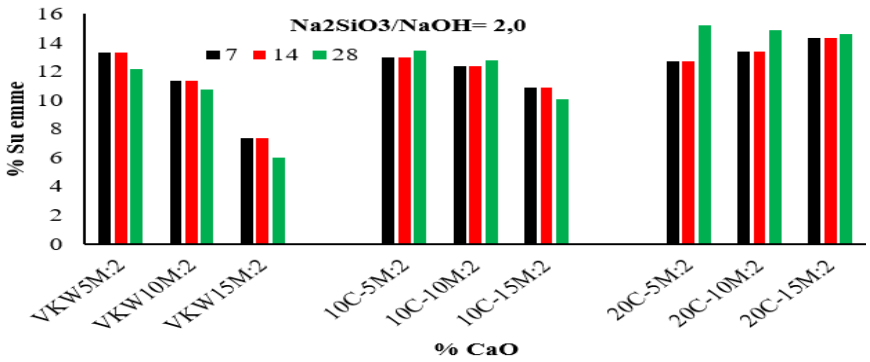
		7 gün	14 gün	28 gün
1	VKW5M:1,5	14,6686	14,669	11,8721
2	VKW10M:1,5	10,3257	10,326	9,71271
3	VKW15M:1,5	7,14051	7,141	5,49404
4	10C-5M:1,5	13,136	13,136	13,7886
5	10C-10M:1,5	11,6486	11,649	12,0862
6	10C-15M:1,5	10,5594	10,559	9,34009
7	20C-5M:1,5	11,7595	11,759	15,9041
8	20C-10M:1,5	12,854	12,854	15,2484
9	20C-15M:1,5	14,3274	14,327	14,4244
10	VKW5M:2	13,3071	13,307	12,181
11	VKW10M:2	11,3437	11,344	10,72
12	VKW15M:2	7,36651	7,367	5,96634
13	10C-5M:2	13,0029	13,003	13,4547
14	10C-10M:2	12,3437	12,344	12,7958
15	10C-15M:2	10,8552	10,855	10,0464
16	20C-5M:2	12,6671	12,667	15,1769
17	20C-10M:2	13,3824	13,382	14,8894
18	20C-15M:2	14,2948	14,295	14,6014
19	VKW5M:2,5	14,8777	14,878	14,5596
20	VKW10M:2,5	13,8179	13,818	13,7932
21	VKW15M:2,5	12,7042	12,704	12,872
22	10C-5M:2,5	14,1619	14,162	14,4398
23	10C-10M:2,5	13,8406	13,841	14,17
24	10C-15M:2,5	13,5891	13,589	13,8615
25	20C-5M:2,5	13,4994	13,499	14,7035
26	20C-10M:2,5	13,863	13,863	14,7057
27	20C-15M:2,5	14,2655	14,265	15,0222

Şekil 50'de Na_2SiO_3/NaOH =1.5 geopolimer harç numuneleri için su emme değerleri görülmektedir. Genel bir ifadeyle mermer atığı ikamesindeki artışın su emme değerlerinde artışa neden olduğu görülmektedir. NaOH molaritesindeki artışın ise VKW ve 10 C serisindeki numunelerde su emme değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Ancak 20 C serisinde NaOH derişimindeki artışla beraber su emme oranında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 50. Na_2SiO_3/NaOH=1.5 geopolimer harç numune % su emme değerleri

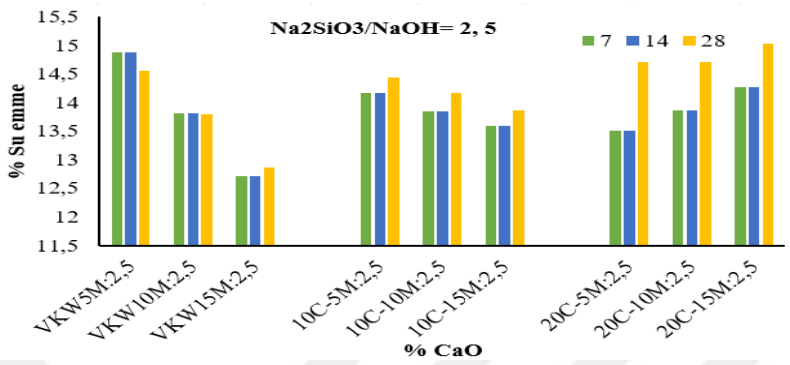
Şekil 51'de Na_2SiO_3/NaOH =2 geopolimer harç numuneleri için su emme değerleri görülmektedir. Şekil 50'deki su emme bulguları ile benzer bulgular görülmektedir. Öte yandan Alkali aktivatörlerin oranındaki artışın su emme değerlerinde genel bir düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir. Huseien ve arkadaşları (2016) çalışmalarında alkali aktivatör oranındaki artışın su emme değerlerinde genel bir düşüşe neden olduğunu tespit etmiştir.



Şekil 51. Na_2SiO_3/NaOH = 2 geopolimer harç numune su emme değerleri

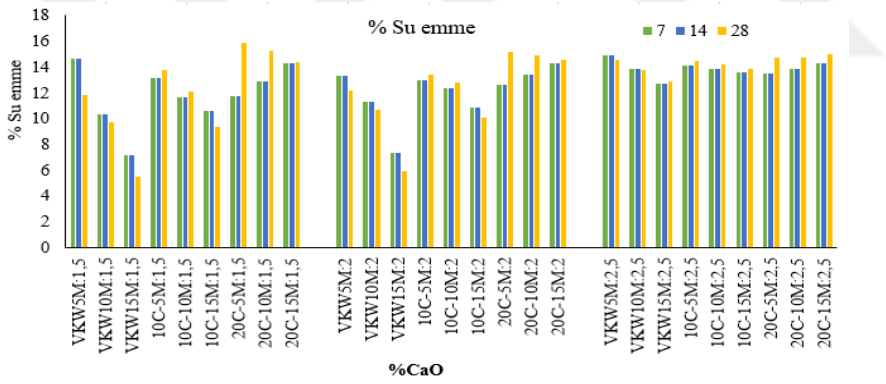
Şekil 52'de Na_2SiO_3/NaOH =2.5 geopolimer harç numuneleri için su emme değerleri görülmektedir. Numunelerin hepsinde 7 ve 14. Gün su emme değerlerinde

bir değişim yaşanmazken 28. Gün değerlerinde farklılık gözlemlenmiştir. VKW ve 10C serisi için NaOH molaritesi arttıkça su emme değerlerinde azalma gözlemlenirken 20C numunelerinde derişimdeki artış su emme değerlerinde artışa neden olmuştur.



Şekil 52. Na_2SiO_3/NaOH = 2.5 geopolimer harç numune su emme değerleri

Şekil 53'te su emme deneyi sonuçları kıyaslamalı olarak görülmektedir. Genel olarak tüm serilerde NaOH molaritesi arttıkça su emme yüzdesinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 53. Geopolimer harç numune su emme değerleri

Shamsah ve arkadaşları (2025) yaptıkları çalışmada geopolimer betonlarda NaOH molaritesindeki artışın gözenekli yapıyı azaltarak su emme değerlerinde düşüşe neden olduğunu belirmiştir. Ancak alkali aktivatör oranındaki artışla birlikte NaOH molaritesinin etkisinin daha geri planda kaldığı tespit edilmiştir. En yüksek su emme değeri 20C-5M:1.5 numunesinde 28. günde (%15.9041) görülürken en düşük su emme değeri VKW-15M:1.5 numunesinde (%5.49404) görülmüştür. Kalsine mermer atığı ikameli numunelerde molarite artışı ile su emme yüzdesindeki azalma ilişkisi bu

ikilinin oluşan C-S-H bağlarını destekleyerek gözenekliliğin ve su emme yüzdesinin azalması ile ilişkilendirilmektedir. Hoy ve arkadaşları (2025) da çalışmalarında kalsiyum ikamesinin yüksek NaOH molaritesi ile iyi uyum sağlayarak gözenekli yapıyı azalttığını tespit etmişlerdir.

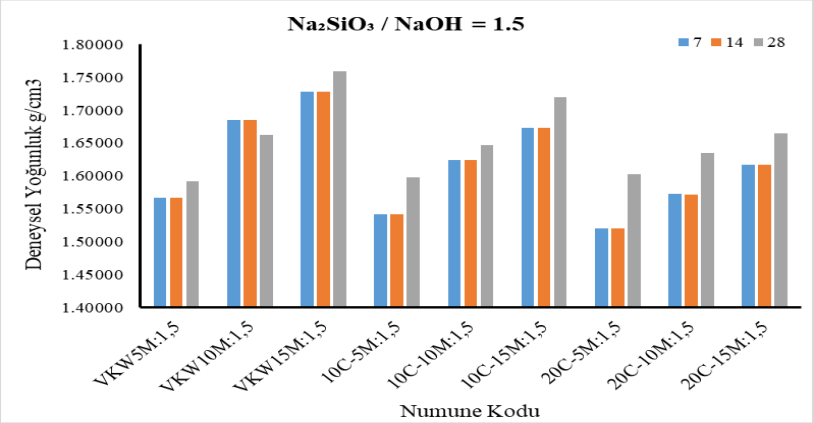
3.1.1.4. Deneysel Yoğunluk

27 farklı bileşendeki numune üzerinde deneysel yoğunluk analizi yapılmıştır. Tablo 11'de elde edilen deney sonuçları kür günlerine göre verilmektedir.

Tablo 11. Geopolimer harç numune yoğunluk deneyi sonuçları

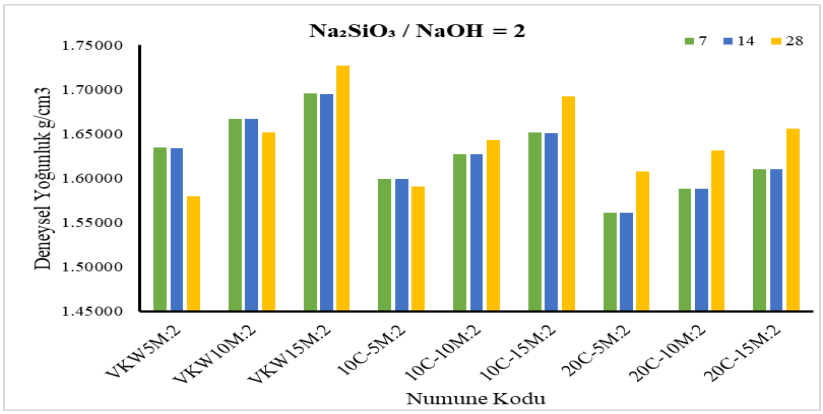
		7	14	28
1	VKW5M:1,5	1,56701	1,567	1,59168
2	VKW10M:1,5	1,68451	1,685	1,66203
3	VKW15M:1,5	1,72791	1,728	1,75909
4	10C-5M:1,5	1,54182	1,542	1,59742
5	10C-10M:1,5	1,62383	1,624	1,64737
6	10C-15M:1,5	1,67325	1,673	1,71972
7	20C-5M:1,5	1,51989	1,520	1,60274
8	20C-10M:1,5	1,57221	1,572	1,6352
9	20C-15M:1,5	1,61689	1,617	1,66459
10	VKW5M:2	1,63446	1,634	1,57948
11	VKW10M:2	1,66707	1,667	1,65117
12	VKW15M:2	1,69523	1,695	1,72682
13	10C-5M:2	1,59885	1,599	1,59046
14	10C-10M:2	1,62726	1,627	1,64262
15	10C-15M:2	1,65107	1,651	1,69223
16	20C-5M:2	1,5613	1,561	1,60764
17	20C-10M:2	1,58787	1,588	1,63123
18	20C-15M:2	1,60972	1,610	1,65557
19	VKW5M:2,5	1,67384	1,674	1,56511
20	VKW10M:2,5	1,67289	1,673	1,58633
21	VKW15M:2,5	1,61046	1,610	1,7073
22	10C-5M:2,5	1,63537	1,635	1,59184
23	10C-10M:2,5	1,63662	1,637	1,60969
24	10C-15M:2,5	1,60641	1,606	1,67658
25	20C-5M:2,5	1,60131	1,601	1,60575
26	20C-10M:2,5	1,60239	1,602	1,62903
27	20C-15M:2,5	1,60333	1,603	1,6425

Şekil 54'te Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 için deneysel yoğunluk grafiği görülmektedir. VKW10M:1,5 numunesi dışındaki tüm numunelerde 28 günlük deneysel yoğunluklar en yüksek yoğunluk değerine ulaşmıştır. Tüm numunelerde NaOH derişimindeki artışla beraber deneysel yoğunluklarda artış gözlemlenmiştir. Öte yandan mermer atığı ikamesi oranı arttıkça yoğunlukların düştüğü görülmektedir.



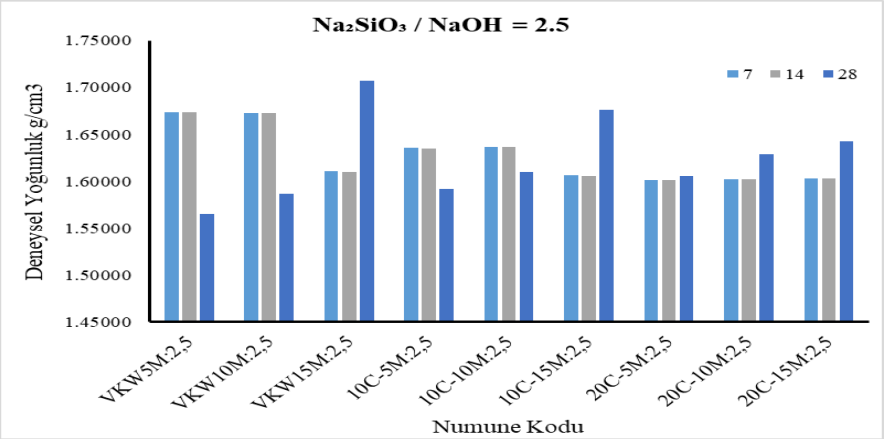
Şekil 54. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 deneysel yoğunluk grafiği

Şekil 55'te Na_2SiO_3 / NaOH = 2 için deneysel yoğunluk grafiği görülmektedir. Alkali aktivatör oranındaki artışla VKW5M:2 numunesine ilaveten 10C-5M:2 numunesinde de 28 günlük deneysel yoğunlukta düşüş tespit edilmiştir. Genel olarak alkali aktivatör oranındaki artışla numunelerin 28 günlük deneysel yoğunluklarında düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 55. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 deneysel yoğunluk grafiği

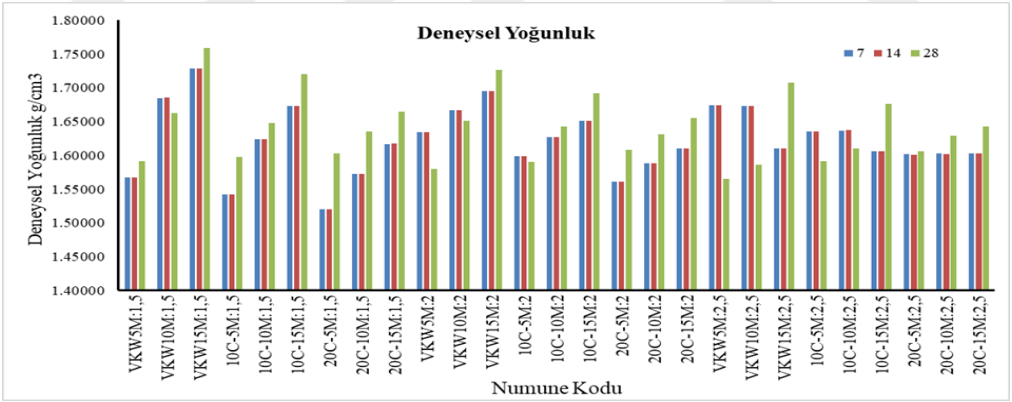
Şekil 56'da Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 için deneysel yoğunluk grafiği görülmektedir.



Şekil 56. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 deneysel yoğunluk grafiği

Alkali aktivatör oranı arttıkça bazı numunelerin 28 günlük deneysel yoğunluklarında belirgin düşüş yaşanmıştır. VKW serisinde 5-10 M NaOH derişimli numunelerin 28. gün yoğunluklarında düşüş yaşanırken mermer atığı ikamesi arttıkça 28 günlük deneysel yoğunluklarda yükselme tespit edilmiştir.

Şekil 57'de Tüm numunelerin deneysel yoğunluk verileri tek bir grafikte görülmektedir.



Şekil 57. Geopolimer harç numunelerinin deneysel yoğunluk grafiği

Deneysel yoğunluklar 1.52 – 1.76 g/cm³ arasında değişmektedir. Bu değerler geopolimer harçlar için beklenen aralıktadır. Kür süresi arttıkça numunelerin genelinde yoğunluk artışı gözlemlenmiştir. Bu durum geopolimerleşme reaksiyonlarının kür süresi uzadıkça ilerlediğini ve malzemenin daha kararlı bir hale geçtiğini göstermektedir. Na_2SiO_3/NaOH oranının (1.5 → 2 → 2.5) artmasıyla yoğunluk oranlarında artış gözlemlenmiştir. Ancak 2.5 oranında bazı numunelerde düşüş eğilimi görülmektedir. Ayrıca tüm numunelerde NaOH molaritesindeki artışla

birlikte yoğunluklarda artış gözlemlenmiştir. Koçyiğit (2024) çalışmasında artan NaOH molaritesi ile numune yoğunluklarında artış gözlemlendiğini belirtmiştir. Veriler bir bütün olarak değerlendirildiğinde 10C serisinin daha dengeli bir yoğunluk gelişimi sergilediği görülmektedir.

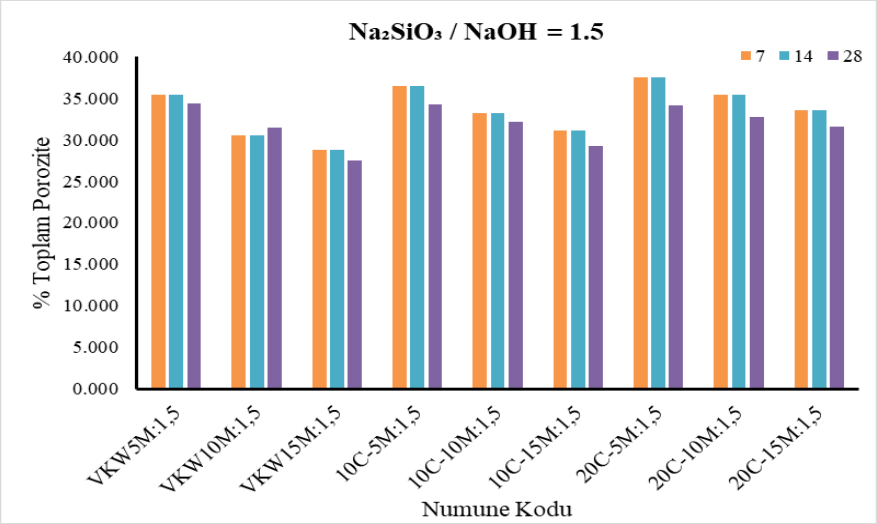
3.1.1.5. Porozite Deneyi

27 farklı geopolimer harç numunesi için porozite analizi yapılmıştır. Tablo 12'de 7,14 ve 28 günlük deney sonuçları görülmektedir.

Tablo 12. Porozite deneyi sonuçları

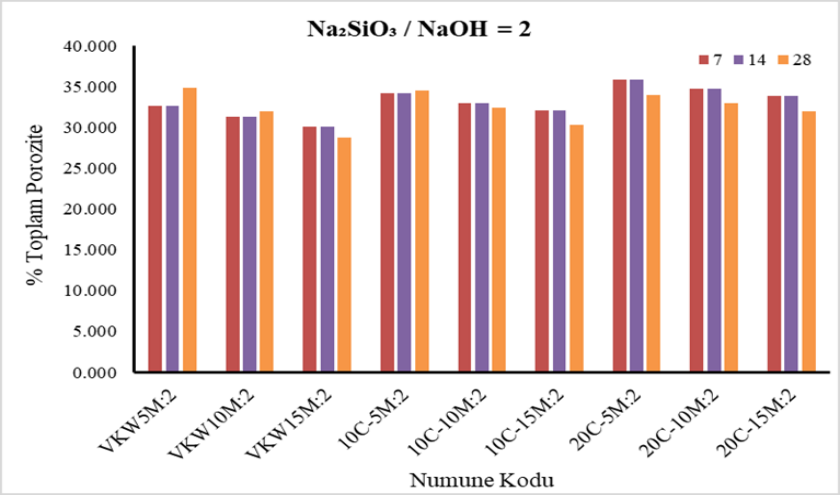
		7	14	28
1	VKW5M:1,5	35,3812	35,381	34,3638
2	VKW10M:1,5	30,5356	30,536	31,4627
3	VKW15M:1,5	28,7461	28,746	27,46
4	10C-5M:1,5	36,5243	36,524	34,2356
5	10C-10M:1,5	33,1484	33,148	32,179
6	10C-15M:1,5	31,1135	31,114	29,2007
7	20C-5M:1,5	37,5303	37,530	34,1248
8	20C-10M:1,5	35,3796	35,380	32,7908
9	20C-15M:1,5	33,5435	33,543	31,5828
10	VKW5M:2	32,5996	32,600	34,867
11	VKW10M:2	31,2548	31,255	31,9104
12	VKW15M:2	30,0936	30,094	28,7911
13	10C-5M:2	34,1767	34,177	34,5218
14	10C-10M:2	33,0069	33,007	32,3747
15	10C-15M:2	32,0268	32,027	30,3324
16	20C-5M:2	35,8283	35,828	33,9236
17	20C-10M:2	34,736	34,736	32,9539
18	20C-15M:2	33,8379	33,838	31,9534
19	VKW5M:2,5	30,9757	30,976	35,4596
20	VKW10M:2,5	31,0149	31,015	34,5844
21	VKW15M:2,5	33,5891	33,589	29,596
22	10C-5M:2,5	32,6731	32,673	34,4653
23	10C-10M:2,5	32,6218	32,622	33,7305
24	10C-15M:2,5	33,8654	33,865	30,9767
25	20C-5M:2,5	34,1838	34,184	34,0013
26	20C-10M:2,5	34,1394	34,139	33,0445
27	20C-15M:2,5	34,1009	34,101	32,4906

Şekil 58'de Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 alkali aktivatör oranı için yüzde toplam porozite değerleri görülmektedir. Porozite değerleri %27,46-37,5303 aralığında değişmektedir. Tüm serilerde NaOH molaritesi arttıkça porozitede azalma gözlemlenmiştir. Genellikle kür süresindeki artışla beraber yapısal boşluk oranının azaldığı görülmektedir.5M NaOH derişiminde mermer atığı ikamesi arttıkça boşluk oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak 10 M ve 15M NaOH ile hazırlanan karışımlarda kalsine mermer atığı ikamesi porozite oranının artmasına neden olmuştur.



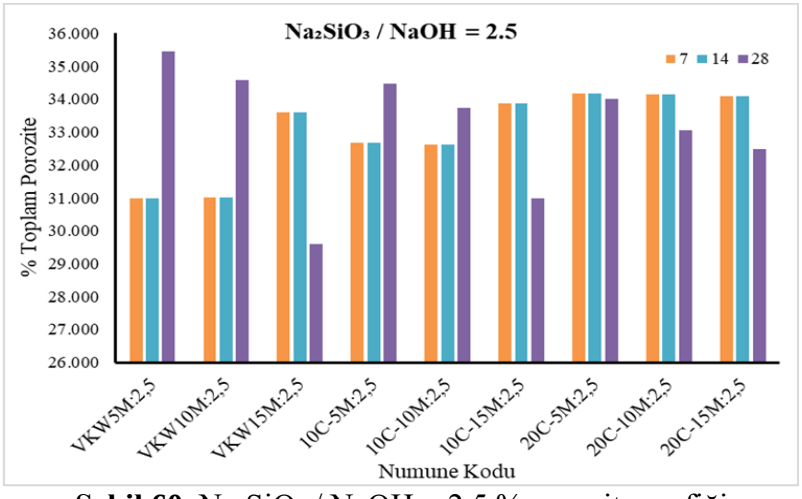
Şekil 58. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 % porozite grafiği

Şekil 59'da Na_2SiO_3 / NaOH = 2 alkali aktivatör oranı için yüzde toplam porozite değerleri görülmektedir. Grafik değerleri incelendiğinde porozite değerleri %28,7911-35,8283 arasında gözlemlenmiştir. Alkali aktivatör oranındaki artışın genel porozite oranını düşürdüğünü söylemek mümkündür. 28 günlük porozite değerlerinde 5M NaOH derişimli karışımlar için kalsine mermer atığı ikamesindeki artışın porozite oranını düşürdüğü söylenebilmektedir. Öte yandan 10M ve 15 M NaOH içeren harç numunelerde kalsine mermer atığı ikamesi porozite oranının artmasına sebep olmuştur. Her seri kendi içinde incelendiğinde molarite arttıkça porozitenin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 59. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 % porozite grafiği

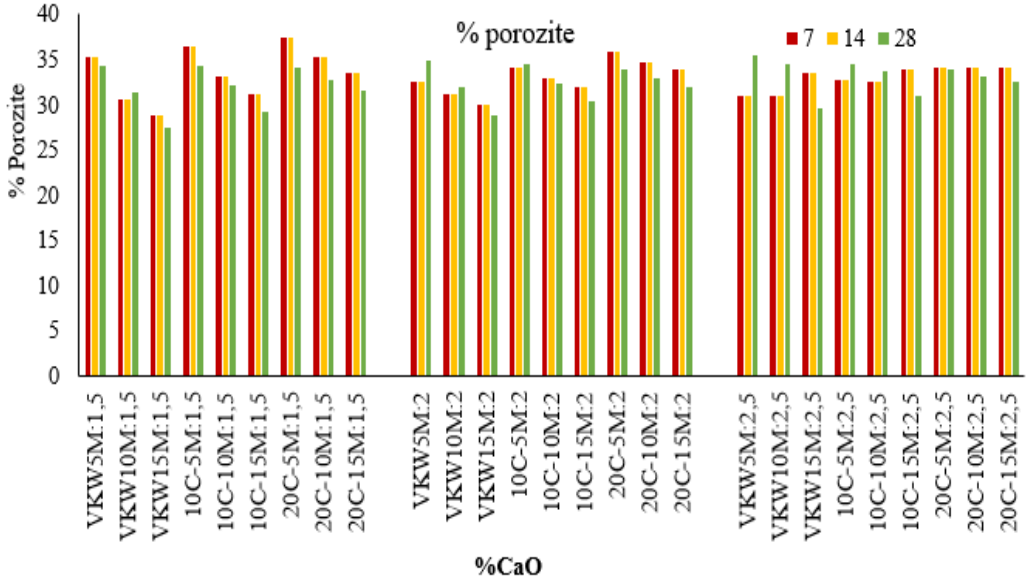
Şekil 60'ta Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 alkali aktivatör oranı için yüzde toplam porozite değerleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde porozite değerlerinin %29,60-35,46 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. En düşük porozite VKW15M:2.5 (28 gün; 29,60), en yüksek porozite ise VKW5M:2.5 (28gün ; 35,46) olarak tespit edilmiştir. VKW serisinde alkali aktivatör derişimindeki artışın poroziteyi azaltmada etkili rol oynadığı görülmektedir. 28 günlük porozite değerleri için her numunede molarite artışı poroziteyi azaltsada kalsine mermer atığı ikamesindeki artış porozite düşüş oranını azaltmıştır.



Şekil 60. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 % porozite grafiği

Şekil 61'de Na_2SiO_3/NaOH = 1.5, 2.0 ve 2.5 alkali aktivatör oranları için toplam porozite değerleri görülmektedir. Tüm veriler bir arada incelendiğinde alkali

aktivatör oranındaki artışın poroziteyi düşürdüğü görülmektedir. Her alkali aktivatör oranı için kendi arasında NaOH molaritesindeki artış poroziteyi azaltma eğilimi göstermiştir. Bu durum Na_2SiO_3/NaOH oranının yükselmesi ile yapıdaki silikat içeriğinin jel yapısına katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak NaOH derişimindeki artış porozitenin azalmasına neden olmuştur. Ancak bazı durumlarda yüksek molarite ile hazırlanan karışımlarda kalsine mermer atığı ikamesinin artışı poroziteyi artırmıştır. Örneğin, 1.5 ve 2 alkali aktivatör oranlarında 5M NaOH ile hazırlanan karışımlarda Ca ikamesindeki artış poroziteyi azaltırken, 10 M ve 15 M NaOH içeren harçlarda artış gözlemlenmiştir. Kalsine mermer atığı ikamesi özellikle yüksek molarite ve düşük kür sürelerinde poroziteyi artırıcı etki göstermektedir. Bu durum NaOH molaritesi ve alkali aktivatör oranındaki artışın CaO ikamesi olduğu durumlarda reaksiyonu hızlanırarak çökelmeye neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İlerleyen yaş dayanımlarında ise C-S-H bağlarındaki oluşum ile yoğunlukta artış porozite ve su emme değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. Hoy ve arkadaşları (2025) çalışmalarında kalsiyum ikamesinin yüksek NaOH molaritesi ve alkali aktivatör oranlarında reaksiyon sürecini hızlandırdığını ve C-S-H fazının oluşumunu desteklediğini ortaya koymuşlardır. Wang ve arkadaşları (2022) ise kalsiyum karbür atığı ikamesinin geopolimer harçlarda C-S-H oluşumunu destekleyerek mikroyapısal gözenekliliği düşürdüğünü belirtmiştir.



Şekil 61. Geopolimer harç numune % porozite grafiği

Çalışmada elde edilen bulgular, alkali aktivatör oranı, NaOH molaritesi ve kalsine mermer atığı ikamesi etkileşiminin geopolimer harçların fiziksel yapısını doğrudan etkilediğini göstermektedir. Fiziksel deney sonuçları VKW geopolimer harç numune serisinde düşük (5M) NaOH derişiminde daha heterojen bir yapı ortaya koymaktadır. 20C serisinde ise daha dengesiz bir sistem söz konusudur. Özellikle alkali aktivatör oranının 2.5 olduğu deney sonuçlarında porozite oranında ve su emme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Fiziksel bulgular 10C serisinin tüm seriler içerisinde daha dengeli deney sonuçları verdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak relatif yoğunluğun ve deneysel yoğunluğun azaldığı numunelerde su emme oranında ve porozitede artış gözlemlenmiştir. Fiziksel deney sonuçları birbirini desteklemektedir. Kalsine kalsit ikamesinin ise geopolimer harçların fiziksel özelliklerini yüksek NaOH molaritesi ve alkali aktivatör oranlarında iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu durum CaO ikamesinin yüksek alkaliniteli ortamda silika ile desteklendiğinde C-S-H bağ oluşumuna neden olması ile açıklanmaktadır. Öte yandan fiziksel özellikler incelendiğinde optimum CaO ikamesi 10C serisi olarak tespit edilmiştir.

Ju ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada kalsiyum oksitin cüruf kompozitlerinin üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre kalsiyum oksit ikamesinin yapının reaksiyon hızını artırarak C-S-H oluşumunu teşvik ettiği ve daha sıkı bir yapı oluşumuna nede olduğunu belirtmişlerdir.

Toprak ve arkadaşları (2022) çalışmalarında mermer atığı ikamesinin geopolimer harç numunelerin fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. %25 oranında mermer atığı ikamesinin harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirdiğini ancak bu oran aşıldığında harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilediğini tespit etmişlerdir.

3.1.2. Mekanik Deney Sonuçları

3.1.2.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları

27 farklı kimyasal bileşene sahip geopolimer harç numune üzerinde 7,14 ve 28. Yaş dayanımları için eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Her numuneden üçer tane

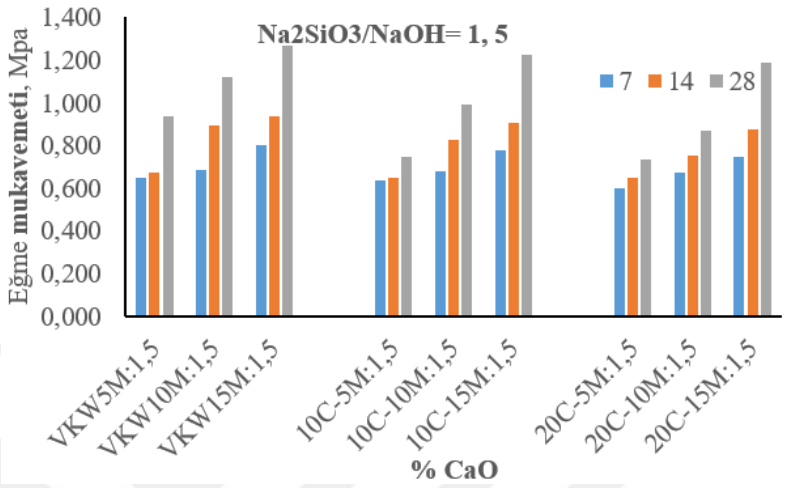
hazırlanarak sonuçların ortalaması alınmıştır. Tablo 13'te eğilme dayanımı deneyi ile elde edilen 81 adet eğilme dayanımı görülmektedir.

Tablo 13. Geopolimer harç numune eğilme dayanımı deney sonuçları

		7. gün dayanımı(MPa)	14. gün dayanımı(MPa)	28. gün dayanımı(MPa)
1	VKW5M:1,5	0,648	0,670	0,934
2	VKW10M:1,5	0,683	0,895	1,117
3	VKW15M:1,5	0,804	0,938	1,267
4	10C-5M:1,5	0,633	0,648	0,748
5	10C-10M:1,5	0,678	0,824	0,993
6	10C-15M:1,5	0,775	0,905	1,226
7	20C-5M:1,5	0,597	0,648	0,736
8	20C-10M:1,5	0,672	0,753	0,869
9	20C-15M:1,5	0,747	0,873	1,186
10	VKW5M:2	0,739	0,852	1,056
11	VKW10M:2	0,761	0,865	1,136
12	VKW15M:2	0,825	0,929	1,328
13	10C-5M:2	0,707	0,777	0,940
14	10C-10M:2	0,785	0,812	1,069
15	10C-15M:2	0,788	0,895	1,255
16	20C-5M:2	0,675	0,690	0,825
17	20C-10M:2	0,745	0,771	1,001
18	20C-15M:2	0,814	0,860	1,182
19	VKW5M:2,5	0,592	0,747	0,823
20	VKW10M:2,5	0,662	0,782	1,156
21	VKW15M:2,5	0,792	0,838	1,224
22	10C-5M:2,5	0,696	0,767	0,955
23	10C-10M:2,5	0,691	0,782	1,144
24	10C-15M:2,5	0,812	0,832	1,202
25	20C-5M:2,5	0,731	0,753	1,087
26	20C-10M:2,5	0,790	0,817	1,133
27	20C-15M:2,5	0,846	0,881	1,179

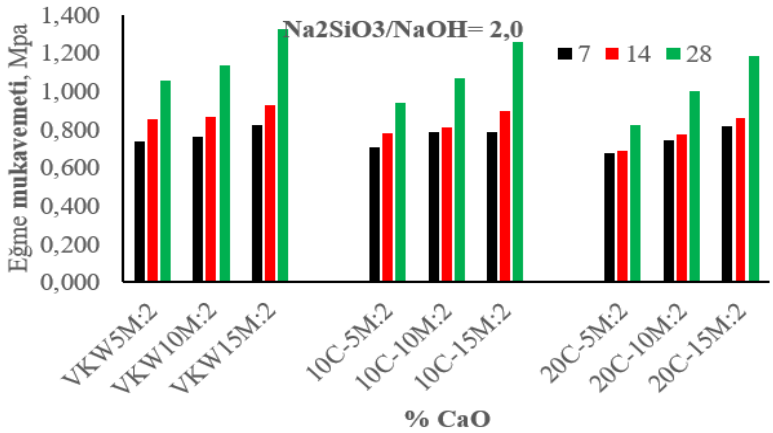
Şekil 62'de Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 alkali aktivatör oranı için eğilme dayanımı sonuçları görülmektedir. Kür süresindeki artışla beraber eğilme dayanımlarında belirgin bir şekilde artış gözlemlenmiştir. 28 günlük dayanımlarda en yüksek sonuç 1,267 MPa ile VKW15M:1.5 numunesinde elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı ise 20C-5M:1.5 numunesinde gözlemlenmiştir. Tüm numunelerde NaOH molarite artışı ile birlikte eğilme dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. Kalsine mermer atığı ikamesinin etkisini anlamak amacıyla aynı NaOH molar derişimi ve yaş

dayanımına sahip numuneler incelenmiştir. 28 günlük numunelerde tüm NaOH derişimlerinde mermer atığı ikamesindeki artış eğilme dayanımında azalmaya yol açmıştır.



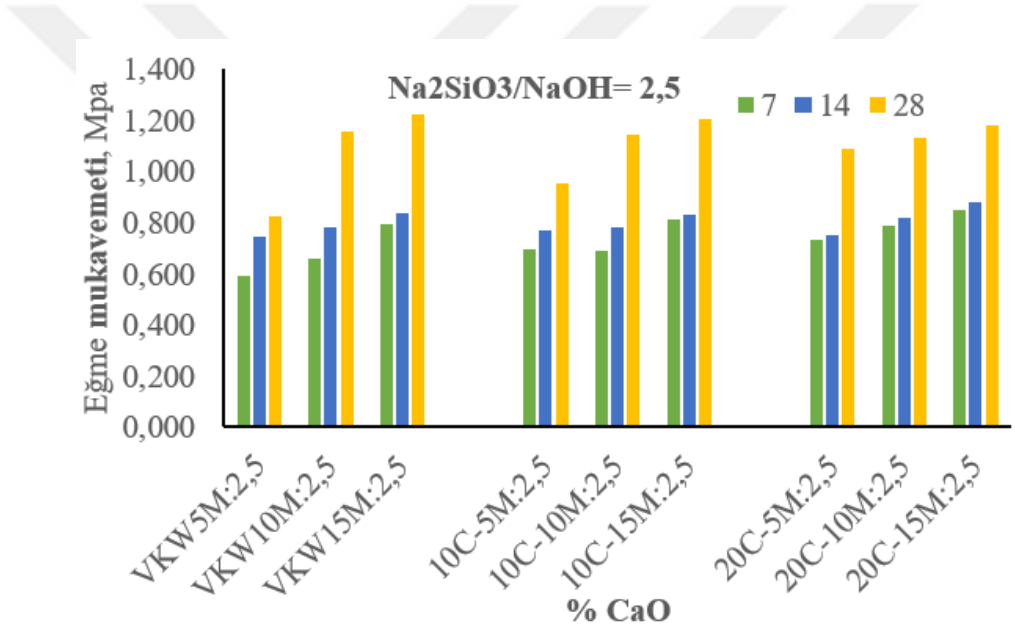
Şekil 62. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 Eğilme dayanımı grafiği

Şekil 63'te Na_2SiO_3 / NaOH = 2 alkali aktivatör oranı için eğilme dayanımı sonuçları görülmektedir. Kür süresindeki artışla beraber eğilme dayanımlarında belirgin bir şekilde artış gözlemlenmiştir. 28 günlük dayanımlarda en yüksek sonuç 1,328 MPa ile VKW15M:2 numunesinde elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı ise (0,825) 20C-5M:1.5 numunesinde gözlemlenmiştir. Tüm numunelerde NaOH molarite artışı ile birlikte eğilme dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. Molaritedeki artışa bağlı eğilme dayanımı artışı 10C ve 20C serilerinde daha belirgin gözlemlenmiştir.



Şekil 63. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 Eğilme dayanımı grafiği

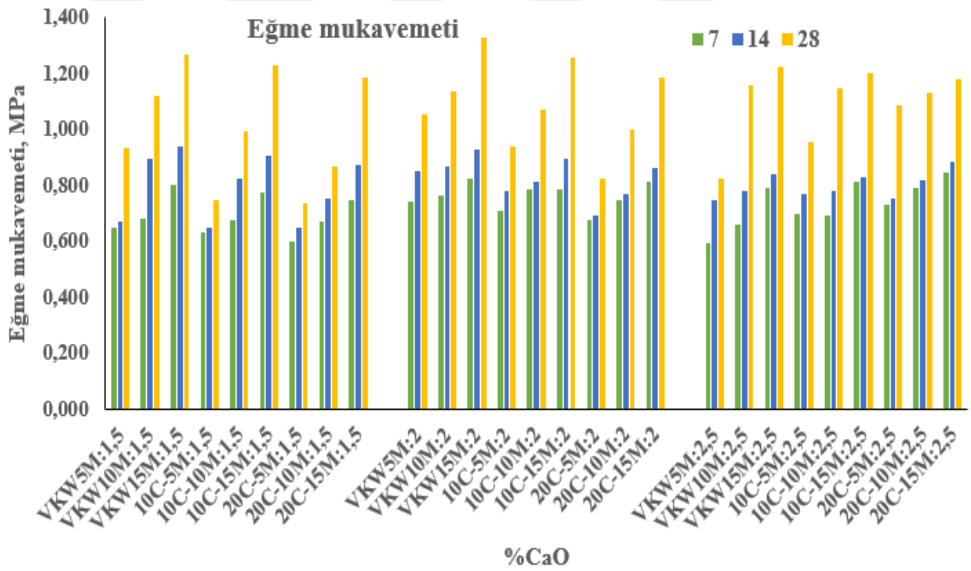
Şekil 64'te Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 alkali aktivatör oranı için eğilme dayanımı sonuçları görülmektedir. Grafik incelendiğinde en düşük eğilme dayanımı (0,823 MPa) VKW5M:2.5 numunesinde, en yüksek eğilme dayanımı ise (1,224 MPa) VKW15M:2.5 numunesinde tespit edilmiştir. VKW serisindeki geopolimer harçların eğilme dayanımı üzerinde NaOH molaritesi oldukça etkili olmuştur. 5M NaOH derişiminde hazırlanan geopolimer harçlarda VKW-5M:2.5 ; 0,823 MPa, 10C-5M:2.5; 0,955 MPa, 20C-5M:2.5; 1,087 MPa değerlerine ulaşmıştır. Düşük NaOH derişiminde kalsine mermer atığı ikamesi geopolimer harcın eğilme dayanımına katkı sağlamıştır. Aynı zamanda 10 M ve 15 M NaOH derişimlerinde kalsine mermer atığı ikamesi sınırlı azalmaya neden olsa da birbirine yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 64. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 Eğilme dayanımı grafiği

Şekil 65'te geopolimer harçların eğilme dayanımları grafiği verilmektedir. 1.5 alkali aktivatör oranında nispeten daha düşük eğilme dayanımları gözlemlenmiştir. Aktivatör oranındaki artışla dayanımın genelde arttığı görülmektedir. Ancak 2.5 alkali aktivatör oranında bazı numunelerde düşüş eğilimi görülmüştür. 28 günlük en yüksek eğilme dayanımı (1,328 MPa) VKW15M:2 numunesinde gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı verilerine göre optimum alkali aktivatör oranı 2 olarak belirlenmiştir. Molaritenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde tüm serilerde NaOH molaritesindeki artışın eğilme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Artan molarite ile OH- iyonlarının arttığı ; bu durumun çözünürlüğü artırarak güçlü bir geopolimer jel

oluşumuna yol açtığı düşünülmektedir. Genel olarak kalsine mermer atığı ikamesinin eğilme dayanımında düşüşe neden olduğu görülmektedir. Ancak yüksek molarite NaOH için alkali aktivatör oranı arttıkça düşüş oranında azalma gözlemlenmiştir. Öte yandan 10C-15M:2 numunesinde 28 günlük eğilme dayanımı 1.255 MPa olarak tespit edilmiştir. VKW15M:1.5 numunesinde ise eğilme dayanımı 1,267 MPa olarak görülmektedir. Bu durum mermer atığı ikamesinin mekanik dayanımdaki olumsuz etkisinin alkali aktivatör oranı ile tölere edilebileceğini göstermektedir. Aynı zamanda 5M NaOH derişimli 2.5 alkali aktivatör oranına sahip seride kalsine mermer atığı ikamesi eğilme dayanımda iyileşmeye neden olmuştur. Bulgular değerlendirildiğinde geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı üzerinde önem derecesine göre sırayla NaOH molaritesi, alkali aktivatör oranı ve kalsine mermer atığı ikamesinin etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 65. Geopolimer harç numuneleri eğilme dayanımı grafiği

3.1.2.2. Basınç Dayanımı Sonuçları

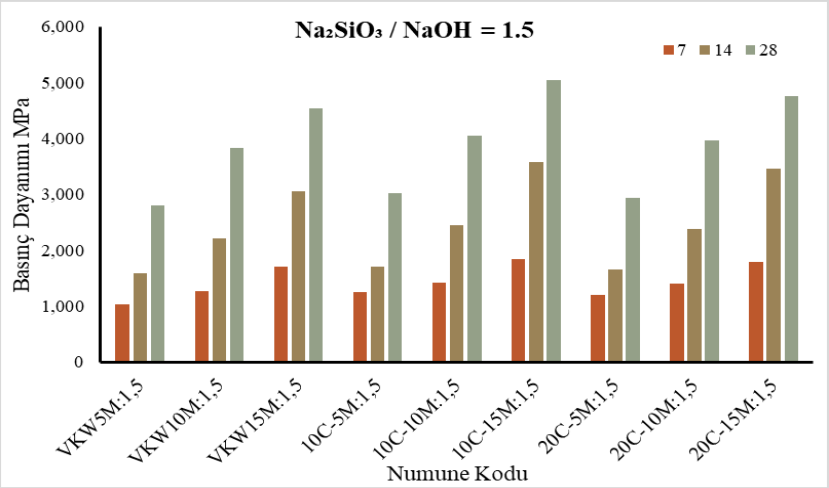
Tablo 14'te geopolimer harç numunelerin 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri verilmektedir.

Şekil 66'da Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 alkali aktivatör oranı için basınç dayanımı değerleri görülmektedir. Tüm numunelerde basınç dayanımı değerlerinin kür süresindeki artışla beraber arttığı görülmektedir. En yüksek basınç dayanımı 10C-15M:1.5 numunesinde 5.038 MPa olarak ölçülmüştür. Her seride molaritedeki artışla

beraber basınç dayanımında düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Kalsine mermer atığı ikamesi 10C olan seride basınç dayanımında iyileşmeye neden olurken ikame oranındaki artış basınç dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. NaOH 15 M serisinde 10C ve 20C numuneleri için 28 yaş dayanımlarında kalsine mermer atığı ikamesi %5.5 oranında basınç dayanımı düşüşüne neden olmuştur. Öte yandan 20C-15M:1.5 numunesi VKW-15M:1.5 numunesine kıyasla daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. 7 ve 14. günlerde elde edilen veriler 28. gün verileri ile benzer eğriler çizmektedir.

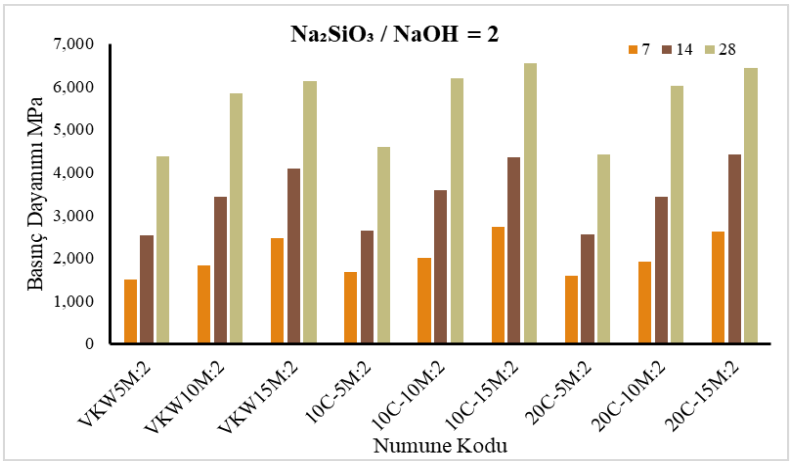
Tablo 14. Geopolimer harç numune basınç dayanımı değerleri

	7 gün	**14 gün**	**28 gün**
Çimento	1,479	3,700	4,352
VKW5M:1,5	1,031	1,590	2,810
VKW10M:1,5	1,262	2,216	3,827
VKW15M:1,5	1,700	3,056	4,540
10C-5M:1,5	1,250	1,700	3,025
10C-10M:1,5	1,427	2,450	4,050
10C-15M:1,5	1,836	3,582	5,038
20C-5M:1,5	1,205	1,662	2,938
20C-10M:1,5	1,399	2,387	3,959
20C-15M:1,5	1,794	3,461	4,759
VKW5M:2	1,500	2,522	4,363
VKW10M:2	1,835	3,430	5,847
VKW15M:2	2,450	4,092	6,134
10C-5M:2	1,662	2,635	4,596
10C-10M:2	1,996	3,582	6,188
10C-15M:2	2,715	4,343	6,539
20C-5M:2	1,583	2,544	4,422
20C-10M:2	1,902	3,427	6,008
20C-15M:2	2,609	4,409	6,426
VKW5M:2,5	1,903	3,111	5,853
VKW10M:2,5	2,358	3,649	6,295
VKW15M:2,5	3,076	4,716	7,115
10C-5M:2,5	1,994	1,994	6,050
10C-10M:2,5	2,458	3,958	6,504
10C-15M:2,5	3,173	5,060	7,426
20C-5M:2,5	1,903	1,956	5,827
20C-10M:2,5	2,405	3,817	6,196
20C-15M:2,5	3,036	4,795	6,886



Şekil 66. Na_2SiO_3 / NaOH = 1.5 basınç dayanımı değerleri

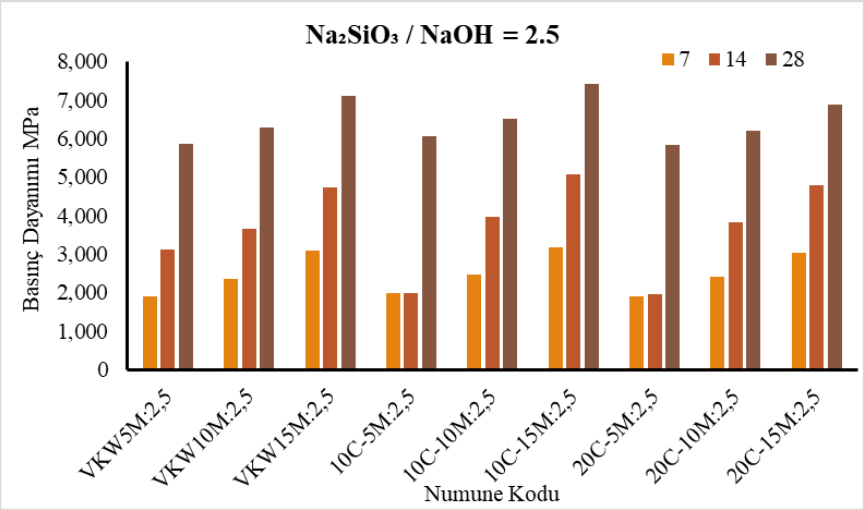
Şekil 67'de Na_2SiO_3 / NaOH = 2 alkali aktivatör oranı için basınç dayanımı değerleri görülmektedir. Genel olarak alkali aktivatör oranındaki artışın basınç dayanımı üzerinde pozitif bir etki yaptığı tespit edilmiştir. Kür gün süresi uzadıkça her numunede dayanım artışı gözlemlenmiştir. Aynı şeyi NaOH molaritesi içinde söylemek mümkündür. Kalsine mermer atığı ikamesi 20C serisinde basınç dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. Ancak alkali aktivatör oranı 2, NaOh 15M serisi için 28 günlük yaş dayanımlarında düşüş oranı %1.73'e düşmüştür.



Şekil 67. Na_2SiO_3 / NaOH = 2 basınç dayanımı değerleri

Şekil 68'de Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 alkali aktivatör oranı için basınç dayanımı değerleri görülmektedir. Kür süresi ve molaritedeki artış diğer alkali aktivatör oranlarında olduğu gibi basınç dayanımında artışa neden olmuştur. Genel olarak alakli aktivatör oranı artmasıyla basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. VKW serisi

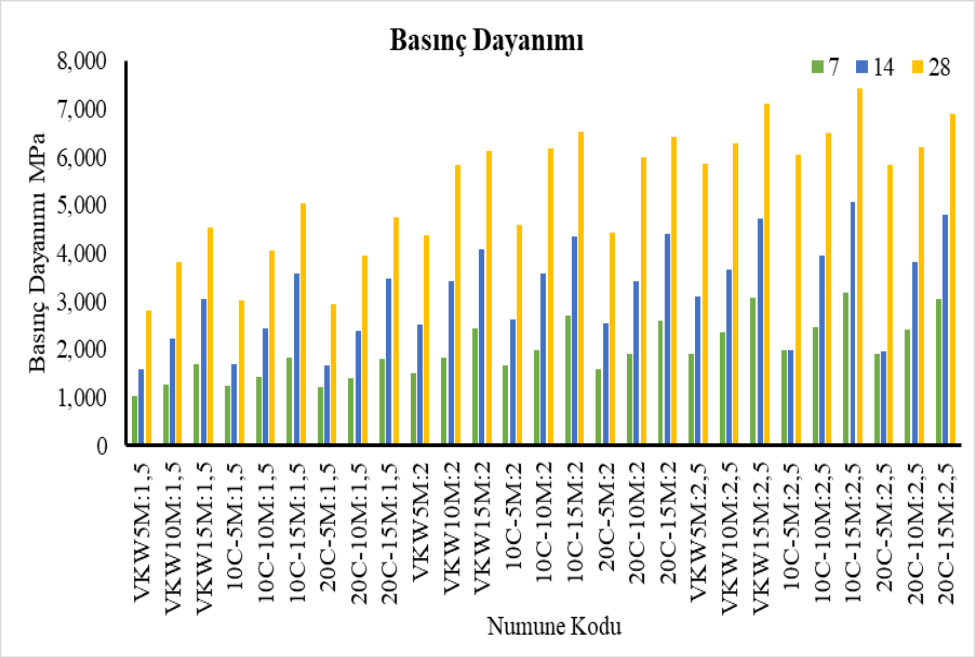
numunelerinde bu artış daha belirgin görülmektedir. VKW-15M:2.5 ve 10C-15M:2.5 numunelerinin erken yaş dayanımları iyi sonuçlar vermektedir. Kalsine mermer atığı ikamesi 10C serisinde basınç dayanımına katkı sağlarken 20C serisinde basınç dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir. Alkali aktivatör oranındaki artışla birlikte 10C ve 20C numuneleri için 28 günlük dayanımlarda %7.27 oranında bir düşüş yaşanmıştır.



Şekil 68. Na_2SiO_3 / NaOH = 2.5 basınç dayanımı değerleri

Şekil 69'da geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı grafiği verilmektedir. Tüm numunelerde kür süresindeki artışla birlikte basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Bu sağlıklı bir kür süresi geçirildiğini göstermektedir. NaOH molarite artışı tüm numunelerde basınç dayanımına olumlu katkı sağlamıştır. Kalsine mermer atığı ikamesinin geopolimer harç üzerindeki etkisi ikame oranı ve alkali aktivatör oranına göre değişmektedir. Genel olarak 10C serilerinde kalsine mermer atığı ikamesinin dayanımı iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ancak 20C serilerinde mermer atığı ikamesindeki artışın dayanımda düşüşe neden olduğu görülmektedir. Öte yandan kalsine mermer atığı ikamesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi alkali aktivatör oranına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Örneğin 28. Yaş dayanımları için alkali aktivatör oranı 1.5 olan numunelerde 20C-15M:1.5 numunesinin 10C-15M:1.5 numunesine kıyasla %5.5 oranında azaldığı görülmektedir. Alkali aktivatör oranı 2 olduğunda ise aynı kodlu numuneler için bu oran %1.75'e düşerken alkali aktivatör oranının 2.5 olduğu numunelerde düşüş oranı en yüksek

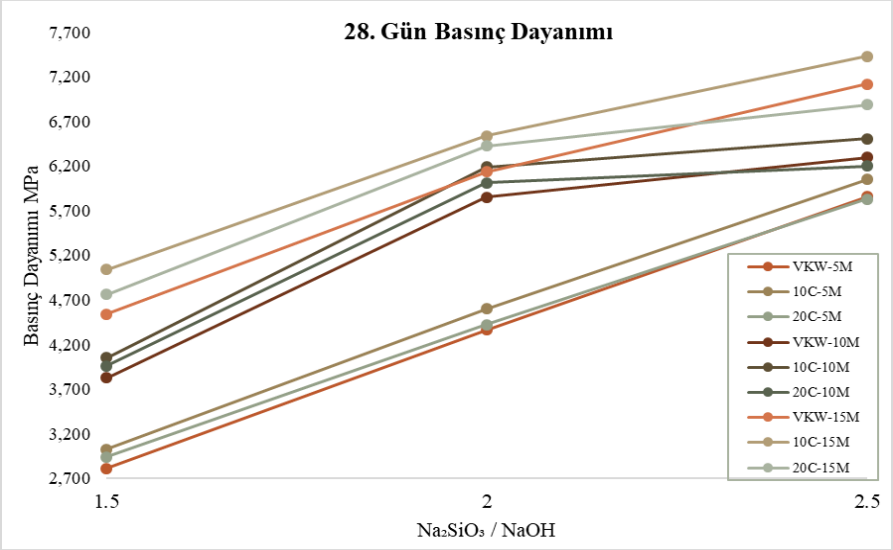
seviyeye ulaşarak %7.27 olarak tespit edilmiştir. Alkali aktivatör oranındaki artış genel olarak basınç dayanımlarının yükselmesine neden olmaktadır. Ancak aktivatör oranı 2.5 olduğunda kalsine mermer atığı ikamesinin basınç dayanımını diğer oranlara kıyasla şiddetli etkilediği görülmektedir. Öte yandan alkali aktivatör oranı 2 için optimum veriler elde edilerek düşüş oranı %1.73 ile sınırlı kalmıştır. Bu durum mermer atığı ikamesinin geopolimer üzerindeki olumsuz etkisinin alkali aktivatör oranı ile minimize edilebileceğini göstermektedir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarda en yüksek basınç dayanımı 10C-15M:2.5 numunesinin 28. Yaş dayanımında 7,426 MPa olarak elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise VKW-5M:15 numunesinin 28 günlük yaş dayanımında 2,810 MPa olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre geopolimer harç basınç dayanımı üzerinde en etkili değişken NaOH molaritesi olurken önem sırasına göre alkali aktivatör ve mermer atığı ikamesi değişkenleri etkili olmuştur.



Şekil 69. Geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri

Şekil 70'te Na_2SiO_3 / NaOH oranının 28. gün basınç dayanımları üzerindeki etkisi görülmektedir. Tüm serilerde alkali aktivatör oranı arttıkça artış gözlemlenmiştir. 5M NaOH serilerinde alkali aktivatör oranı ile doğrusal bir artış görülmektedir. 10M NaOH serilerinde ise 1.5-2 alkali aktivatör oranlarında yüksek eğimli doğrusal bir artış yaşanırken 2-2.5 alkali aktivatör oranlarında basınç dayanımı

eğiminde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. 15M NaOH serisinde ise VKW15 ve 10C numunelerinde 2-2.5 alkali aktivatör oranları arasında dayanım artışındaki düşüş daha azken 20C numunesinde alkali aktivatör oranının 2'den 2.5'a çıkması basınç dayanımını daha belirgin azaltmıştır.



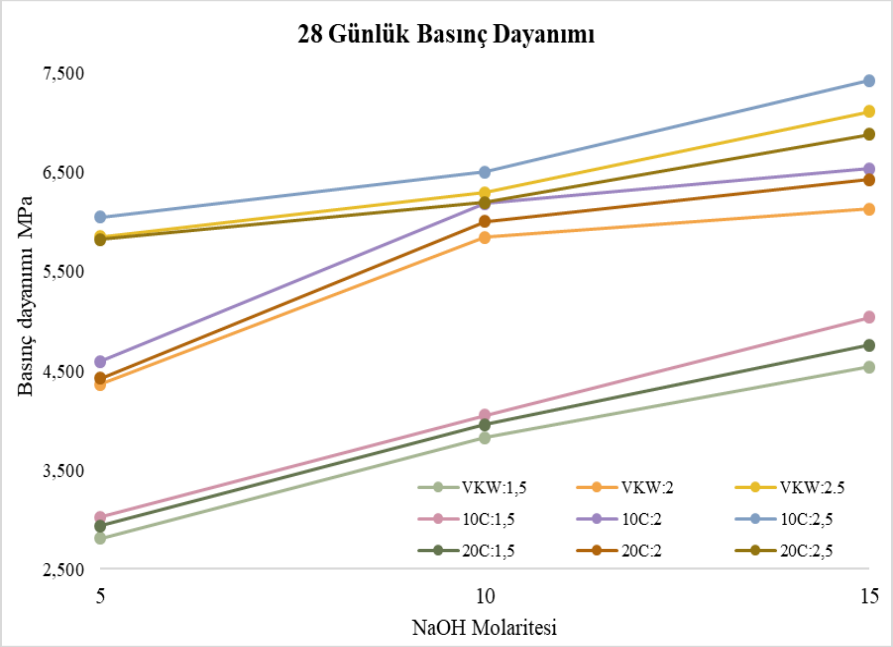
Şekil 70. Na_2SiO_3 / NaOH – Basınç Dayanımı grafiği

Şekil 71'de NaOH molaritesine göre basınç dayanımları görülmektedir. Tüm numunelerde NaOH molaritesinideki artışın basınç dayanımında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Alkali aktivatör oranlarına göre seriler değerlendirildiğinde 1.5 Na_2SiO_3 / NaOH oranında tüm serilerde neredeyse eğimin hiç değişmediği lineer bir artış gözlemlenmiştir. 2 Na_2SiO_3 / NaOH oranına baktığımızda 10 M ve 15M değerleri arasında 5M ve 10M değerlerine kıyasla azalan bir artış söz konuşur. 2.5 Na_2SiO_3 / NaOH oranında ise bu durumun tersine döndüğü görülmektedir. Dayanımlardaki artış 10M ve 15M arasında artan bir artışı göstermektedir.

En yüksek basınç dayanımı değerlerine 10C-15M:2.5 (7,426 MPa) , VKW-15M;2.5 (7,115 MPa) ve 20C-15M;2.5 (6,886 MPa) numunelerinde ulaşılmıştır.

Mekanik dayanım sonuçları incelendiğinde kalsine mermer atığı ikamesinin %10 oranına kadar basınç dayanımını olumlu etkilediği ancak % kalsine mermer atığı ikamesindeki artışın basınç dayanımını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca mermer atığı ikamesindeki artışla geopolimer harcın daha alkali bir ortama ihtiyaç duydu gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı grafiğinde ise mermer atığı ikamesindeki

artışla eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Aşağıda yapılan çalışmaya referans olarak literatürden örnekler sunulmaktdır:



Şekil 71. NaOH Molaritesi-Basınç Dayanımı grafiği

Koç (2025) çalışmasında Na_2SiO_3 / NaOH =2 oranına sahip metakaolin ve yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimer harçlara mermer atığı ikamesinin etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda mermer atığı ikamesindeki artışın daha alkali ortam ihtiyacına neden olduğunu belirtmiştir. Mermer atığı ikamesindeki artışl birlikte eğilme dayanımlarında düşüş gözlemlenmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre %20 mermer atığı katkısında 13,459 MPa, %40 için 9,051 MPa ve %60 için 7,315 MPa eğilme dayanımı elde etmişlerdir. Basınç dayanımında ise %20 mermer atığı ikamesinin %0,86 pozitif etkisi olurken % mermer atığı ikamesi arttıkça basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Barış (2023) çalışmasında atık mermer tozu ikamesinin geopolimer bağlayıcılar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre %25 oranında mermer atığı ikamesinin geopolimerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ancak % atık mermer tozu artışının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Barış'ın basınç dayanımı verileri için elde ettiği grafik eğrisi bulgularda sunulan basınç dayanımı grafiği ile benzer olup desteklemektedir. Toprak ve arkadaşları (2022) çalışmalarında mermer atığı

ikamesindeki artışın geopolimerlerin eğilme dayanımında azalmaya neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Çalışma kapsamın su /bağlayıcı oranı 0,50 alınmıştır. Elde edilen verilerin sağlıklı bir kıyasının yapılabilmesi açısından şahit numune su/bağlayıcı oranı aynı şekilde 0,50 alınmış ve şahit numune basınç dayanımı 4,352 MPa olarak tespit edilmiştir. Geopolimer harçlar arasında en yüksek basınç dayanımı ise 10C-15M:2.5 numunesine (7,426 MPa) aittir. Bu durum geopolimer harçlarda şahit numuneye oranla %70 daha iyi bir mekanik performansı göstermektedir. Süper akışkanlaştırıcı etkisinin değişken olarak alınmaması su/bağlayıcı oranının yüksek seçilmesine neden olmuştur. Bu durum elde edilen dayanım sonuçlarının genel olarak düşük çıkmasının nedenidir. Bu sebeple kıyas için şahit numune dökümü yapılmıştır. Çavdar ve Temizer (2023) su/bağlayıcı oranını 0,50 olarak sabit aldıkları çalışmalarında en yüksek basınç dayanımını 7,99 MPa , en yüksek eğilme dayanımını ise 0,89 MPa olarak bulmuşlardır.

3.1.3. Yapısal Analizlerin Değerlendirilmesi

3.1.3.1. FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi

Kimyasal reçetenin bağ yapılarına olan etkilerini incelemek amacıyla 5M derişim Na_2SiO_3/ NaOH= 1.5 katkısız vermikülit-kalsit-vollastonit geopolimeri (VKW5M:1,5) ile 15M Na_2SiO_3/ NaOH= 2.5 %20 mermer tozu ikameli vermikülit-kalsit-vollastonit geopolimerinin (20C-15M:2,5) FTIR spektrometreleri incelenmiştir. Analiz sonuçları ham data olarak alınarak normalize edilmiştir. Şekil 72'de görülen VKW-5M:1,5 numunesinin FT-IR spektrumunda görülen bulgular tartışmalı bir şekilde sunulmuştur:

937 cm^{-1}dalga sayısı: Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren pik titreşimleri

Bu pik geopolimer bileşenlerinin ne kadar homojen ve geniş bir bağ matrisi oluşturduğu hakkında bilgi vermektedir. Genellikle 1000-1100 cm^{-1}dalga sayısında görülen bu pik geopolimer yapısında Si-O-Al bağları yoğunlaştıkça daha düşük dalga sayılarında görülmektedir (Gao vd., 2024) . Şekil 72'de 937 cm^{1}dalga sayısında görülen bu pik sağlıklı bir geopolimerizasyon sürecinin en net göstergesidir.

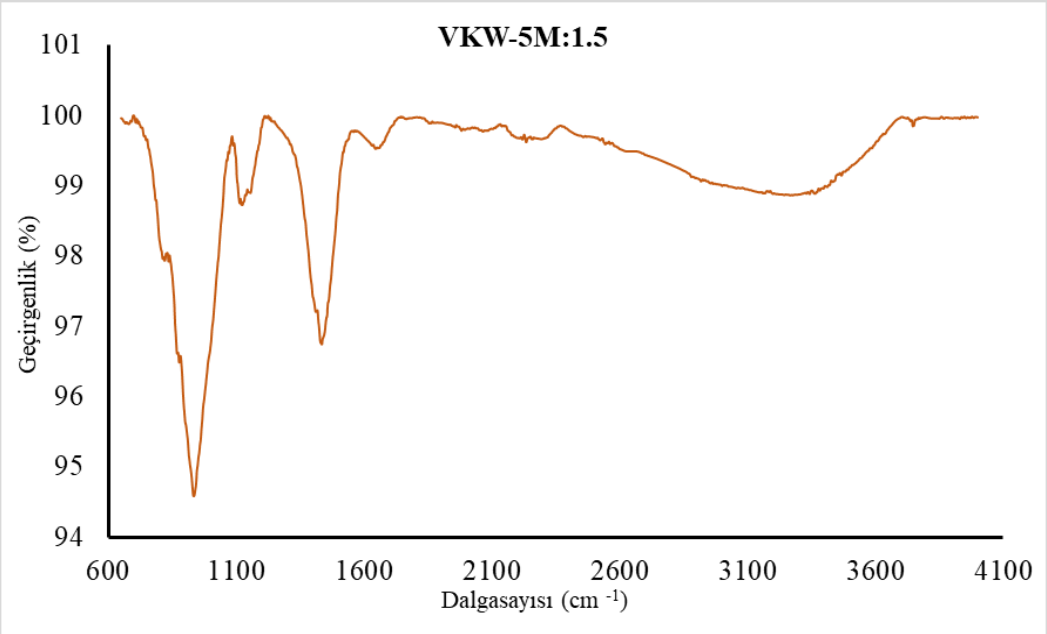
1126 cm^{-1}dalga sayısı: Si-O gerilme titreşimleri

Numunede 3 farklı taban malzeme kullanıldığı göz önüne alınırsa; hammadde ve malzeme içeriği çeşitliliği nedeniyle, Si-O-Al bandına ek olarak, 1000 cm^{-1} dalga sayısına yakın 1126 cm^{-1} dalga sayısında Si-O gerilme titreşimleri beklendiği gibi tespit edilmiştir (Zhong vd.,2019).

1433 cm^{-1}dalga sayısı: Karbon bağlarını gösteren pik.

Karbon bandındaki pikin ilk bakışta yapı içerisindeki karbon ikamesinden dolayı olduğu düşünülsede malzemelerin karışıma katılmadan önce kalsine edildiği göz önüne alınmalıdır. Kalsinasyon işlemi 1050 °C sıcaklıkta gerçekleştiği için bileşik halde bulunan karbon malzeme yapısından ayrılmıştır. Bu yüzden karbon bağlarını gösteren pik şiddetinin iki nedenden dolayı olmuş olabileceği düşünülmektedir:

Kalsiyum içeren bileşenler (kalsit, vollastonit) su ile reaksiyona girip $Ca(OH)_2$ oluşturmaktadır. Bu bileşik atmosferik CO_2 ile reaksiyona girerek $CaCO_3$ meydana getirmektedir (Lv vd., 2023; Monica ve Mejia , 2015). Ayrıca alkaliler ile aktivasyon sırasında serbest kalan Na^+ iyonları, atmosferik CO_2 ile reaksiyona girerek Na_2CO_3 fazını oluşturmaktadır. Bandın özellikleri göz önüne alındığında karbonatlaşan fazın Na_2CO_3 ağırlıklı olduğu ve $CaCO_3$'ün ikincil düzeyde bulunduğu düşünülmektedir (Pouhet ve Cyr, 2016). Karbon fazları gözenekli yapıyı kısmen doldurarak geçirimliliği azaltabilmektedir. Ancak karbonatlaşmanın geopolimerizasyon sürecini etkileyerek mekanik performansı düşürebileceği göz ardı edilmemelidir.



Şekil 72. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Örneği FT-IR Spektrumu

3200- 3700 cm⁻¹ dalga sayıları : Güçlü ve geniş O-H bandı

Hidroksil adsorbe su varlığını işaret etmektedir . Bu bant harç içerisindeki serbest veya zayıf bağlı su molekülleri ile geopolimer jel hidrosil gruplarını ifade etmektedir. Bant derinliği geopolimerizasyon sürecinin tam tamamlanmadığını yani kürlemenin tam olarak tamamlanmadığını göstermektedir (Liu vd. , 2016). 1646 cm-1 dalga boyunda ise alüminosilikat yapılar için tipik olan H-O-H titreşimleri görülmektedir (Tchadjié vd. , 2016; Djobo vd. , 2016).

Şekil 73'te görülen 20C-15M:2,5 geopolimer harç numunenin FT-IR spektrumunda görülen bulgular tartışmalı bir şekilde aşağıda sunulmaktadır:

956 cm⁻¹dalga sayısı: Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren pik titreşimlerinin oluştuğu görülmektedir. Bandın belirginliği, geopolimerleşme ve C–A–S–H jelleşmesinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini, matrisin yüksek bağ yoğunluğuna sahip olduğunu ve kimyasal olarak bağlı silika/alümina ağının oluştuğunu doğrulamaktadır. Pik dalga sayısındaki kayma Ca/Si oranındaki artış ile ilişkilendirilmektedir (Yusuf, 2023)

1433 cm⁻¹dalga sayısı: Karbon bağlarının varlığı görülmektedir.

Numune karışımlarında kullanılan malzemelerin hepsi kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Kimyasal içeriğinde karbon bulunmamasına rağmen spektrumda karbon bandı oluşumu görülmesi kalsiyum hidroksitin atmosferik karbondioksit ile teması sonucu kalsiyum karbonat oluşturması ile açıklanmaktadır (El-Didamony vd. , 2012) Mermer atığı katkısı nedeniyle bu bölgede geniş ve heterojen bir profil görülmektedir (Finocchiaro vd. , 2020).

2178 cm⁻¹dalga sayısı: Karbon bileşikleri nedeniyle ortaya çıkan keskin dalgalanma

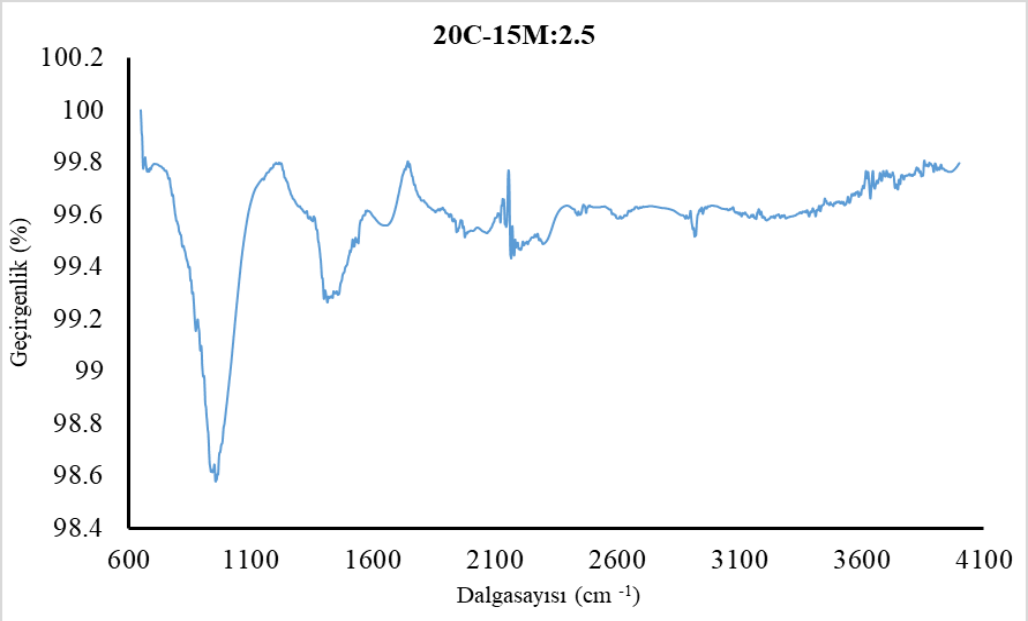
Şekil 73'te görülen bu bant beklenmeyen bir oluşumdur. Oluştuğu dalga boyu üçlü bağ titreşimlerine karşılık gelmektedir. Ancak deneysel süreçte kullanılan mermer atığı kalsine edildiği için içeriğinde organik bileşen bulunmamaktadır. Bu nedenle söz konusu titreşimin kalsinasyon sonrası oluşan inorganik karbon türlerinden veya atmosferik etkileşimden kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Yu vd. , 2004; Yusuf vd. , 2014). 2178 cm^{-1} civarındaki titreşim, geopolimerleşme sırasında kalsiyumun ve ortam CO_2'nin matrisle etkileşime girdiğini doğrulamaktadır. Bu etkileşim, C–A–S–

H ve N–A–S–H jellerinin oluşumu ile birlikte kısmi karbonatlaşma veya karbonat–hidroksil komplekslerinin varlığını düşündürmektedir.

3000-3600 cm⁻¹dalga sayısı: O-H bandı

Geopolimer bir yapının FT-IR spektrumunda görülmesi beklenen O-H bandı oluşmuştur. Ancak görülen O-H gerilme titreşim bandı genellikle geniş ve düzgün bir tepe şeklinde oluşmaktadır (Finocchiaro vd. , 2020). Bu örnekte gözlemlenen O-H bandı ise oldukça heterojen bir dağılıma sahiptir. Bu durum farklı O-H grupları veya yapısal düzensizliği düşündürmektedir. Sistemdeki O-H gruplarının mermer atığı ikamesi ve yüksek derişimli alkali aktivatör nedeniyle farklı bağ oluşumları ve serbest O-H grupları içerdiği düşünülmektedir (Alehyen vd., 2017).

1647 cm⁻¹dalga sayısı: H-O-H bandı bükülmesi net bir şekilde fark edilmektedir. Şekil….'da gözlemlenen bu kavisli yapı sistemde serbest suyun varlığını göstermektedir (Yu vd. , 2004). Bu durum O-H bandı için yapılan yorumu desteklemektedir.



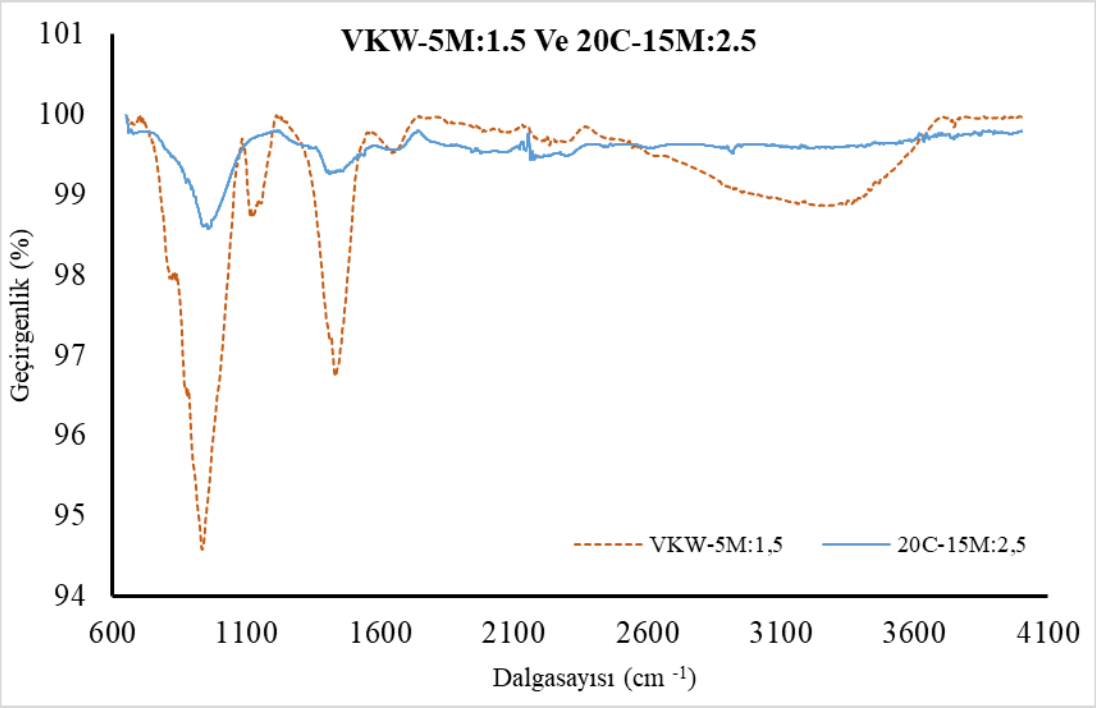
Şekil 73. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Örneği FT-IR Spektrumu

Şekil 74'te 20C-15M:2.5 ve VKW-5M:1.5 geopolimer harç örneklerinin FT-IR spektrumları birlikte görülmektedir. İki spektrumu kıyaslayacak olursak genel bir ifadeyle VKW-5M:1.5 numunesinde Al-O ve Si-O bağlarının 20C-15M:2.5 numunesine göre daha uzun ve homojen bir zincir oluşturduğu görülmektedir. Bu

durum VKW-5M:1.5 geopolimer harç örneğinin daha iyi bir geopolimerizasyon süreci geçirdiğini göstermektedir (Chen vd. , 2004).

Numunelerdeki karbon grubuna ait FT-IR bandına bakacak olursak (1450 cm^{-1}dalga sayısı civarı) her iki numunede de karbon grubuna ait karakteristik bantlar tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sırasında tüm malzemeler karışım öncesi kalsinasyon işlemine tabi tutulmuştur. Ancak sistem içerisindeki kalsiyum miktarındaki artışın CO_2 ile atmosferik temas sonucu $CaCO_3$ oluşturarak yüzeyde kalsiyum karbonat oluşumuna sebep olduğu düşünülmektedir(Isokoski vd. , 2013). Bu durum kısa vadede mikro boşlukları doldurarak bir miktar dayanım artışı sağlasada uzun dönemde jel yapısının bozulması sonucu uzun dönem dayanım kaybı riski taşımaktadır(Li vd. , 2025). Öte yandan VKW-5M:1.5 numunesinde bu bant daha belirgin ortaya çıkarken 20C-15M:2.5 numunesinde daha sığ gözlemlenmiştir. Bu duruma mermer katkısı olan 20C-15M:2.5 geopolimer harcın yapısındaki kalsiyum artışının farklı türde kristal yapıların oluşumuna sebep olarak, daha heterojen bir yapı oluşturmasının neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca 20C-15M:2.5 numunesinin FT-IR spektumunda 2178 cm^{-1} dalga sayısında görülen belirgin pik farklı türde karbonat komplekslerini ifade etmektedir. Bu durum mermer atığı ikamesine rağmen karbon bandının VKW-5M:1.5 numunesine göre daha düşük çıkmasını açıklamaktadır. Ca/Si oranındaki artışın geopolimer yapısındaki kristalliği artırarak daha kısa zincir uzunluğuna neden olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur (Lecomte vd. , 2006; Chen vd. , 2004; García-Lodeiro vd. , 2007). 20C-15M:2.5 geopolimer harcın FT-IR analizindeki düzensiz dar ve keskin pikler kristalliğin yüksek ve heterojen olduğunu göstermektedir (Yu vd. , 2004). Yani kalsiyum yalnızca $CaCO_3$ oluşumuna sebep olmamış; $CaCO_3$ beraberinde farklı kristal yapıların oluşumuna da neden olarak yüksek kristallikte bir yapıya neden olmuştur. Mevcut XRD bulguları bu durumu doğrulamaktadır.

Ayrıca iki numunenin alkali aktivatör derişim oranlarındaki farkın göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Literatürde karışımdaki alkali oranı ile geopolimerizasyon arasında bir ilişki ortaya koyan çalışma mevcuttur. 20 C- 15M:2.5 geopolimer harç numunesi 15 M NaOH derişimli, VKW-5M:1.5 geopolimer harç numunesi 5M derişimli bir karışımdan meydana gelmektedir. Kristallik düzeyi farkının yanında alkali derişim farkı da göz ardı edilmemelidir.



Şekil 74. 20C-15M:2.5 Ve VKW-5M:1.5 Geopolimer harç örnekleri FT-IR spektrumu

3.1.3.2. XRD Analizlerinin Değerlendirilmesi

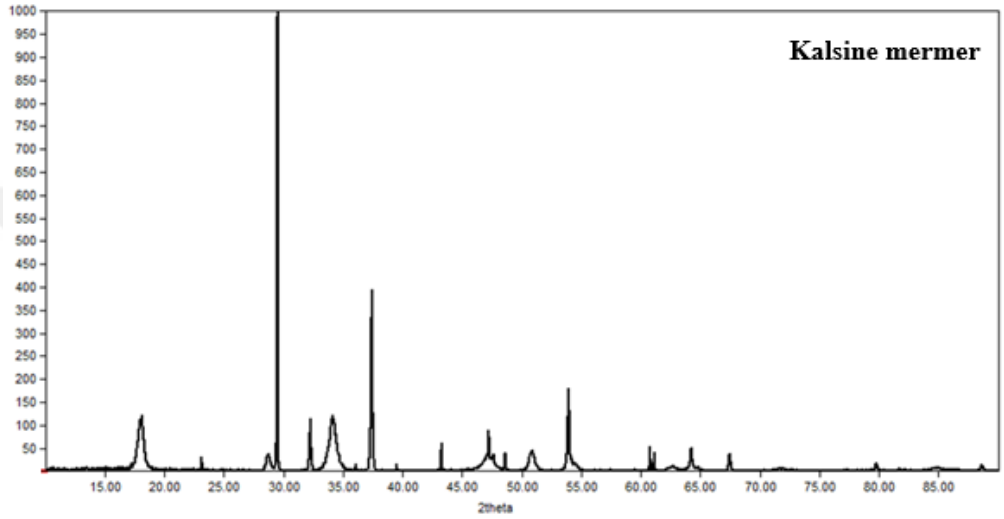
Çalışma kapsamında malzemelerin ve geopolimer harçların karakterizasyonunu sağlamak amacıyla karışımlarda kullanılan; mermer atığı, kalsit, vollastonit, vermikülit ve VKW-5M:1.5, 20C-15M:2.5 geopolimer harç malzemeler için toz numune XRD analizi yapılmıştır. Analizler Cu-K-beta dalga boyunda 10°-90° 2θ° açı aralığında toz numuneler üzerinde yapılmıştır.

3.1.3.2.1. Mermer Atığı

Mermer kalsiyum karbonat bileşenli metamorfik bir kayaçtır. Kalsinasyon işlemi ile $CaCO_3$ ayrışması gerçekleşerek kalsiyum oksit (CaO) ve karbondioksit (CO_2) oluşmaktadır. 1050 °C'de bir saat süreyle kalsine edilmiş mermer atığı numunesinin X-ışını kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirilmiş ve faz dönüşümleri değerlendirilmiştir.

Şekil 75'te katkı malzemesi olarak kullanılan mermer atığının XRD grafiği görülmektedir. XRD grafiği incelendiğinde 32.28°, 37.42°, 53.96° ve 67.48° civarındaki baskın pikler CaO'nun karakteristik oluşumunu ifade etmektedir (JCPDS/ICDD ~00-037-1497). Bu kalsinasyon sonrası oluşan ana fazın CaO

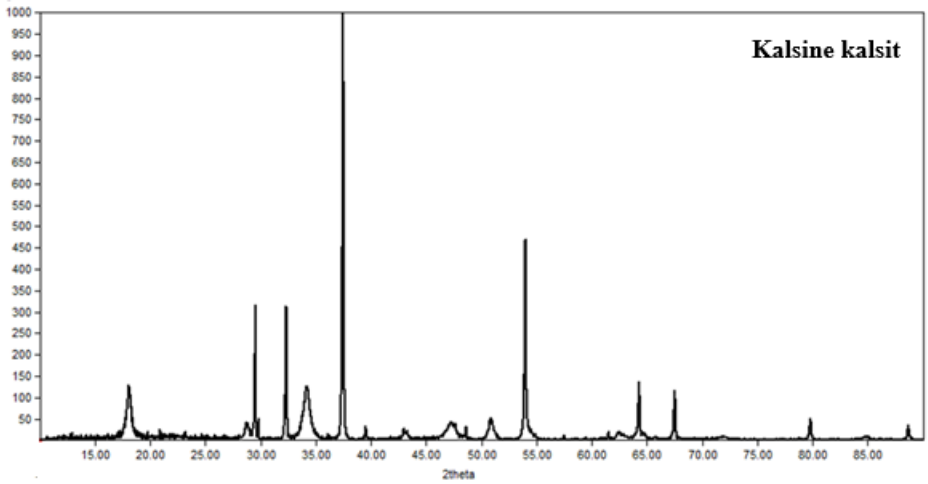
olduğunu göstermektedir. Öte yandan 29.51° civarında gözlemlenen pik kalsit oluşumuna karşılık gelmektedir (ICDD PDF Card 05-0586). Bu durum numunenin içeriğinde ayrışmamış kalsit ($CaCO_3$) kalıntısı olduğunu veya kalsinasyon işlemi sonrası yeniden karbonatlaşmanın gerçekleşmiş olabileceğini göstermektedir (Nawar vd., 2019). Bulgular mermer tozunun 1050 °C'de CaO'ya dönüştüğünü kanıtlamaktadır.



Şekil 75. Mermer atığı XRD grafiği

3.1.3.2.2. Kalsit

1050 °C'de 1 saat süreyle kalsine edilmiş kalsit ($CaCO_3$) numunesinin X-Işını Kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 76'da bağlayıcı malzeme olarak kullanılan kalsitin XRD grafiği görülmektedir. XRD grafiği incelendiğinde 2θ = 29.56°, 37.49°, 53.98°, 64.29° ve 67.51° civarındaki yüksek yoğunluklu pikler gözlemlenmektedir. Bu pikler CaO fazının karakteristik tepe noktalarıdır (ICDD PDF# 37-1497). Kalsit fazına ait karakteristik piklerin (2θ ≈ 29.4° ve 39.4°) düşük gözlemlenmesi ve en yoğun pikin 37.49° 2θ açısında gözlemlenmesi kalsit yapısının bozularak CaO'ya dönüştüğünü göstermektedir (Trezza ve Scian, 2000). Bulgulara göre 1050 °C'de kalsitin kalsinasyonu çok büyük oranda gerçekleşerek yüksek kristallikte bir yapı elde edilmiştir.

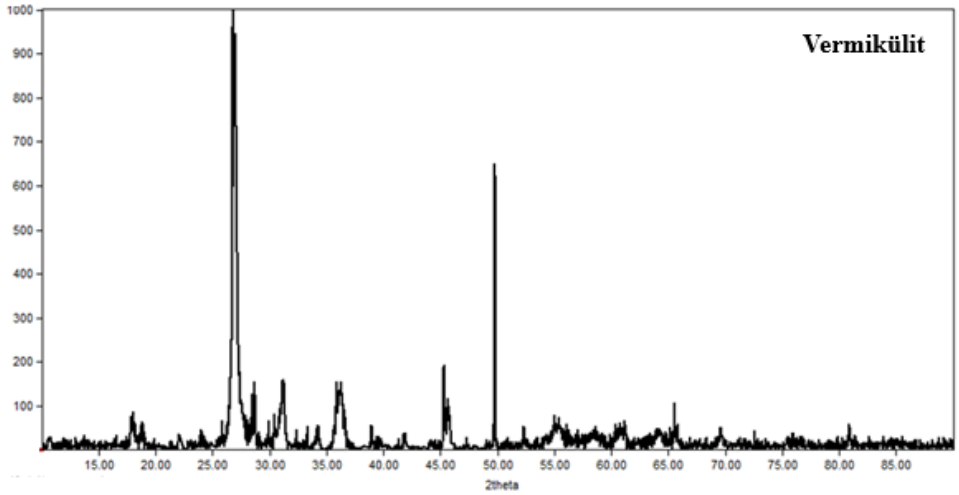


Şekil 76. Kalsit XRD grafiği

3.1.3.2.3. Vermikülit

Vermikülit, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük ısıl iletkenliği nedeniyle seramik ve refrakter uygulamalarında sık kullanılan bir mineraldir(Önen ve Boyraz, 2024). Çok katmanlı alüminyum silikat yapısı geopolimer yapısında kullanımına uygun olmasını sağlar. Düşük özgül ağırlığı ve genleşme özelliği ile vermikülit kalsinasyon işlemine tabi tutulduğunda daha stabil bir kristal yapısına sahip olur(Basu, 1991). 1050 °C'de bir saat kalsine edilen vermikülitin yapısındaki su uzaklaşır, katmanlı yapısı bozularak daha amorf bir karakter kazanır (Lahchich vd., 2024). Kalsinasyon işlemi sırasında malzemede genleşme ve çökme beklenir (Petersen, 2023; Önen vd., 2022).

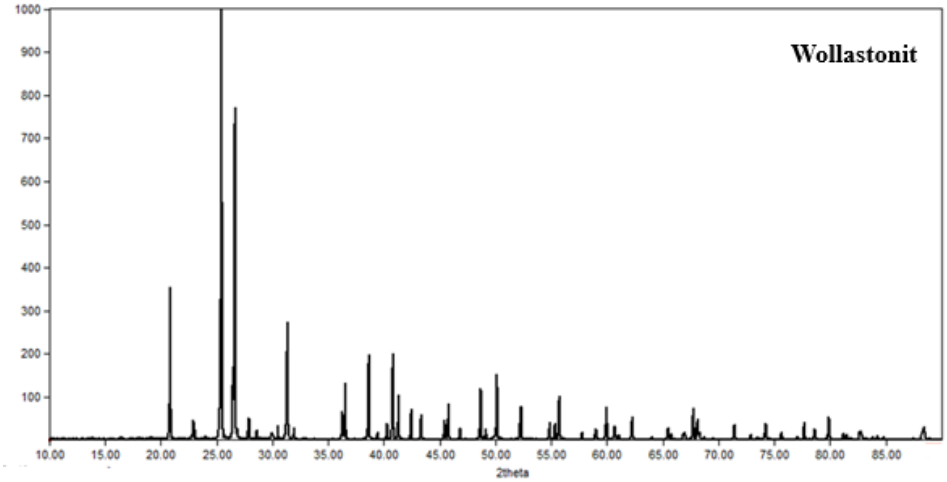
Şekil 77'de bağlayıcı malzeme olarak kullanılan kalsine vermikülitin XRD grafiği görülmektedir. Kalsine edilmiş vermikülitin XRD analiz grafiği incelendiğinde 26-31 2θ aralığında yoğun piklerin gözlemlenmesi vermikülitin temel kristal düzlemlerine denk gelmektedir (ICDD PDF Card 41-1428). 45.31°, 49.79° ve 50.89° 2θ pikleri ise kalsinasyon kaynaklı oluşan SiO_2 ve Al_2O_3 fazlarını göstermektedir. Bulgular vermikülitin kalsinasyon işleminin başarılı gerçekleştiğini katmanlı ve hidroksilli yapının büyük ölçüde parçalandığını ve serbest silikat, alüminosilikat benzeri fazların kristalleştiğini göstermektedir (Önen ve Boyraz, 2024; Lahchich vd., 2024).



Şekil 77. Vermikülit XRD grafiği

3.1.3.2.4. Vollastonit

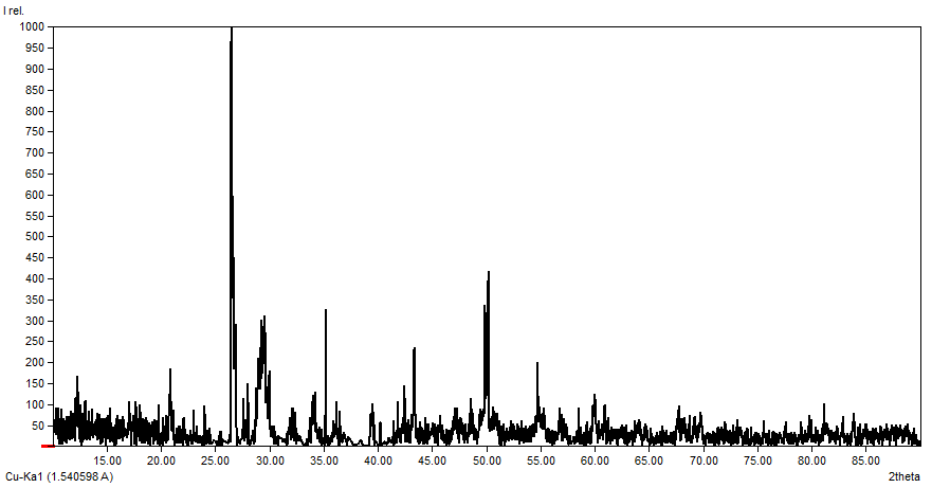
Şekil 78'de bağlayıcı malzeme olarak kullanılan vollastonitin XRD grafiği görülmektedir. Kalsine edilmiş vollastonitin XRD analiz grafiği incelendiğinde en yoğun pik 2θ 25.485° açısında gözlemlenmiştir. Bu faz vollastonitin dominant kristal düzlemini ifade etmektedir(Shamsudin vd., 2017). Aynı zamanda 20.899° , 26.678° ve 31.402° civarındaki diğer belirgin pikler kalsine vollastonit yapısındaki tek fazlı β-wollastonit varlığını göstermektedir(ICDD PDF# 43-1460). Bulgular 1050 °C'de kalsine edilmiş wollastonitin daha yüksek kristal düzenine ve termal olarak kararlı β-$CaSiO_3$ fazına sahip olduğunu göstermektedir(Wu vd., 2013).



Şekil 78. Vollastonit XRD grafiği

3.1.3.2.5. VKW-5M:1.5

Şekil 79 ‘da VKW-5M:1.5 geopolimer harcın XRD grafiği görülmektedir. VKW-5M:1.5 geopolimer harç XRD grafiği incelendiğinde 20-40° 2θ aralığında gözlemlenen geniş pikler, N-A-S-H ve C-(A)-S-H bağ oluşumlarının gerçekleştiğini göstermektedir (Kim vd., 2022; PDF# 33-0306). Bu geopolimerizasyon sonucu oluşan amorf yapıyı ifade etmektedir. Ayrıca 29° açısı civarı geniş tepe piki ile çakışan sivri pikin $CaCO_3$ kaynaklı olduğu düşünülmektedir (PDF# 47-1743; Hemra vd., 2021). Bu durum kalsinasyon işlemi sonrası kalsine kalsitin hava ile teması sonucu $CaCO_3$ fazına geçerek yüzeyde karbonat oluşumuna sebep oluşuyla ilişkilendirilmektedir (Lv vd., 2023; Monica ve Mejia , 2015). Öte yandan dar ve keskin yapılı pikler geopolimer harç numune yapısında hala kuvars (α-SiO_2), vollastonit ($CaSiO_3$) ve Ca içerikli kristal fazların varlığını ortaya koymaktadır. Özellikle 26 2θ° açısı civarındaki keskin pik kuvars pikini temsil etmektedir. Ancak XRD verilerinde 26-27° açı bölgesi, hem kuvars hem de Ca silikat fazların karakteristik yansımalarını gösterdiği için bu pikleri tek bir faza atamak zordur (Alshaaer vd., 2024). Benzer şekilde, 34–36° aralığı ve 50° civarı çoklu Ca-silikat fazları ile örtüşmektedir(Hu vd. , 2024). Bu nedenle Rietveld analizi gibi karakterizasyon yöntemleri ile doğrulama önerilmektedir.



Şekil 79. VKW-5M:1.5 geopolimer harç XRD grafiği

3.1.3.2.6. 20C-15M:2.5

Şekil 80’de 20C-15M:2.5 geopolimer harcın XRD grafiği görülmektedir.20C-15M:2.5 geopolimer harç XRD grafiği incelendiğinde geopolimer yapıyı temsil eden C–S–H/N–A–S–H jel oluşumlarını gösteren 20°-40° açıları arasında amorf ve kubbe

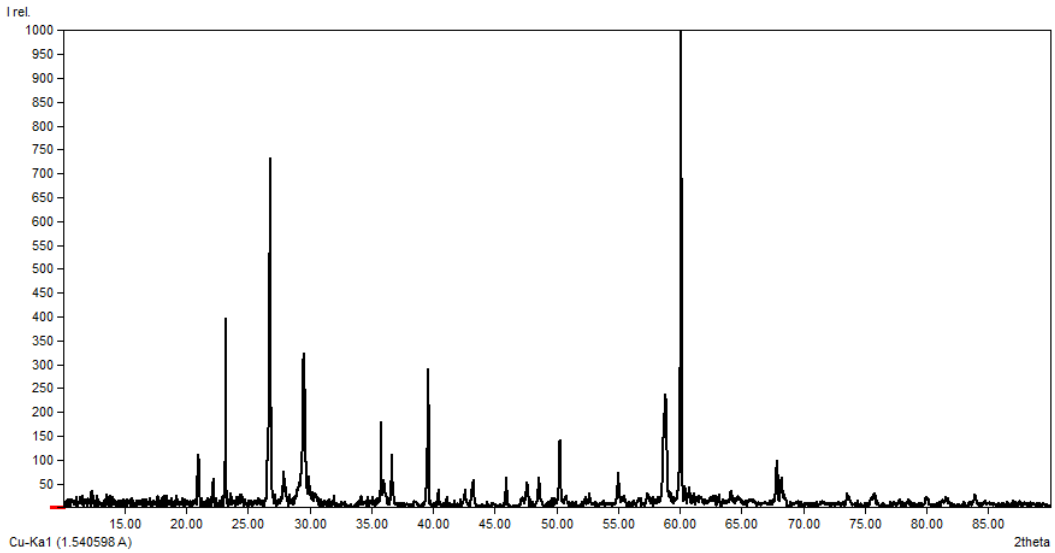
tepe görünümlü piklerde düşüş ve kristallik gözlemlenmiştir. 35°–39° civarındaki sivri pikler, çoklu Ca silikat fazları ile örtüşmektedir.(Viola vd., 2024; Ramli vd. ,2019). 26° civarındaki pikler ise kuvars ve kalsiyum kaynaklı kristalleri temsil etmektedir (Zhang vd. , 2014). Na-ilişkili fazlar, 22.211° ve 40.45° piklerinde gözlemlenmekte olup, SEM'deki %5,7 Na ile uyumludur.

XRD analizi sonucunda 2θ = 60.097° ve d = 1.538 Å konumunda gözlemlenen pik numune içerisindeki olası Ca-fazlarının belirlenmesi açısından incelenmiştir. Olası fazlar arasında portlandit ($Ca(OH)_2$), amorf C–S–H ve C–A–S–H jelleri, düşük kristal Tobermorit/Jennite ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot 4H_2O$), alit ($C_3S$), belit ($C_2S$) ve karbonat ($CaCO_3$) değerlendirilmiştir.

Portlandit ve $CaCO_3$, mevcut 2θ konumunda oluşma olasılığı düşük olan fazlardır. Özellikle portlandit için tipik pikler 32°, 34°, 47° ve 50° civarında beklenmektedir (Liu vd. , 2014). $CaCO_3$ 'ün karakteristik pikleri ise 29–43° aralığındadır. Alit ve belit ise yalnızca yüksek sıcaklıklarda (≥1250 °C ve ≥900 °C) oluşabildiğinden, bu koşullar altında mevcut pik ile uyumlu değildir (Benmohamed vd. , 2016).

Amorf C–S–H ve C–A–S–H jelleri genellikle geniş ve düşük yoğunluklu pikler oluşturmaktadır. Bu nedenle 60° civarındaki dar ve yüksek yoğunluklu pik ile doğrudan açıklanamaz. Buna karşılık Tobermorit ve Jennite gibi düşük kristal Ca-silikat fazları, oda sıcaklığında $Ca^{2+} + SiO_2 + OH^-$ etkileşimi ile oluşabilmekte ve 50–65° aralığında pikler verebilmektedir. Mevcut 60° pikin hem dar FWHM hem yüksek yoğunluğu, bu fazların olası varlığını desteklemektedir (Qu vd. , 2018).

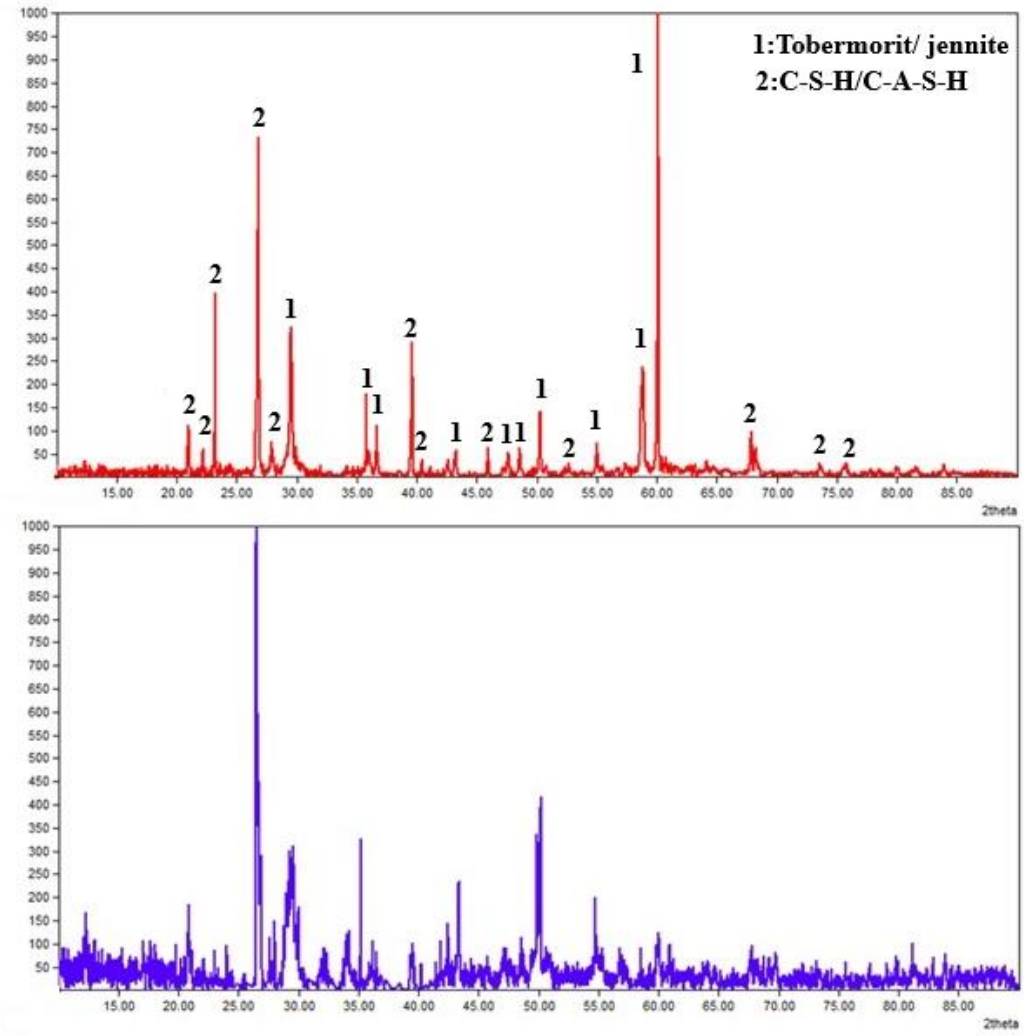
Bu veriler ışığında, 60° piki büyük olasılıkla oda sıcaklığında oluşmuş düşük kristal veya yarı kristal Ca-silikat fazına (Tobermorit/Jennite benzeri) işaret etmektedir. Alit ve belit gibi yüksek sıcaklık fazlarının oluşumu mevcut koşullar altında mümkün değildir ve portlandit ile $CaCO_3$ olasılığı da düşük kabul edilmektedir. Sonuç olarak, gözlemlenen XRD piki, numunedeki Ca ve Si içeriklerinin düşük kristal silikat fazı oluşturduğunu ve bu fazın Tobermorit/Jennite benzeri yapıda olduğunu göstermektedir (Qu vd., 2018; Myers vd., 2013; Corro-Escorcia vd. , 2025).



Şekil 80. 20C-15M:2.5 geopolimer harç XRD grafiği

İki numunenin XRD analizi sonucu tespit edilen bulgular göz önüne alındığında mermer ikamesinin sistemdeki Ca miktarını artırdığı ancak C-S-H bağ oluşumlarını desteklemediğini, kontrolsüz bağ oluşumu sergileyerek farklı kristal formlarda yapıların oluşmasına zemin hazırladığı görülmüştür (Rashad vd., 2025;. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numunesinde düşük pikli görülen Ca zengini kristal pikler 20C-15M:2.5 geopolimer harç numunesinde daha net görülmektedir (Yip vd., 2005). Öte yandan 60° 'de görülen tobermorit/jennite benzeri kristal faz 20C-15M:2.5 numunesinde yoğun olarak bulunmaktadır. Bu iki numunenin kıyasında göz ardı edilmemesi gereken bir noktadır. Çünkü tobermoritin C-S-H jelinin kristalografik bir modeli olduğu bilinmektedir. Bu nedenle tobermorit benzeri yapıların oluşumu geopolimer harcın performansını doğrudan etkilemektedir. Çünkü C-A-S-H jeli yapısı gereği tobermoritin düzensiz bir formu olan kalsiyum silikat hidrat fazına benzer şekilde tanımlanmaktadır (Myers vd. , 2013). (Şekil 81). Bu durum mekanik dayanım sonuçları ile desteklenmektedir. VKW-5M:1.5 numunesinin basınç dayanımı 2.810 MPa iken 20C-15M:2.5 numunesinin basınç dayanımı 6.886 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca tobermoritin otoklavlanmış gazlı betonlarda oluşumunun incelendiği çalışmada oluşan tobermoritin betondaki gözenekli yapıyı azalttığı tespit edilmiştir (Corro-Escorcia vd., 2025). VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 geopolimer numuneleri kıyaslandığında 20C-15M:2.5 numunesinin daha kısa geopolimer zincirine sahip olmasına rağmen daha düşük poroziteye daha yüksek yoğunluk, eğme

dayanımı ve basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum 60° civarında görülen tobermorit/jennite benzeri kristal faz ile açıklanmaktadır.



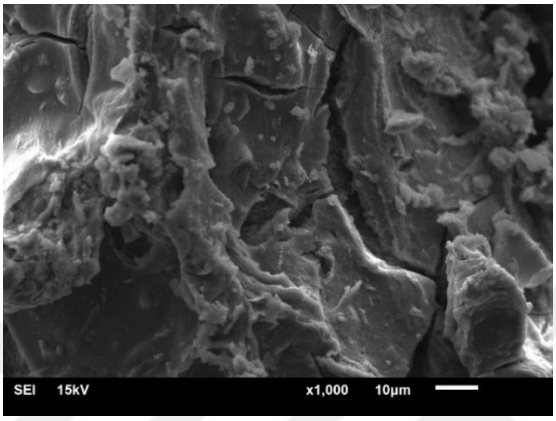
Şekil 81. VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 XRD analiz karşılaştırması

3.1.3.3. SEM-EDS Analizlerinin Değerlendirilmesi

VKW-5M:15 ve 20C-15M:2.5 geopolimer harç numunelerinin geopolimer matrisleri ve yapısal kusurlarının analizi için RTEÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarında SEM analizleri yapılmıştır. Numuneler x100,x250,x500 ve x1000 kez büyütülerek farklı bölgelerden analiz görüntüleri elde edilmiştir. Görüntülerdeki reaksiyona katılmamış parçacıklar, çatlak ve boşluk yapıları incelenmiştir.

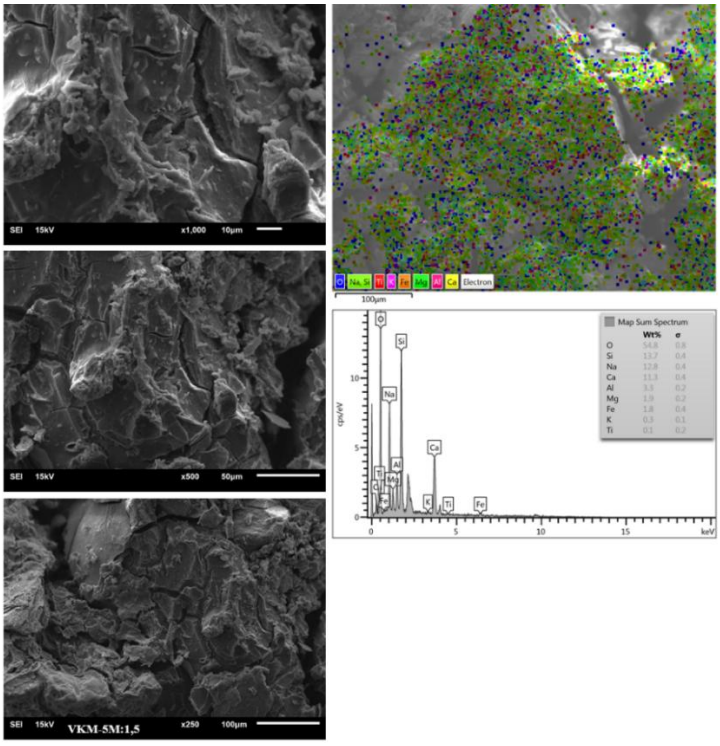
3.1.3.3.1. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Numune SEM Analizi

Şekil 82'de VKW-5M:1.5 geopolimer harç numunesinin X1000 büyütmede 10 µm ölçekli görüntüsü görülmektedir. Genel olarak geopolimer ağ yapısının oluştuğu CaO, vollastonit ve kalsit gibi kristal fazların amorf jel matrisi içinde dağıldığı görülmektedir. Bu durumun yapının gözenekliliğini azaltması beklenmektedir.



Şekil 82. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numune SEM görüntüsü

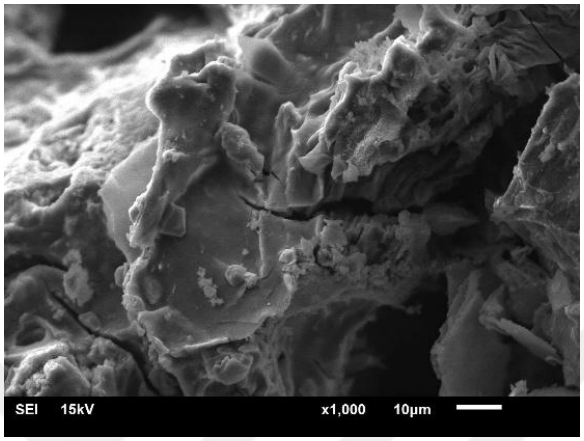
Şekil 83'te mikro heterojenliklerin görüldüğü x250, x500 ve x1000 büyütmede SEM görüntüleri EDS ve Mapping görselleri ile birlikte görülmektedir.



Şekil 83. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Numune SEM, EDS, Mapping görüntüleri

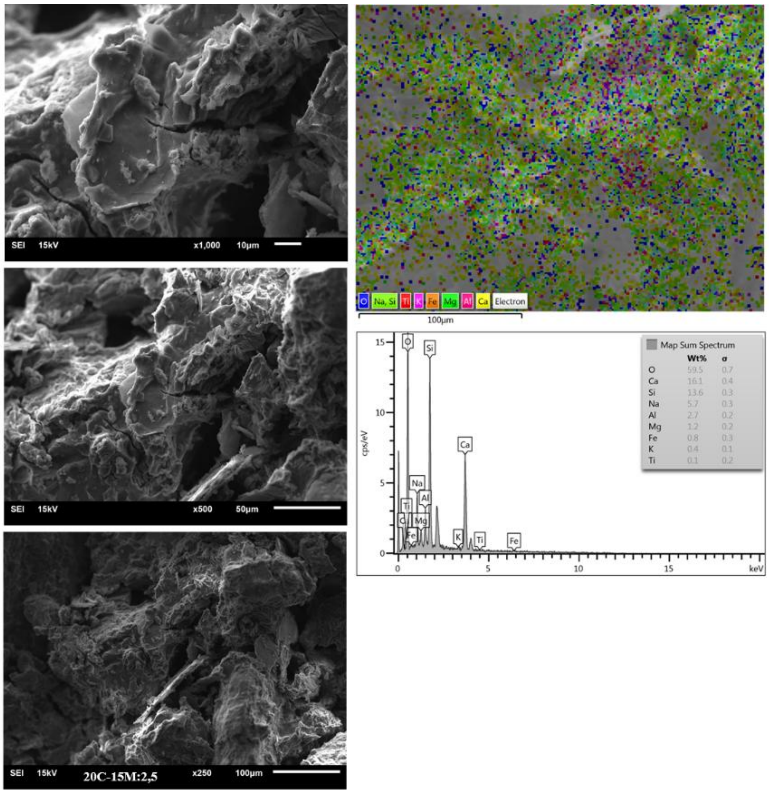
3.1.3.3.2. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Numune SEM Analizi

Şekil 84'te 20C-15M:2.5 geopolimer harç numunesinin mikro yapısı, X1000 büyütmede ve 10 µm ölçekli SEM görüntüleri üzerinden incelenmiştir. SEM görüntülerindeki yapısal kusurlar; çatlak, boşluk ve kristal yapılar incelenmiştir.



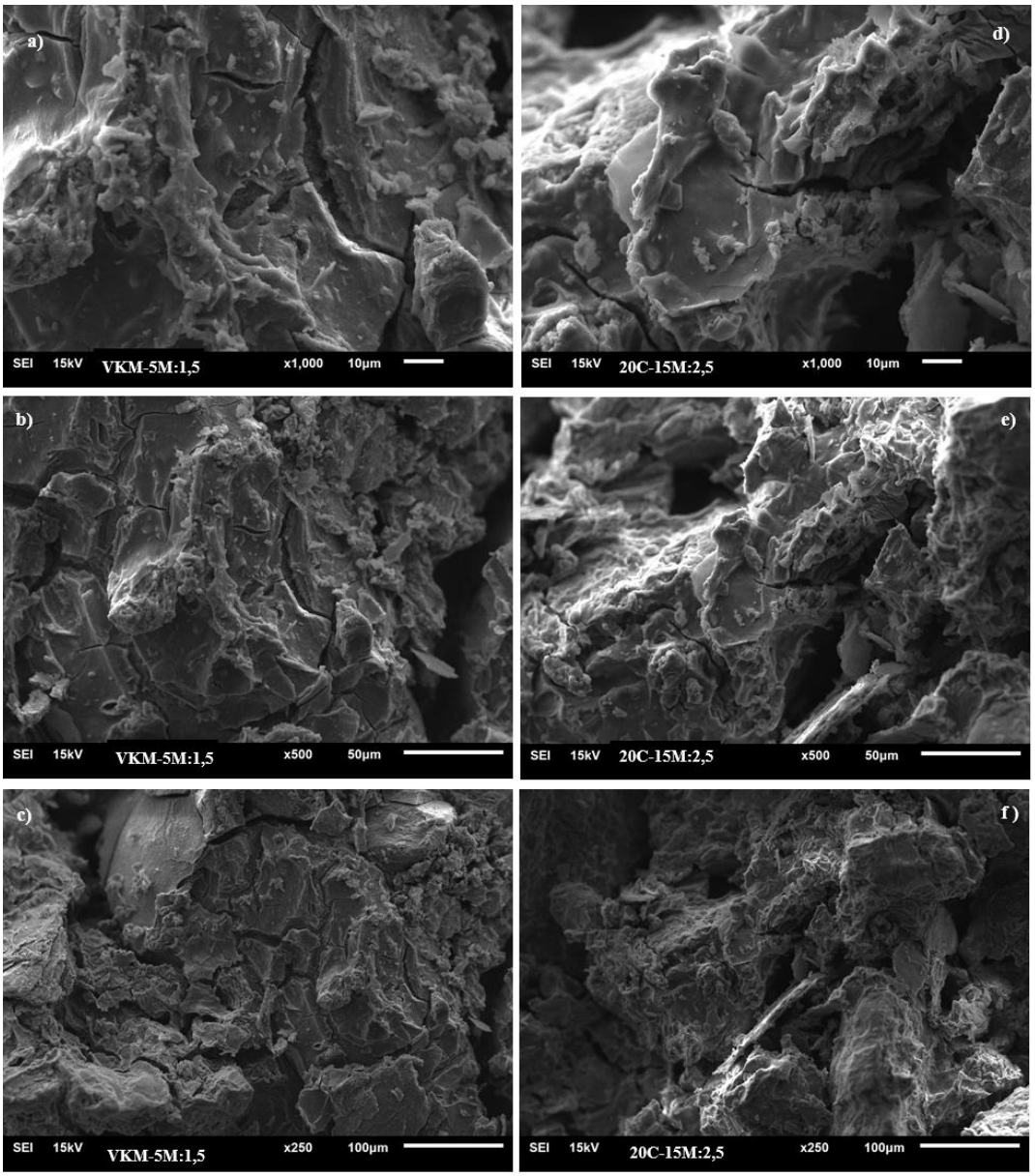
Şekil 84. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Numune EDS görüntüleri

Oluşan kristalleşmenin x250, x500 ve x1000 büyütme görüntüleri Şekil 85'te EDS ve mapping görselleri ile birlikte görülmektedir.



Şekil 85. 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune SEM, EDS, Mapping görüntüleri

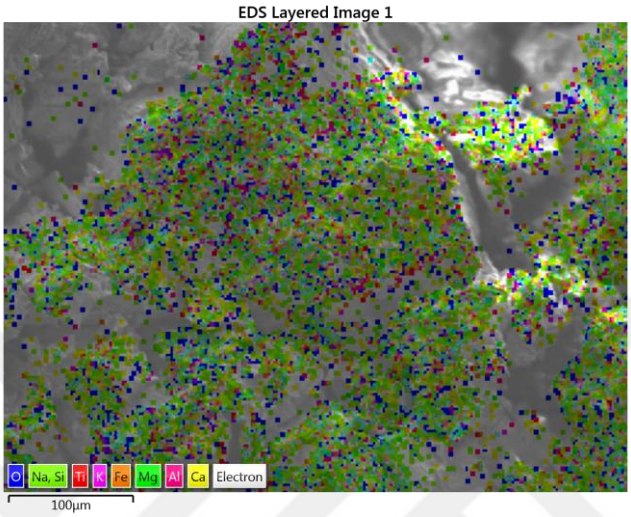
Şekil 86'da VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 geopolimer harçlarının SEM görüntüleri karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Görüntüler incelendiğinde geopolimer matrisi ile birlikte iki numunede de kristal yapılar ve yapısal kusurlar tespit edilmiştir. Ayrıca 20C-15M:2.5 geopolimer harç numunesinde farklı formda kristal faz oluşumları gözlemlenmiştir.



Şekil 86. VKW-5M:1.5 ve 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune SEM görüntüleri

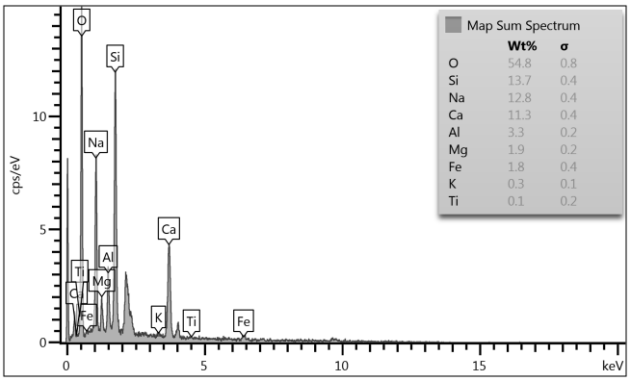
3.1.3.3.3. VKW-5M:1.5 Geopolimer Harç Numune EDS Analizi

VKW-5M:1.5 geopolimer harç numunesinin Elektron Mikroskop Mapping analiz görüntüsü Şekil 87'de görülmektedir. Renk atamalarından sodyum (Na), silisyum (Si) ve alüminyum (Al) homojen dağılımları görülmektedir.



Şekil 87. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numune Mapping görüntüsü

Şekil 88'de EDS analiz grafiği görülmektedir. Oksijen (%54,8), silisyum (%13,7), sodyum (%12,8), kalsiyum (%11,3), alüminyum (%3,3) değerleri, malzemenin alüminosilikat bazlı yapısını ve alkali aktivatörlerin etkisini göstermektedir.



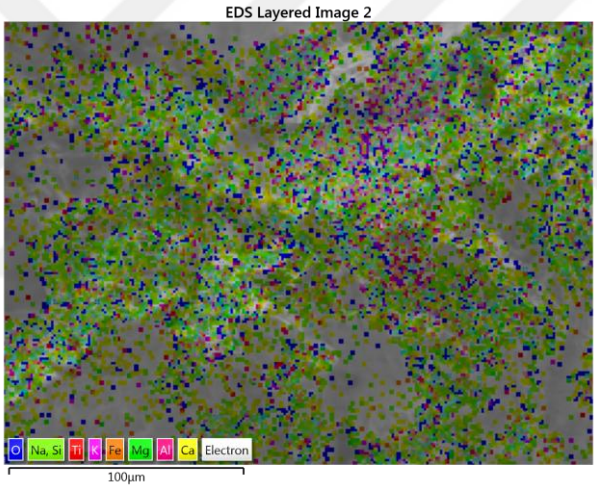
Şekil 88. VKW-5M:1.5 geopolimer harç numune EDS görüntüsü

Magnezyum (%1,9), demir (%1,8), potasyum (%0,3) ve titanyum (%0,1) gibi iz elementlerin varlığı ise doğal hammaddelerin safsızlıklarından kaynaklanmaktadır.

SEM-EDS analizinden elde edilen ağırlık yüzdeleri kullanılarak kaba atomik mol oranları hesaplanmıştır (elemanların atomik kütlelerine göre). Hesaplama sonucunda numunenin Si/Al ≈ 4.0, Na/Al ≈ 4.6 ve Ca/Al ≈ 2.3 olduğu bulunmuştur. Yüksek Si/Al ve Na/Al oranları N-A-S-H tipi aluminosilikat jelinin oluşumunu desteklerken, Ca/Al ≈ 2.3 oranı C-(A)-S-H/C-S-H tipi kalsiyum fazlarının varlığını düşündürmektedir (Lodeiro vd. , 2011).

3.1.3.3.4. 20C-15M:2.5 Geopolimer Harç Numune EDS Analizi

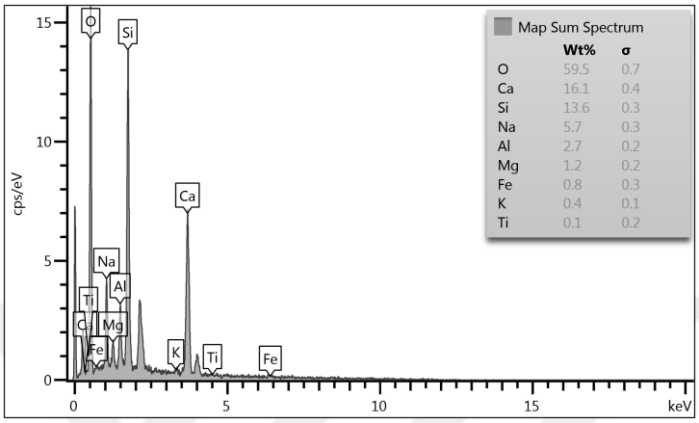
20C-5M:1.5 geopolimer harç numunesinin Elektron Mikroskop Mapping analiz görüntüsü Şekil 89'da görülmektedir. Renk atamalarından sodyum (Na), silisyum (Si) ve alüminyum (Al) homojen dağılımları görülmektedir.



Şekil 89. 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune Mapping görüntüsü

20C-15M:2.5 EDS analizi Şekil 90'da görülmektedir. Analiz sonucu mikro yapıyı kimyasal açıdan desteklemektedir. Oksijen (%59,5), kalsiyum (%16,1), silikon (%13,6), sodyum (%5,7), alüminyum (%2,7), bileşen oranları yapının alümina silika tabanlı olduğunu ortaya koymaktadır. Magnezyum (%1,2), demir (%0,8), potasyum (%0,4) ve titanyum (%0,1) gibi iz elementlerin varlığı ise doğal hammaddelerin safsızlıklarından kaynaklanmaktadır. Bu bileşim, sistemde yüksek oranda kalsiyum silikat hidrat (C–S–H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C–A–H) fazlarının varlığına işaret etmektedir. Kalsiyum oranının belirgin biçimde yüksek olması, klasik Na–Al–Si geopolimer jelinin (N–A–S–H) yanında kalsiyum katkılı (C)–A–S–H jelinin oluşumunu göstermektedir (Lodeiro vd. , 2011). Sodyumun varlığı, alkali aktivasyon

sürecinde çözünmenin etkin biçimde gerçekleştiğini; magnezyum ve demirin ise yapıda az miktarda Mg–O–Si veya Fe–O–Si bağları oluşturabileceğini düşündürmektedir. Tüm bu özellikler, yarı kristalin–amorf bir geopolimer matrisin kimyasal temelini ortaya koymaktadır.

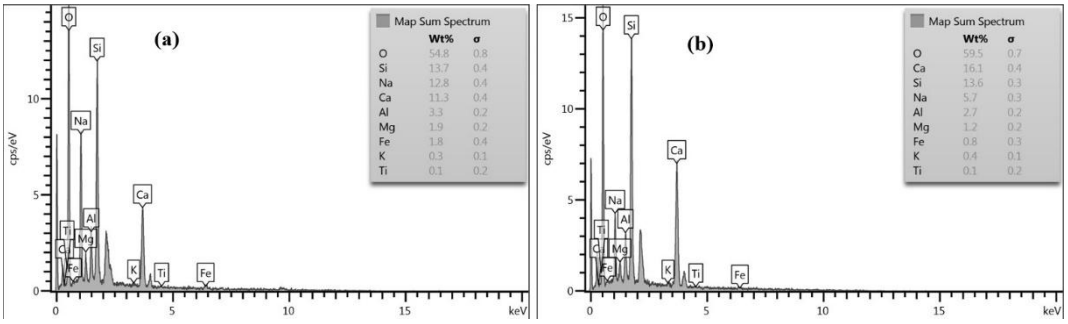


Şekil 90. 20C-15M:2.5 geopolimer harç numune EDS görüntüsü

Geopolimer yapısındaki C-A-S-H ve N-A-S-H bağ oluşumları yapının mekanik dayanımını iyileştirmektedir (Provis & van Deventer, 2014; Davidovits, 2015). Literatürde Ca ikamesinin geopolimer sistemlerde C-A-S-H bağ oluşumunu artırdığı bilinmektedir Granizo vd. , 2002; Yip vd. , 2008). Yapının Ca/Si oranındaki artışın bağ yapısını ve mekanik dayanımı artırdığı çalışmalar mevcuttur(Fan vd. , 2023; Wang vd. , 2024). Katkı malzemesi olarak kalsiyum ikamesinin araştırıldığı çalışmalarda ise ikame kalsiyum miktarı (%) oldukça önemli olmaktadır(Li vd. , 2025). Şekil 91'de genel EDS görüntüleri birlikte verilen harç numunelerin elemantel yüzdeleri ve Ca/Si oranları Tablo 15'te görülmektedir. VKW-5M:1.5 numunesinde Ca/Si oranı 0,82 iken 20C-15M:2.5 numunesinde Ca/Si oranı 1,18 olarak bulunmuştur. Basınç dayanımları, SEM, XRD ve EDS analizleri göz önüne alındığında Ca/Si oranındaki artışın geopolimer harç numunenin mekanik özelliklerini artırdığı, porozitesi daha düşük bir yapı oluşumuna zemin hazırladığı tespit edilmiştir.

Tablo 15. Geopolimer harç numuneler EDS sonuçları

%	O	Si	Na	Ca	Al	Mg	Fe	K	Ti	Ca/Si
VKW-5M:1.5	54,8	13,7	12,8	11,3	3,3	1,9	1,8	0,3	0,1	0,82
20C-15M:2.5	59,5	13,6	5,7	16,1	2,7	1,2	0,8	0,4	0,1	1,18



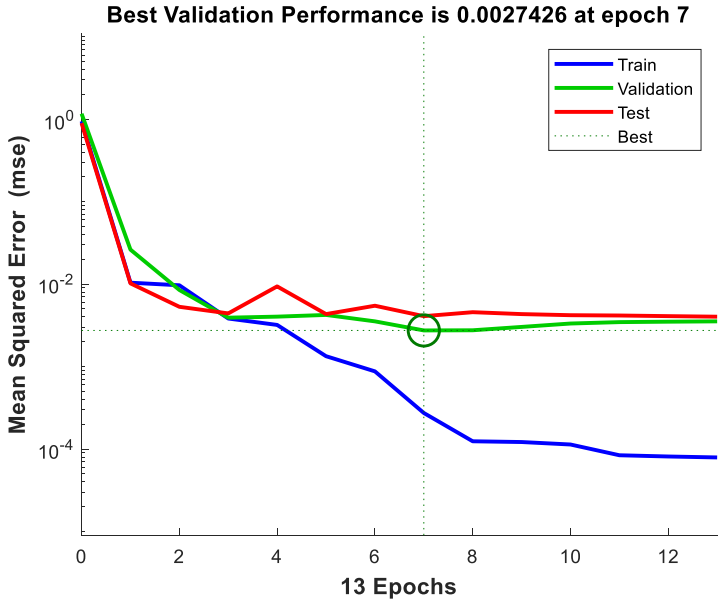
Şekil 91. Geopolimer harç numune genel EDS görüntüleri; (a): VKW-5M:1.5 ,(b) : 20C-15M:2.5

3.2. Yapay Sinir Ağı Modeli Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.2.1. Model Performansının Değerlendirilmesi

3.2.1.1. YSA Modelinin Tekrarlanan Denemelerde Performansı

Geopolimer harçların eğilme dayanımlarının tahmini için yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Elde edilen eğitim sonuçları, yapay sinir ağı (YSA) modelinin yüksek doğrulukla çalıştığını ve eğitim sürecinin başarıyla tamamlandığını göstermektedir. Eğitim 13. dönemde sonlanmış en iyi doğrulama performansı dönem 7 de elde edilmiştir. Şekil 92'de modelin performans grafiği görülmektedir.



Şekil 92. Model performans grafiği

Tablo 16'da başlangıçtaki parametre değerleri ve eğitim sonunda durdurulan değerler, hedef değerler ile birlikte görülmektedir. Eğitim, 13 dönemde erken durdurma mekanizması sayesinde optimum noktada sonlanmış; bu da modelin aşırı öğrenmeden (overfitting) korunmasını sağlamıştır. Ortalama kare hata (MSE) değeri başlangıçta 0,945 iken, eğitim sonucunda $7{,}91\times10^{-5}$ değerine kadar düşmüştür. Bu durum modelin tahmin hatasının çok küçük olduğunu göstermektedir. Gradyan değerinin hedef değere yaklaşması öğrenmenin büyük oranda tamamlandığını göstermektedir. İçinde değerindeki azalma ağın yakınsama sağladığını göstermektedir. 6. tekrarda eğitim otomatik olarak durdurularak modelin aşırı öğrenmeden korunması sağlanmıştır. Tüm bu göstergeler, kullanılan Levenberg–Marquardt algoritmasının etkinliğini ve geliştirilen YSA modelinin geopolimer harçların eğilme dayanımını yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir (Hastie vd., 2009).

Tablo 16. Model parametre değerleri

Parametre	**Başlangıç Değeri**	**Durdurulan Değer**	**Hedef Değer**
Dönem (Epoch)	0	13	1000
Performans (MSE)	0,945	7,91e-05	0
Gradyan	1,3	6,33e-05	1e-07
İçinde (Mu)	0,001	1e-05	1e+10
Doğrulama Kontrolleri	0	6	6

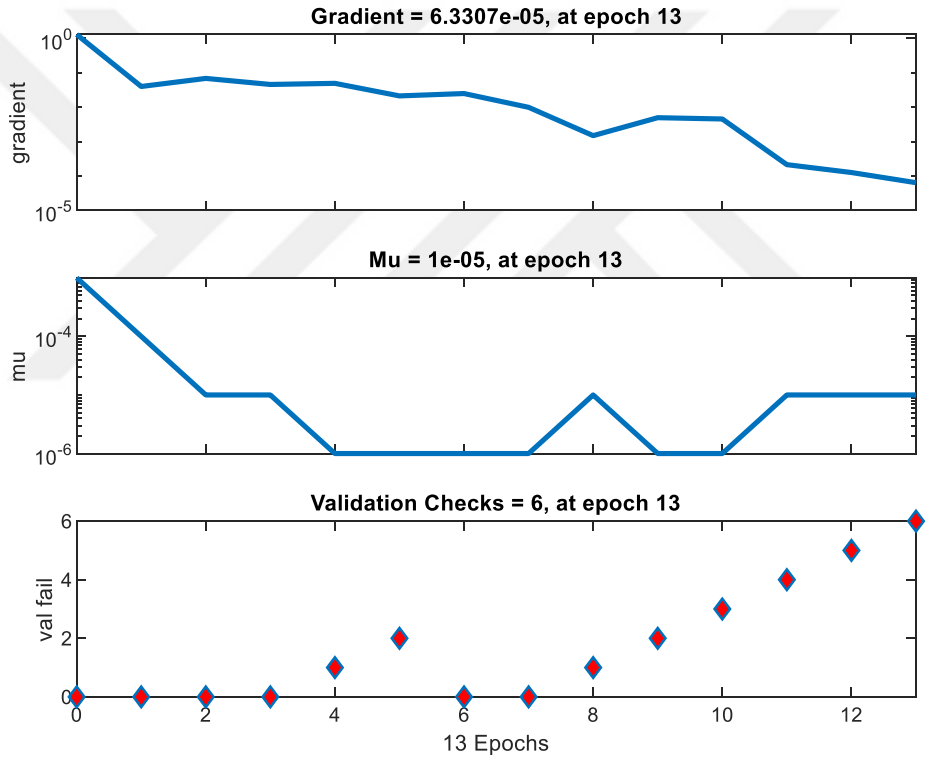
Oluşturulan model 16 nöroluk tek gizli katmana sahiptir ve en iyi doğrulama performansı 13. Epoch'ta elde edilmiştir. 13. dönem için elde edilen model parametreleri incelenmiştir. Şekil 93'te gradyan Mu ve doğrulama denetimleri için grafikler görülmektedir:

Ağırlık güncellemeleri sırasında hatanın değişim oranını gösteren gradyan parametresi değerleri görülmektedir. Bu değerin başlangıçta 1,3 iken eğitimin sonunda $6{,}33\times10^{-5}$ seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Gradyan değerinin eğitim sonunda hedef değere yaklaşması (1×10^{-7}) öğrenmenin büyük oranda tamamlandığını ve stabil hale geldiğini göstermektedir.

Levenberg–Marquardt algoritmasında kullanılan adaptif düzenleme katsayısı olan Mu değerinin eğitimin başında 0,001 iken eğitim sonunda 1×10^{-5} değerine düştüğü görülmektedir. Bu azalma ağın yakınsama sağladığını ve optimizasyonun

stabil hale geldiğini göstermektedir. Ayrıca değerin kontrollü düşüşü algoritmanın öğrenme sürecinde 'Newtoon' benzeri hassas ve dengeli adımlar attığını ortaya koymaktadır.

Erken durdurma mekanizmasını gösteren doğrulama denetimleri incelendiğinde: Eğitim süresince doğrulama hatası art arda 6 dönem boyunca iyileşmediğinde eğitimin otomatik olarak durdurulduğu görülmektedir. Bu durum modelin aşırı öğrenmeden korunmasını sağlayarak performansın korunduğunu göstermektedir. Böylece modelin genelleme yeteneği korunarak overfitting riski en aza indirilmektedir.



Şekil 93. Model parametre grafikleri

20 deneme üzerinden gerçekleştirilen model eğitimleri sonucunda, performans metrikleri R^2 (korelasyon katsayısı), RMSE (Root Mean Square Error – Ortalama Kare Hata Kökü) ve MAE (Mean Absolute Error – Ortalama Mutlak Hata) üzerinden değerlendirilmiştir. Deneme sayılarına göre performans değerleri Tablo 17'de görülmektedir. Tablo verileri incelendiğinde çoğu denemede yüksek R^2 değerleri ve düşük hata ölçütleri (RMSE, MAE, MAPE) gözlemlenmiştir. Genel olarak

denemelerin R^2 değerlerinin 0,90'ın üzerinde olması ve ortalama hata değerlerinin düşük olması modelin güvenilir olduğunu göstermektedir. En iyi performans 9.denemede elde edilmiştir (R^2 = 0,9747, RMSE = 0,0289, MAE = 0,0206, MAPE=2,51%).

Tablo 17. Model performans değerleri

Deneme	R^2	RMSE	MAE	MAPE (%)
1	0,9522	0,0398	0,0227	2,77
2	0,9256	0,0496	0,0377	4,60
3	0,8992	0,0578	0,0375	4,57
4	0,8995	0,0577	0,0462	5,64
5	0,9246	0,0500	0,0382	4,64
6	0,9349	0,0464	0,0273	3,33
7	0,9010	0,0572	0,0451	5,51
8	0,9437	0,0432	0,0285	3,48
9	0,9747	0,0289	0,0206	2,51
10	0,9434	0,0433	0,0307	3,75
11	0,9388	0,0450	0,0326	3,98
12	0,9294	0,0483	0,0297	3,62
13	0,9631	0,0349	0,0247	3,01
14	0,8358	0,0737	0,0564	6,89
15	0,9329	0,0471	0,0338	4,13
16	0,8067	0,0800	0,0616	7,55
17	0,9273	0,0491	0,0380	4,66
18	0,8022	0,0809	0,0584	7,16
19	0,9249	0,0499	0,0307	3,75
20	0,9636	0,0347	0,0229	2,79

En iyi modelin farklı veri setlerindeki performansı Tablo 18'de görülmektedir.

Tablo 18. En iyi modelin farklı veri setlerinde performansı

Dataset	R^2	RMSE	MAE	MAPE (%)
Tüm Veri	0,9747	0,0289	0,0206	2,51
Eğitim	0,9909	0,0167	0,0139	1,75
Doğrulama	0,9677	0,0411	0,0329	3,77
Test	0,8916	0,0513	0,0403	4,87

Aşağıda performans metriklerine göre elde edilen sonuçlar detaylı şekilde ele alınmıştır:

Korelasyon Katsayısı (R^2): YSA modellemesi sonucu tüm veri setinde 0,9747, eğitim setinde 0,9909, doğrulama setinde 0,9677, test setinde 0,8916 korelasyon katsayısı değerleri elde edilmiştir. Eğitim ve doğrulama setlerindeki yüksek korelasyon katsayıları modelin öğrenme başarısını ve genelleme kabiliyetini göstermektedir. Test setinde elde edilen korelasyon katsayısındaki düşüş ilk defa karşılaşılan verilerdeki hata payını göstermektedir (Sarıdemir, 2009; Yüksek ve ark. 2024).

Kök Ortalam Kare Hata (RMSE): YSA modellemesi sonucu tüm veri setinde 0,0289, eğitim setinde 0,0167, doğrulama setinde 0,0411, test setinde 0,0513 RMSE verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler modelin eğitim setini yüksek doğrulukta öğrendiğini göstermektedir. Doğrulama ve test veri setlerinde ise hata değerlerindeki artışın beklendiği gibi arttığı tespit edilmiştir (Benali vd., 2019).

Ortalama Mutlak Hata (MAE): Elde edilen düşük MAE değerleri modelin tahminlerinde küçük sapmalarla yüksek doğruluk performansı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Eğitim setinde MAE = 0,0139, test setinde ise MAE = 0,0403 olarak bulunmuştur (Bui vd., 2016).

Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) : Eğitim setinde %1,75 ile en düşük, test setinde %4,87 ile en yüksek MAPE değeri elde edilmiştir. Bu oranlar, modelin genel hata seviyesinin düşük ve kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir.

3.2.1.2. Nöron Sayısına Göre Performans Analizi

R^2 değerleri, nöron sayısına göre dalgalı bir seyir izlemektedir. Ortalama $R^2 \approx 0.922$ düzeyinde olup, bazı denemeler (özellikle 9., 13. ve 20. denemeler) belirgin şekilde daha yüksek doğruluk göstermektedir. Tablo 19'da görülen denemeler ve performans kriterleri yüksek doğruluk ve düşük hata parametreleriyle optimum performans aralığını göstermektedir.

Tablo 19. En başarılı nöron yapıları

Deneme	R^2	RMSE	MAE	MAPE (%)
9	0.9747	0.0289	0.0206	2.51
13	0.9631	0.0349	0.0247	3.01
20	0.9636	0.0347	0.0229	2.79

Bazı denemelerde ise model performansının belirgin şekilde düştüğü görülmektedir. Elde edilen yüksek hata değerleri fazla veya yetersiz nöron sayısı nedeniyle öğrenme dengesini kaybettiğini göstermektedir (Tablo 20).

Tablo 20. Düşük performans gösteren yapılar

Deneme	R^2	RMSE	MAE	MAPE (%)
16	0.8067	0.0800	0.0616	7.55
18	0.8022	0.0809	0.0584	7.16
14	0.8358	0.0737	0.0564	6.89

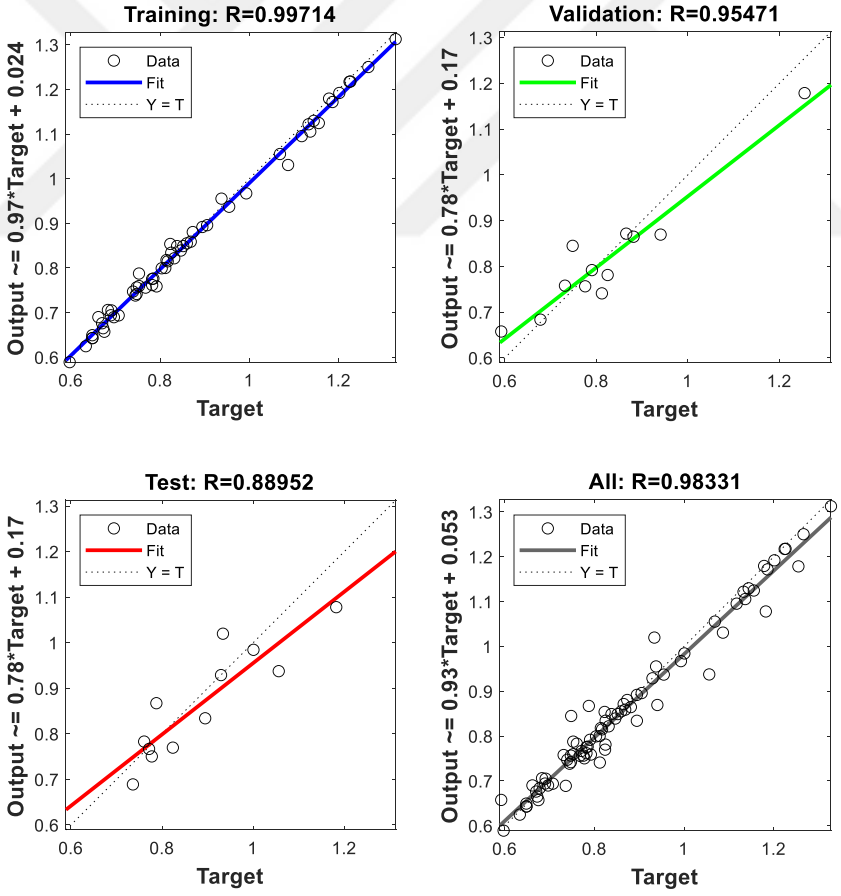
Tablo 19 ve Tablo 20 değerleri incelendiğinde YSA modelinin performansının nöron sayısına bağlı olduğunu göstermektedir. Nöron sayısı arttıkça model performansı artış göstererek optimum seviyeye (yaklaşık 9-13 nöron civarı) ulaşmıştır. Ancak optimum seviyeden sonra nöron sayısındaki artış (16-18 arası denemeler) modelin aşırı öğrenmesine (overfitting) veya aşırı karmaşıklaşmasına neden olarak doğruluk oranlarını düşürmüştür. Bulgular YSA modellerinin nöron sayısının model karmaşıklığı ve veri yapısının doğrusal olmayan ilişkileri dengelemesi gerektiğini göstermektedir(Haykin, 1999; Bishop, 2006; Goodfellow vd., 2016) .

3.2.1.3. Regresyon Performans Analizi

Veri seti üzerinde regresyon analizi yapılmıştır. Şekil 94'te regresyon grafikleri eğitim, doğrulama, test ve tüm veri seti için verilmektedir. Elde edilen regresyon grafikleri, YSA modelinin tüm aşamalarda yüksek doğrulukta tahminler yaptığını göstermektedir. Veri noktalarının genelinin 45° referans çizgisine yakın olması, tahmin değerlerinin hedef değerlere yakın olduğunu yani hata seviyelerinin düşük olduğunu göstermektedir. Eğitim setinde R= 0,99714 değerine ulaşılması modelin

yüksek doğrusal ilişki kurma kabiliyetini ortaya koymaktadır (Hagan ve Menhaj, 1994).

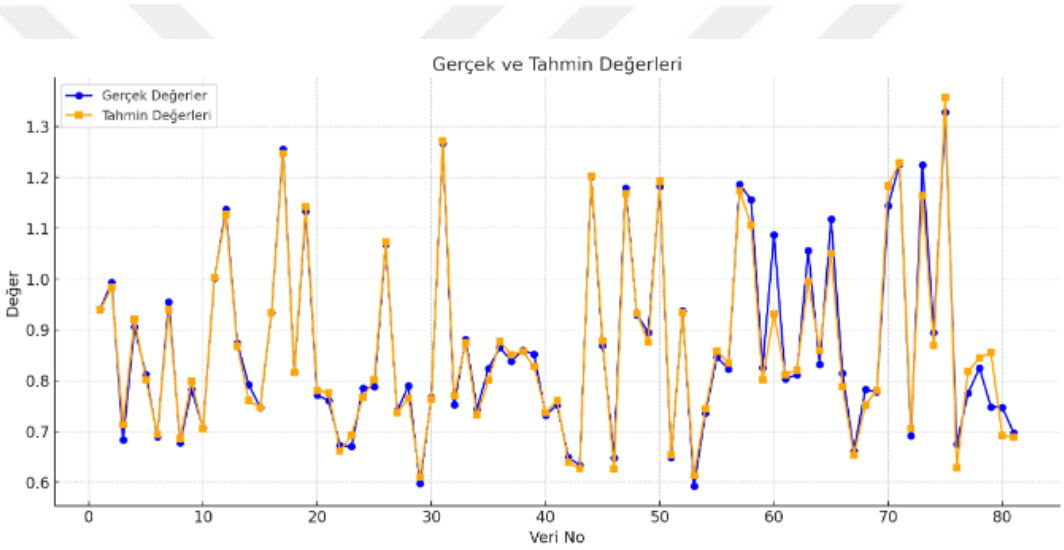
Doğrulama setinde R=0,95471 değeri elde edilmiştir. Bu durum modelin genelleme yeteneğinin güçlü olduğunu ve aşırı öğrenme riskinin düşük olduğunu göstermektedir. Test setinde ise R değeri 0,88952 olarak tespit edilmiştir. Model daha önce görmediği veriler üzerinde tatmin edici bir tahmin performansı sergilemiştir. Verilerin referans doğrusu etrafındaki dağılımının daha geniş olması modelin genelleme yeteneğini koruyarak tahmin güven aralığını artırdığını göstermektedir(Hagan vd., 2014). Tüm veri setinde ise R= 0,98331 olarak belirlenmiştir. Bu durum ise modelin genel tahmin gücünün yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 94. Regresyon analiz grafikleri

3.2.1.4. Gerçek- Tahmin ve Hata Analizleri

Modelin tahmin yeteneği gerçek ve tahmin değerleri üzerinden incelenmiştir. Şekil 95'deki grafikte gerçek ve tahmin değerleri bir arada görülmektedir. Kullanılan veri setinde gerçek değerler 0,59-1,33 aralığında değişmektedir. Bu durum veri setinin varyans aralığının oldukça geniş olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 95'teki grafik incelendiğinde çoğu veri için tahmin değerlerinin gerçek değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Öte yandan bazı uç değerlerde (Veri 60-79) tahimn değerleri ve gerçek değerler arasında belirgin bir fark olduğu tespit edilmiştir. Bu durum modeli uç değerlerde sınırlı genelleme yetisine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Chai ve Draxler, 2014).



Şekil 95. Gerçek ve tahmin değerleri analizi

Şekil 96'da tahmin hata dağılımları grafiği verilmektedir. Hata değerleri, gerçek değerler ve tahmin değerleri arasındaki farkı göstermektedir. Grafik incelendiğinde hata değerlerinin pozitif ve negatif yönlü dağıldığı görülmektedir. Hata değerleri genellikle ±0,03 civarında yoğunlaşmaktadır. Ancak uç noktalardaki bazı hata değerlerindeki artış göz ardı edilmemelidir. Bu durumun model performansında sınırlayıcı bir etki olduğu düşünülmektedir. Ayrıca hataların sistematik bir şekilde değil de rastgele dağılıma sahip ve küçük oluşu modelin güvenilirliğini göstermektedir.



Şekil 96. Tahmin hata dağılımı grafiği

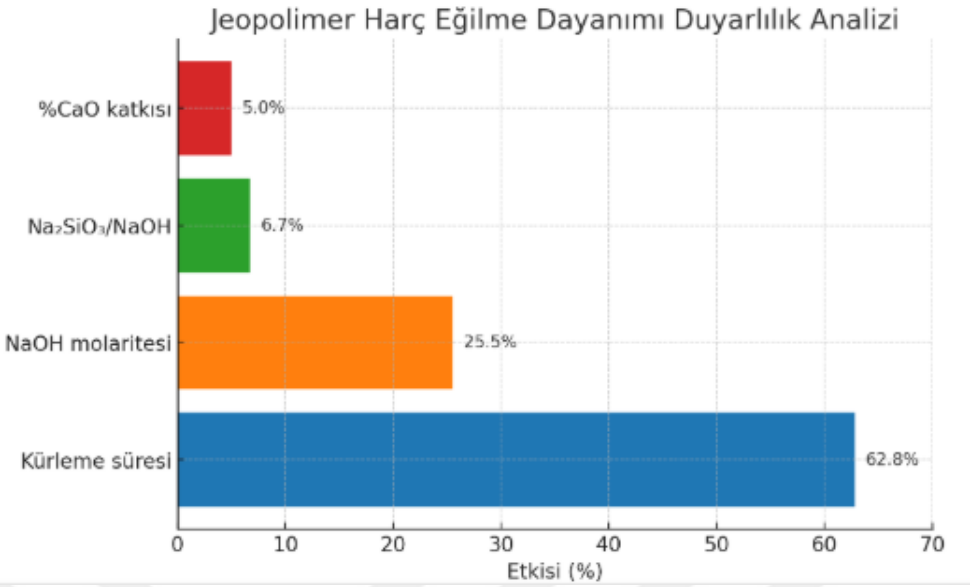
3.2.1.5. Duyarlılık Analizi

Yapay sinir ağı modeli birden fazla bağımsız değişkenle bağlı tek bir bağımlı değişkeni tahmin ettiği için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini anlamak oldukça önemlidir. Ayrıca duyarlılık analizi oluşturulan modelin güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koyarak gelecekteki deneysel çalışmalar içi öncelikli parametrelerin belirlenmesinde rol oynamaktadır. Bu nedenle, modelin tahmin ettiği eğilme dayanımı değerleri ile bağımsız değişkenler arasındaki duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 21'de ise her bağımsız değişkenin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi yüzde olarak verilmektedir. Tablo 21 verileri incelendiğinde kürleme süresinin eğilme dayanımını en çok etkileyen parametre olduğu tespit edilmiştir. İkinci sırada NaOH molaritesi yer almakta olup, alkali derişiminin mekanik performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Na_2SiO_3/NaOH oranı (6,74%) ve %CaO katkısının (4,96%) diğer parametrelere göre mekanik dayanım üzerinde daha az etkili olduğu görülmektedir. Ancak bu iki parametrenin küçük katkılarının da malzeme performansında etkili olacağı göz ardı edilmemelidir.

Tablo 21. Bağımsız değişkenlerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi

Parametre	**Eğilme Dayanımına Etki (%)**
Kürleme süresi (gün)	62,75
NaOH molaritesi	25,55
Na_2SiO_3/NaOH oranı	6,74
%CaO katkısı	4,96

Şekil 97'de geopolimer harç eğilme dayanımı duyarlılık analizi grafiği görülmektedir.



Şekil 97. Duyarlılık analizi grafiği

Aşağıda bağımsız değişken parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri detaylı şekilde açıklanmaktadır:

Kürleme süresi: Kürleme süresinin geopolimerizasyonun ilerleme derecesini belirleyen en kritik parametre olduğu görülmektedir. 7 günden 28 güne uzatılan kürleme süresinin eğilme dayanımında belirgin artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Bu artış, Si–O–Al bağlarının daha yoğun bir ağ yapısı oluşturması ve mikro yapısal boşlukların azalması ile açıklanmaktadır(Nath ve Sarker, 2015; Bernal vd,, 2011; Ravikumar ve Neithalath, 2012). Özellikle 7 günlük eğilme dayanımları ile 14 günlük eğilme dayanımları arasında bu fark oldukça belirgindir.

NaOH molaritesi: Çalışma kapsamında NaOH 5-10-15 M olmak üzere 3 farklı molarite incelenmiştir. NaOH molaritesi çözünme kinetiğini doğrudan etkileyerek geopolimerizasyon hızını etkilemektedir. Model sonuçlarına göre, dayanım 10–12 M civarında maksimuma ulaşmakta, 15 M'de ise mikroyapıda fazla Na^+ iyonu birikimi nedeniyle sınırlı bir düşüş gözlenmektedir (Xu ve Van Deventer, 2000; Temuujin vd., 2009).

$Na_2SiO_3/NaOH$ oranı: Na_2SiO_3/NaOH oranı sistemdeki Si/Al oranını etkileyerek bağlayıcı jel fazlarının (N-A-S-H ve C-A-S-H) oluşumunu etkilemektedir. YSA tahminleri, 2,0–2,2 civarında optimum eğilme dayanımı sağlandığını göstermektedir. Optimum oranların altında sistemdeki Si yetersiz kaldığı için bağ oluşumu sınırlı kalmakta, yüksek oranlarda ise viskozite artışı nedeniyle karışım

homojenliğini kaybetmektedir (Provis ve Van Deventer, 2009; Davidovits, 2015; Adenisa ve Awoyera, 2019).

%CaO içeriğinin etkisi: Kalsine mermer atığı ikamesinin dolayısı ile CaO ikamesinin geopolimer harç dayanımı üzerinde etkisi yapay sinir ağı modeli ile analiz edilmiştir. Kalsiyum oksitin özellikle erken yaş dayanımında belirleyici bir katkı sağladığı görülmüştür. YSA modeli CaO ikamesinin optimum değerini %10 olarak belirlemiştir. %CaO ikamesinin %20 ye çıkması ile birlikte mikroyapısal düzensizlikler ve faz oluşumlarında düşüş nedeniyle eğilme dayanımlarında hafif düşüş gözlemlenmiştir. CaO varlığı, C–A–S–H fazlarının oluşumunu teşvik ederek matrisin kompaktlığını artırmakta, ancak aşırı CaO seviyeleri jeopolimerik bağ sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Bernal vd., 2011; Lee ve Van Deventer, 2002; Ismail vd., 2013).

YSA modeli analizi sonucu, parametrelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi şu şekildedir:

Kürleme süresi > NaOH molaritesi > Na_2SiO_3/NaOH oranı > %CaO içeriği

Analiz sonucu geopolimer sistemler üzerinde reaksiyon süresi ve alkali aktivatörlerin eğilme dayanımı üzerinde belirleyici parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Model tahminleri, deneysel verilerle yüksek uyum sağlamış ve çok değişkenli malzeme sistemlerinde neden-sonuç ilişkilerinin etkin biçimde analiz edilebileceğini ortaya koymuştur**.**

3.2.2. Literatür Karşılaştırması ve Genel Değerlendirme

Çalışma kapsamında geliştirilen YSA modeli geopolimer harçların eğilme dayanımı tahmininde yüksek doğruluk ve güvenilirlik göstermektedir. Tüm veri seti için elde edilen R^2 = 0,9747 değeri, modelin hedef değişkenin varyansının yaklaşık %97'sini doğru şekilde açıklayabildiğini ortaya koymaktadır. Buna ek olarak RMSE = 0,0289**,** MAE = 0,0206 ve MAPE = %2,51 gibi düşük hata metrikleri, modelin tahmin kabiliyetinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Eğitim, doğrulama ve test setlerine ait sonuçlar da modelin genelleme başarısını desteklemektedir. Eğitim setinde R^2 = 0,9909 ile model verileri neredeyse tam olarak öğrenmiştir. Doğrulama setinde R^2 = 0,9677, test setinde ise R^2 = 0,8916 elde edilmiştir. Bu durum, modelin doğrulama ve test aşamalarında da tutarlı

performans sergilediğini, yani aşırı uyum (overfitting) eğiliminin kontrol altında tutulduğunu göstermektedir. Özellikle erken durdurma (early stopping) algoritmasının ve optimizasyon sürecinde μ (mu) değerinin düşürülmesinin, ağın kararlılığını artırarak genelleme kabiliyetine önemli katkı sağladığı düşünülmektedir.

Modelin tahmin başarısı performansı yalnızca ağ yapısından değil aynı zamanda veri setinin oluşturulma sistematiğinden ve parametrelerin optimum düzeyde ayarlanmasından kaynaklanmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında, geliştirilen modelin performansı oldukça rekabetçidir. Sarıdemir (2009) metakaolin içeren harçların basınç dayanımı tahmininde $R^2 = 0,9887$, Khan ve arkadaşları (2020) uçucu kül bazlı geopolimer betonlarda R = 0,93, Bai ve arkadaşları (2023) uçucu kül- cüruf geopolimerinde R = 0,9565, Behnood ve Golafshani (2018) ise silika füme katkılı betonlarda R = 0,96 elde etmiştir. Bu çalışmada ulaşılan R = 0,9872 değeri, literatürde bildirilen en iyi sonuçlarla eşdeğer veya daha üstün bir performansa işaret etmektedir. Aynı zamanda Tablo 22'de literatürdeki bazı çalışmalarda elde edilen analiz değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Tablo 22 incelendiğinde çalışma kapsamında geliştirilen YSA modelinin hata metrikleri bakımından literatürdeki çalışmalara kıyasla daha düşük RMSE ve MAE değerleri elde ettiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda korelasyon katsayısı açısından da mevcut en iyi performanslarla karşılaştırılabilir veya daha yüksek sonucu verdiği görülmektedir.

Tablo 22. YSA literatür örnekleri

Çalışma	Malzeme Türü	Model Türü	R	RMSE	MAE
Sarıdemir (2009)	Metakaolin harç	YSA	0,9887	–	–
Khan vd. , (2021)	Geopolimer beton	YSA	0,9314	0,05	0,04
Bai vd. , (2023)	Uçucu kül-cüruf Geopolimer	YSA	0,9565	-	1.435
Behnood ve Golafshani (2018)	Silika füme betonu	Hibrid YSA–GWO	0,96	0,039	0,031
Bu çalışma (2025)	Geopolimer harç	YSA	0,9872	0,0289	0,0206

4. SONUÇLAR

4.1. Deneysel çalışmalar

Ağırlık kaybı, kür süresi uzadıkça belirgin şekilde azalmıştır. 7 günlük numunelerde yüksek olan kayıplar 28. günde düşmüş ve bağlayıcı jel yapısının zamanla kararlı hâle geldiği görülmüştür.

NaOH molaritesinin artışı, (5M → 15M) çözünebilir alüminosilikat miktarını artırarak hem ağırlık kaybını azaltmış hem de daha kompakt bir matris oluşumunu sağlamıştır.

Na_2SiO_3/NaOH oranı, optimum değer olan 1.5–2.0 aralığında fiziksel özellikleri iyileştirmiş; 2.5 oranında karışım viskozitesinin artması nedeniyle bazı serilerde olumsuzluklar görülmüştür.

Mermer tozu ikamesi, düşük reaktivitesi nedeniyle bazı fiziksel parametrelerde düşüşe yol açsa da Ca içeriği sayesinde jel yapısını kısmen stabilize etmiş, özellikle %10 ikame oranında optimum sonuçlar elde edilmiştir.

Relatif yoğunluk, kür süresi ve molarite ile artmış; mermer ikamesi ve yüksek Na_2SiO_3/NaOH oranları yoğunluğu düşürmüştür.

Su emme oranı, yüksek mermer tozu ikamesi ve gözenekli yapı nedeniyle artmış; artan molarite ve kür süresi ile düşmüştür. En düşük su emme VKW-15M:1.5 serisinde görülmüştür.

Porozite, molaritenin ve aktivatör oranının artışıyla genel olarak azalmış; mermer tozu yüksek molaritede gözenekleri artırmıştır. Kür süresi poroziteyi düzenli biçimde azaltmıştır.

NaOH molaritesi, mekanik dayanım üzerinde en etkili parametre olmuştur. Yüksek molaritelerde daha yoğun ve güçlü bir jel ağı oluşmuş, dayanım belirgin biçimde yükselmiştir.

Na_2SiO_3/NaOH oranı, mekanik dayanımı optimize eden ikinci kritik parametredir. Alkali aktivatör oranı 2 olan serilerde eğilme ve basınç dayanımında en yüksek değerlere ulaşılmıştır. 2.5 oranı, bazı karışımlarda viskozite artışı nedeniyle dayanımı düşürmüştür.

Mermer atığı (CaO içeriği), seriler arasında farklı etkiler göstermiştir.10C serilerinde Ca katkısı dayanımı güçlendirmiştir. Ancak 20C serilerinde yüksek Ca, jel

yapısını bozarak dayanımda düşüşe yol açmıştır. Bunun nedeni, fazla Ca'nın kristal fazları artırarak amorf jel gelişimini sınırlamasıdır.

En yüksek basınç dayanımı 10C–15M:2.5 serisinde (7.426 MPa**)** elde edilmiştir.

FT-IR sonuçları, düşük molariteli VKW numunelerinde daha uzun ve homojen Al–O–Si zincirlerinin oluştuğunu, yüksek Ca içeren serilerde ise heterojen ve kısa zincirli jel yapılarının geliştiğini göstermiştir.

XRD analizleri; kalsinasyon sonrası mermer atığının CaO hâkim fazına dönüştüğünü, vermikülitin amorf karakter kazanarak jel oluşumuna katkı sunduğunu, vollastonitin β-$CaSiO_3$ fazına dönüşerek dayanımı desteklediğini ortaya koymuştur.

Düşük Ca içeren VKW serilerinde amorf N-A-S-H ve C-(A)-S-H jel pikleri güçlüdür; yüksek Ca içeren serilerde ise kristal fazların baskın olduğu ve jel yapısının zayıfladığı görülmüştür.

20C-15M:2.5 numunesinde tespit edilen tobermorit benzeri faz, dayanımı artırmış ancak amorf jel piklerini azaltmıştır.

SEM/EDS analizleri, VKW-5M:1.5 numunesinin homojen, kompakt ve iyi bağlanmış bir yapıya, 20C-15M:2.5 numunesinin heterojen, yüksek Ca/Si oranına bağlı kristal yoğunluğu yüksek bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Ca/Si oranı arttıkça amorf jel yapısı bozulmuş, kristal fazlar artmıştır.

4.2. Yapay Sinir Ağı (YSA) Analizi

Geliştirilen YSA modeli, eğilme dayanımını yüksek doğrulukla tahmin etmiştir:

$R^2 = 0.9747$**,**

RMSE = 0.0289**,**

MAE = 0.0206**,**

MAPE = %2.51

Model, 13 epoch'ta Levenberg–Marquardt algoritması ile eğitilmiş; erken durdurma sayesinde aşırı öğrenme engellenmiştir.

Tekrarlanan denemelerde model, 9. denemede en başarılı performansı göstermiştir.

Hata analizi, modelin genelde güvenilir olduğunu ancak uç değerlerde düşük de olsa sapmalar gösterdiğini ortaya koymuştur.

YSA sonuçları, deneysel eğilme dayanımı ve mikro yapı analizleri ile tamamen uyumludur.

4.3. Gelecek Çalışmalar İçin Tavsiye ve Öneriler

NaOH ve Na_2SiO_3/NaOH Optimizasyonu: Farklı molarite ve aktivatör oranlarının mekanik performans ve jel yapısı üzerindeki etkilerinin sistematik incelenmesi.

Ca/Mermer Atığı Kullanımı: Mermer veya diğer Ca kaynaklı katkıların miktar ve tanecik boyutunun mekanik ve gözenek özelliklerine etkisinin araştırılması.

Alternatif Katkı Malzemeleri: Uçucu kül, metakaolin veya nano-SiO_2 gibi katkıların kullanımı ve etkilerinin incelenmesi.

Mikro Yapı ve Faz Analizi: SEM, XRD ve FT-IR ile jel homojenliği, gözenek ve kristal faz dağılımının detaylı incelenmesi.

Kür Koşulları ve Uzun Dönem Dayanım: Farklı sıcaklık ve nem koşullarının, karbonasyonun ve uzun süreli etkilerin test edilmesi.

YSA ve Modelleme Geliştirmesi: Eğilme ve basınç dayanımı, porozite gibi farklı performans parametrelerini tahmin edecek çok değişkenli yapay zeka modellerinin geliştirilmesi.

KAYNAKÇA

Aboulayt, A., Riahi, M., Ouazzani Touhami, M., Hannache, H., Gomina, M., & Moussa, R. (2017). Properties of metakaolin based geopolymer incorporating calcium carbonate. *Advanced Powder Technology, 28*(9), 2393–2401. https://doi.org/10.1016/J.APT.2017.06.022

Adak, D., Sarkar, M., & Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified flyash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials, 135*, 430–439.

Adesina, A., & Awoyera, P. O. (2019). Structure and properties of alkali activated materials synthesized from fly ash and slag: A review. *Materials Today: Proceedings, 17*, 1368–1373.

Akbulut, H., & Gürer, C. (2006). Atık mermerlerin asfalt kaplamalarda agrega olarak değerlendirilmesi. *İMO Teknik Dergi* (Yazı 261).

Akçaözoğlu, K., & Güldür, Ş. E. (2017). Mikronize kalsit ve uçucu kül katkısının beton özelliklerine etkisinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*.

Alehyen, S., El Achouri, M., & Taibi, M. (2017). Characterization, microstructure and properties of fly ash-based geopolymer. *Journal of Materials and Environmental Sciences, 8*(5), 1783–1796.

Al-Swaidani, A. M., & Khwies, W. T. (2018). Applicability of artificial neural networks to predict mechanical and permeability properties of volcanic scoria-based concrete. *Advances in Civil Engineering*. https://doi.org/10.1155/2018/5207962

Alshaaer, M., Alharbi, B., Alqahtani, O., Alotaibi, M. S., Alzayed, A., & Al-Kafawein, J. (2025). Synthesis and characterization of metakaolin–wollastonite geopolymer foams for removal of heavy metal ions from water. *Materials, 18*(3), 678. https://doi.org/10.3390/ma18030678

Alshaaer, M., Alshaaer, M. A., Alshaaer, M. A., Alshaaer, M. A., & Alshaaer, M. A. (2024). Synthesis and characterization of novel hybrid wollastonite/metakaolin-based geopolymers. *Materials, 17*(17), 4338. https://doi.org/10.3390/ma17174338

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

Alvarez- Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez, S., Vazquez, E., & Barra, M. (2008). Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer

matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials, 154*, 175–183.

Arsoy, Z., Çiftçi, H., Ersoy, B., Uygunoğlu, T., Arslan, B., (2019), Afyonkarahisar Bölgesi Mermer Parça Atıklarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilebilirliğinin Araştırılması, *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, (503-516), 10.31202/ecjse.554339

Aquilano, D., Otalora, F., Pastero, L., & Garcia-Ruiz, J. M. (2016). Three study cases of growth morphology in minerals: Halite, calcite and gypsum. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 227–251. https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012

Ay, C. , 2021, Atık Cam Tozu Tabanlı Geopolimer Harçlarda Kalsiyum Alüminat Çimentosu Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. Nevşehir, Türkiye; Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Aydın, E. G., & Yıldırım, H. (2012). The effect of mineral admixtures and micronized calcite on alkali silica reaction expansions in the usage of aggregates from different origin. *International Journal of Physical Sciences, 7*(45), 5996–6011.

Bai, M. , Zhang, Z. , Cao, K. , Li, H. , He, C. , (2023), Prediction of Compressive Strength of Fly Ash-Slag Based Geopolymer Paste Based on Multi-Optimized Artificial Neural Network, Materials, 16, 1090. https://doi.org/10.3390/ma16031090.

Barış, K.E. , (2023), Jeopolimer Bağlayıcı Üretiminde Atık Mermer Tozu Kullanım Olanaklarının Değerlendirilmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 28 (3), 10.17482/uumfd.1299353.

Bartık, C. (2024). *Lifli geopolimer betonların mekanik özelliklerinin makine öğrenmesi kullanılarak analizi* [Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı].

Basu, A. (1991). Thermal decomposition and stability of vermiculite. *Clays and Clay Minerals*, *39*(5), 471–477.

Behnood, A., & Golafshani, E. M. (2018). Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolf optimizer. *Construction and Building Materials, 171*, 581–590.

Bekem, İ.K., (2020). Kalsitin çimento ikame malzemesi olarak kullanımının basınç dayanımına etkisi. *Journal of Investigations on Engineering & Technology, 3*(1), 10–16.

Benali, R., Notton, G., Fouilloy, A., Voyant, C., & Dizene, R. (2019). Solar radiation forecasting using artificial neural network and random forest methods. *Renewable Energy, 132*, 871–884.

Benmohamed, M. , Alouani, R. , Jmayai, A. , Amara, A.B.H. , Rhaiem, H.B., (2016), Morphological Analysis of White Cement Clinker Minerals: Discussion on the Crystallization-Related Defects, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Analytical Chemistry*, http://dx.doi.org/10.1155/2016/1259094.

Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., & Mejía de Gutierrez, R. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites, 33*(1), 46–54.

Bishop, C. M. (2006). Pattern recognition and machine learning. *Springer*.

Bong, S. H., Nematollahi, B., Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2019). Properties of one-part geopolymer incorporating wollastonite as partial replacement of geopolymer precursor or sand. *Materials Letters, 263*. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127236

Bong, S. H., Nematollahi, B., Xia, M., Ghaffar, S. H., Pan, J., & Dai, J. G. (2022). Properties of additively manufactured geopolymer incorporating mineral wollastonite microfibers. *Construction and Building Materials*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127282

Boyraz, T. (2008). *An investigation on physical and electrical properties of CaO/MgO-stabilized zirconia ceramics formed with different methods*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bui, D. T., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B., & Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: A comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides, 13*(2), 361–378.

Bülbül, M. A. (2024). *Beton basınç dayanımı tahmini için özellik mühendisliği ve makine öğrenimi tabanlı hibrit bir yaklaşım* [Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi].

Ceylan H., Saraç S., Özkahraman T.(2001) "Mermer Toz Atıklarının Derz Dolgu Malzemesi (Fuga) Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem 2001) Bildiriler Kitabı*, Afyon

Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development, 7*(3), 1247–1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

Chen, J. J., Thomas, J. J., Taylor, H. F. W., & Jennings, H. M. (2004). Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research, 34*(9), 1499–1519. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.034

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system *Conference: the 22nd ACM SIGKDD International Conference*, 10.1145/2939672.2939785

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.

Chowdhury, M. S., Rahaman, M. N., Sheikh, M. S., Sayeid, M. A., Mahmud, K. H., & Hafsa, B. (2024). GIS-based landslide susceptibility mapping using logistic regression, random forest and decision and regression tree models in Chattogram District, Bangladesh. *Heliyon, 10*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23424

Ciullo, P.A., 1996. Industrial Minerals and Their Uses, *Noyes Publications*. New Jersey, 607 p.

Corro-Escorcia, I. A., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Barrientos-Hernández, F. R., Cruz-Hernández, M., Toro, N., Gálvez, E., Gutiérrez-Amador, M. P., & Salinas-Rodríguez, E. (2025). Synthesis of tobermorite 11 Å during the formation of autoclaved aerated concrete with the addition of diatomite. *Results in Materials, 26*, 100725. https://doi.org/10.1016/j.rinma.2025.100725

Cwirzen, A., Provis, J. L., Penttala, V., & Habermehl-Cwirzen, K. (2014). The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials, 66*, 53–62. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.022

Çavdar, Ö. , Temizer, H. , (2023), Endüstriyel Atık Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, *3rd International Conference on Innovative Academic Studies*, 26-28.

Çiftçi, E., & Erdağ, İ. (2015). *Micronized Calcite Potential, Production, and Principal Characteristics of Nigde (Turkey)*. 99–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13948-7_11

Dai, C., Chao, S., & Song, C. (2023). Günlük verilerinin petrol ve su tabakasının tanımlamasında rastgele orman yönteminin uygulanması: Liaohe çöküntüsünün bir örnek çalışması. *Yer Bilimleri Araştırma Dergisi, 27*, 69–75.

Davidovits, J. (1994). Geopolymers: Man-made rock geosynthetics and the resulting development of very early high strength cement.

Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Institut Géopolymère.

Davidovits, J. (2015). *Geopolymer chemistry and applications* (4th ed.). Geopolymer Institute.

Delikurt, B. C., & Sevim, U. K. (2015). Su gözü uçucu külünün betonun mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4*(1), 47–58.

Demirbağ, H. (2021). *Vollastonit ve pirinç kabuğu külü içeren uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimer kompozitlerin taze, reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi].

Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2016). Reactivity of volcanic ash in alkaline medium, microstructural and strength characteristics of resulting geopolymers under different synthesis conditions. *Journal of Materials Science, 51*(18), 10301–10317. https://doi.org/10.1007/s10853-016-0257-1

Doğan, O. (2016). *Yapay sinir ağları*.

Duan, P., Yan, C., & Luo, W. (2016). Technical note: A novel waterproof, fast setting and high early strength repair material derived from metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials, 124*, 69–73. 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.058.

Duman, O., & Tunç, S. (2008). Electrokinetic properties of vermiculite and expanded vermiculite: effects of pH, clay concentration and mono and multivalent electrolytes. *Separation Science and Technology*, 0149, 3755-3776. https://doi.org/10.1080/01496390802219109

Durak, U., Karahan, O., Uzal, B., İlkentapar, S., & Atiş, C. D. (2021). Influence of nano SiO2 and nano $CaCO_3$ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer. *Structural Concrete, 22*(S1), E352–E367.

Duxon, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science, 42*, 2917–2933. 10.1007/s10853-006-0637-z.

Ekmen, Ş. (2021). *Uçucu kül esaslı hafif geopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin incelenmesi, modellenmesi ve optimizasyonu* [Doktora Tezi, Harran Üniversitesi].

El-Didamony, H., Amer, A. A., & Ela-Ziz, H. A. (2012). Properties and durability of alkali-activated slag pastes immersed in sea water. *Ceramics International, 38*(5), 3773–3780. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.01.024.

Erdoğan, G., 2022, *Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Perlit Ve Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Harçların Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi. Nevşehir, Türkiye; Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Eren, N. A. (2024). ANN kullanarak çelik fiberli geopolimer betonların eğilme dayanımının tahmini. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 489–501. https://doi.org/10.54365/adyumbd.1473171

Ergün, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials, 25*(2), 806–812. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002

Eşidir, K. A. (2025). Makine Öğrenimi Modelleri İle Yetişkin Eğitimi Analizi: Modellerin Karşılaştırmalı Performansı. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, *24*(2), 946-964. https://doi.org/10.17755/esosder.1589887

Fan, M. X., Chen, F. X., Zhang, X. Y., Wang, R. K., & Yu, R. (2023). Effect of Ca/Si ratio on the characteristics of alkali-activated ultra-high performance concrete (A-UHPC): From hydration kinetics to microscopic structure development. *Construction and Building Materials, 394*, 132158. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132158

Fernández Pereira, C., Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., & Vale, J. (2009). Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers. *Fuel, 88*, 1185–1193. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.01.021.

Finocchiaro, C., Barone, G., Mazzoleni, P., Leonelli, C., Gharzouni, A., & Rossignol, S. (2020). FT-IR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (Mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions. *Construction and Building Materials, 262*, 120095. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120095

Friedman, J. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics, 29*(5), 1189–1232.

Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials, 22*(8), 1675–1683. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011.

Gao, B., Li, Y., Jang, S., Son, H., Lee, H., & Bae, C.-J. (2024). Effect of geopolymerization reaction on the flexural strength of kaolin-based systems. *Materials, 17*, 2223. https://doi.org/10.3390/ma17102223

García-Lodeiro, I., Jimenez, A. M. F., Blanco-Varela, M. T., & Palomo, A. (2007). FTIR study of the sol–gel synthesis of cementitious gels: C–S–H and N–A–S–H. *Journal of Sol-Gel Science and Technology, 45*(1), 63–72. 10.1007/s10971-007-1643-6.

Geurts, P., Ernst, D., & Wehenkel, L. (2006). Extremely Randomized Trees. *Machine Learning, 63*(1), 3–42. 10.1007/s10994-006-6226-1.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Granizo, M. L., Alonso, S., Blanco-Varela, M. T., & Palomo, A. (2002). Alkaline activation of metakaolin: Effect of calcium hydroxide in the products of reaction. *Journal of the American Ceramic Society, 85*(1), 225–231. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00070.x

Gutha, S., (2010) Comparative Study of Properties of Different Types of Binder Mixes Modified with Silica Fume. BTech thesis,Civil Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India.

Gültekin, E. (2014). *Metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi].

Güneş, M., 2023, *Farklı Tasarım Ve Kür Parametreleri İle Geliştirilen Tasarlanmış Geopolimer Kompozitlerin Özellikleri Üzerine Sentetik Vollastonit Mikrofiberlerin Etkileri*, Doktora Tezi. Niğde, Türkiye; Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Gür, Y. E., Solak, B., & Toğaçar, M. (2024). Makine öğrenimi teknikleriyle uyku bozukluklarına yönelik derinlemesine analiz ve sınıflandırma. *International Journal of Pure and Applied Sciences, 10*(1), 242–260. https://doi.org/10.29132/ijpas.1475183.

Güzelküçük, S. (2020). *Isı yalıtım kabiliyetine sahip perlit esaslı geopolimer bağlayıcılı harçların geliştirilmesi* [Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi].

Hagan, M. T., & Menhaj, M. B. (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks, 5*(6), 989–993. https://doi.org/10.1109/72.329697

Hagan M. , Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. (2014). *Neural network design* (2nd ed.).

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data mining concepts and techniques*.

Haner, S., & Çuhadaroğlu, D. (2013). Vollastonit: Bir gözden geçirme. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*. 37, 63-82

Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete*.

Harmancı, F., Kalem, M.,(2022) Betonda atık vermikülit kullanımının betonun mineralojik ve kimyasal yapısına olan etkisinin incelenmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3): 848-863, DOI: 10.17714/gumusfenbil.1092800

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). *Springer*.

Haykin, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive foundation*. Prentice Hall.

Heberling, F., Trainor, T. P., Lützenkirchen, J., Eng, P., Denecke, M. A., & Bosbach, D. (2011). Structure and reactivity of the calcite-water interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, *354*(2), 843–857. 10.1016/j.jcis.2010.10.047.

Hemra, K., Kobayashi, T., Aungkavattana, P., & Jiemsirilers, S. (2021). Enhanced mechanical and thermal properties of fly ash-based geopolymer composites by wollastonite reinforcement. *Journal of Metals, Materials and Minerals, 31*(4), 13–25. https://doi.org/10.55713/jmmm.v31i4.1230

Homayoonmehr, R., Ramezanianpour, A.A. , Mirdarsoltany, M. , Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: a review, *Journal of Building Engineering***,** *44* (2021) 103011. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103011

Hoy, M., Thandar, S., Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Suddeepong, A., Buritatum, A., Yaowarat, T., Tesanasin, T., Horpibulsuk, J., & Julvorawong, M. (2025). Strength and microstructural evaluation of sustainable geopolymer mortars using calcium carbonate sludge and fly ash as precursors. *Case Studies in Construction Materials, 23*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05189

Hu, J., Zhao, T., Jia, J., Guo, J., Yang, W., Dong, S., Li, Z., & Gao, T. (2024). Impact of nano-SiO2 on the compressive strength of geopolymer-solidified expansive soil. *Buildings*, *14*(10), 3123. https://doi.org/10.3390/buildings14103123

Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M. W., Arrifın, M. A. M., & Hussein, A. A. (2016). The effect of sodium hydroxide molarity and other parameters on water absorption of geopolymer mortars. *Indian Journal of Science and Technology*, *9*(48). https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i48/109629

ICDD PDF Card 05-0586. (t.y.).

ICDD PDF# 33-0306

ICDD PDF# 37-1497. (t.y.).

ICDD PDF Card 41-1428

ICDD PDF Card 43-1460. (t.y.).

ICDD PDF# 47-1743. (t.y.).

ICL. (2012). *Imperial College London*. http://www3.imperial.ac.uk/

Irmak, S., (2024), *YFC/UK Bazlı Metakaolin Ve Silis Dumanı İçeren Kendiliğinden Yerleşen Geopolimer Kompozitlerde Farklı Çözelti Oranlarının Mekanik Ve Durabilite Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi. Erzurum, Türkiye; Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüs.

Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. J. (2013). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the

incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites, 45*, 125–135. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006.

Isokoski, K., Poteet, C. A., & Linnartz, H. (2013). Highly resolved infrared spectra of pure CO_2 ice (15–75 K). *Astronomy & Astrophysics, 555*, 85. 10.1051/0004-6361/201321517.

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

Jindal, A., Ransinchung, R. N., & Kumar, P. (2020). Behavioral study of self-compacting concrete with wollastonite microfiber as part replacement of sand for pavement quality concrete (PQC). *International Journal of Transportation Science and Technology*, 170–181. https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.06.002.

Jithendra, C., Dalawai, V. N., & Elavenil, S. (2022). Effects of metakaolin and sodium silicate solution on workability and compressive strength of sustainable geopolymer mortar. *Materials Today: Proceedings, 51*(3), 1580–1584. 10.1016/j.matpr.2021.10.399.

Ju, C., Liu, Y., Jia, M., Yu, K., Yu, Z., & Yang, Y. (2020). Effect of calcium oxide on mechanical properties and microstructure of alkali - activated slag composites at sub - zero temperature. *Journal of Building Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101561

Kamseu, E., Akono, A. T., Rosa, R., Mariani, A., & Leonelli, C. (2022). Valorization of marble powder wastes using rice husk ash to yield enhanced-performance inorganic polymer cements: Phase evolution, microstructure, and micromechanics analyses. *Cleaner Engineering and Technology, 8*, 100461. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100461

Kandil, U., 2021. *Farklı mineral katkı içeren geri kazanılmış agregalı kendiliğinden yerleşen betonların bazı mekanik ve durabilite özellikleri*. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 221s.

Kantarcı, F. (2013). *Elazığ ferrokrom cürufundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi].

Katatchambo, A. Y. (2024). *Cüruf tabanlı geopolimer harçlarda yapay sinir ağı ve regresyon modelleriyle basınç dayanımının tahmin edilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı].

Katatchambo, A. Y., & Bingöl, Ş. (2025). Comparison of regression based functions and ANN models for predicting the compressive strength of geopolymer mortars. *Scientific Reports, 15*, 11652. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96772-3

Kaya, M. (2023). *Geopolimer betonun yangın dayanımının makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak modellenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Iğdır Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı].

Khan, M. A., Zafar, A., Farooq, F., Javed, M. F., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Khan, M. I. (2021). Geopolymer concrete compressive strength via artificial neural network, adaptive neuro fuzzy interface system, and gene expression programming with k-fold cross validation. *Frontiers in Materials, 8*, 621163. https://doi.org/10.3389/fmats.2021.621163

Khatib, J. (1998). Sulphate Resistance of Metakaolin Mortar. *Cement and Concrete Research.*

Khatib, J. M., & Clay, R. M. (2004). Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Research, 34*, 19–29. 10.1016/S0008-8846(03)00188-1.

Khatib, J. M., & Hibbert, J. J. (2005). Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construction and Building Materials, 19*, 460–472. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017.

Kim, B., Lee, S., Chon, C.-M., & Cho, S. (2022). Setting behavior and phase evolution on heat treatment of metakaolin-based geopolymers containing calcium hydroxide. *Materials, 15*(1), 194. https://doi.org/10.3390/ma15010194

Kim, H. S., Lee, S. H., & Moon, H. Y. (2007). Strength properties and durability aspect of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials, 21*, 1229–1237. 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.007.

Kiyan, F. Y. (2024). *Pet şişe atıklarının uçucu kül esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer harçların mekanik ve ısıl özelliklerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi].

Koç, G. (2025). *Metakaolin ve cüruf esaslı mermer tozu atığı ikameli geopolimer harçların mekanik özelliklerinin ve yüksek sıcaklık direncinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi].

Koçyiğit, Ş. (2024). Performance evaluation of geopolymer mortars containing waste ferrochrome slag and fly ash for sustainable green building. *Scientific Reports, 14*, 14606. https://doi.org/10.1038/s41598-024-65552-w

Komnitsas, K., Soultana, A., & Bartzas, G. (2021). Marble waste valorization through alkali activation. *Minerals, 11*, 46. https://doi.org/10.3390/min11010046

Konak, F., Bülbül, M. A., & Türkoğlu, D. (2024). Feature selection and hyperparameters optimization employing a hybrid model based on genetic algorithm and artificial neural network: Forecasting dividend payout ratio. *Computational Economics, 63*, 1673–1693. https://doi.org/10.1007/s10614-023-10530-z

Kostuch, J.A., Walters, G.V. and Jones, T.R. (1993) High Performance Concrete Incorporating Métakaolin—A Review. Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, 7-9 September 1993, 1799-1811Krivenko, P. V. (1997). Durability of geopolymers in construction applications. *Materials Science Journal, 20*(4), 215–225.

Kumar, J.B., Ramujee, K., (2017) ‘‘Mechanical & Durability Characteristics of Wollastonite Based Cement Concrete’’, *Journal on Civil Engineering*, 7(1), 1-7. https://doi.org/10.26634/jce.7.1.10363

Kurniadi, D., Abdurachman, E., Warnars, H. L. H. S., & Suparta, W. (2018). 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

Kurnaz, K. (2014). *Yapay sinir ağları ile makine öğrenmesi uygulaması* [Lisans Bitirme Çalışması].

Kurt, Z. (2023). *Farklı lif içeriğine sahip yüksek fırın cürufu, obsidyen ve metakaolin tabanlı geopolimer harçların ve betonların incelenmesi* [Doktora Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı].

Lahchich, A., , (2024), Heat treatment at 1000 °C under reducing atmosphere of vermiculite: Phase changes and mass loss. *Minerals, 14*(3), 232. https://doi.org/10.3390/min14030232

Lecomte, I., Henrist, C., Liégeois, M., Maseri, F., Rulmont, A., & Cloots, R. (2006). (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement. *Journal of the European Ceramic Society, 26*(16), 3789–3797. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.021

Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. S. J. (2002). Structural reorganization of class F fly ash in alkaline silicate solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 211*(1), 49–66. https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00237-6.

Li, S., Huang, Y., Cui, Bai, R. , Li, H. , Jiao, L. , (2025) , Effect of calcium content on geopolymer consolidation of saline soils in the seasonally frozen zone. *Sci Rep 15*, 16168. https://doi.org/10.1038/s41598-025-00307-9

Li, S., & Ji, D. (2025). Tuning the Carbonation Resistance of Metakaolin–Fly Ash-Based Geopolymers: The Dual Role of Reactive MgO in Microstructure and Degradation Mechanisms. *Journal of Composites Science, 9*(10), 549. https://doi.org/10.3390/jcs9100549

Liu, J. , Xing, F. , Dong, B. , Ma, H. , Pan, D. , 2014, Study on Surface Permeability of Concrete under Immersion, *Materials, 7*(2):876-886, 10.3390/ma7020876.

Liu, J. , Fang, Y. , Kayal, O. , (2016), Study on the Disposition of Water in Fly Ash-Based Geopolymers Using ATR–IR, *Conference: International Conference on the Durability of Concrete Structures*, 10.5703/1288284316126.

Lodeiro, I. G. , Palomo, A. , (2011), Jimenez, A.F. , Macphee, D. , Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na2O–CaO–Al2O3–SiO2–H2O, *Cement and Concrete Research, 41*(9):923–931, 10.1016/j.cemconres.2011.05.006.

Lv, Y., Qiao, J., Han, W., Pan, B., Jin, X., & Peng, H. (2023). Modification effect of Ca(OH)2 on the carbonation resistance of fly ash-metakaolin-based geopolymer. *Materials, 16*(6), 2305. https://doi.org/10.3390/ma16062305

Ma, B. , Mei, J. Tan, H. , Li, H. , Liu, X. , Jiang, W. , Zhang, T. , (2019), Effect of nano silica on hydration and microstructure characteristics of cement high volume fly ash system under steam curing, , *Cementitious Materials. 34* (3) 604–613.

Madani, H. Ramezanianpour, A.A., Shahbazinia, M., Ahmadi, E., (2020), Geopolymer bricks made from less active waste materials, Construction and Building *Materials*, 247 (2020), 118441. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118441

Malhotra, V.M., & Mehta, P.K. (1996). Pozzolanic and Cementitious Materials (1st ed.). *CRC Press*. https://doi.org/10.1201/9781482296761

Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2002). High-performance, high-volume fly ash concrete, *Indian Concrete Journal* ,78(11):13-21.

Maltarollo, V. G., Honório, K. M., & Da Silva, A. B. F. (2013). Applications of Artificial Neural Networks in Chemical Problems. *London: Intechopen*. http://dx.doi.org/10.5772/51275.

Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research, 37*(4), 551–558. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2006.10.013

Mathur, R., Mısra, A. K., & Goel, P. (2007). Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete. *Journal of Scientific & Industrial Research, 66,* 1029–1034.

Metin, N., Karadağ, K., & Terzioğlu, M. K. (2020). MLP/RBF Ağ Mimarileriyle Hibrit MGARCH-ANN Model Performans Karşılaştırması: Petrol fiyat oynaklığı. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 78–93.

Mobili, A., Belli, A., Giosuè, C., Bellezze, T., & Tittarelli, F. (2016). Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. *Cement and Concrete Research, 88,* 198–210. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.07.004

Monica, A., & Mejia, R. (2015). Synthesis of ternary geopolymers based on metakaolin, boiler slga and rice husk ash. *DYNA, 82*, 194. https://doi.org/10.15446/dyna.v82n194.46352

Myers, R. J., Bernal, S. A., San Nicolas, R., & Provis, J. L. (2013). Generalized structural description of calcium–sodium aluminosilicate hydrate gels: The cross-linked substituted tobermorite model. *Langmuir, 29*(17), 5294–5306. https://doi.org/10.1021/la4000473

Nabiyev, R. R. (2012). *Yapay zekâya genel bir bakış*.

Nagajothi, S., & Elavenil, S. (2020). Influence of aluminosilicate for the prediction of mechanical properties of geopolymer concrete—artificial neural network. *SILICON, 12*, 1011–1021. https://doi.org/10.1007/s12633-019-00203-8

Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials, 130*, 22–31. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034.

Naveenkumar, K., Suriya, P. A., Divahar, R., Sangeetha, S. P., & Jayakumar, M. (2021). Experimental investigation flexural behavior of reinforced concrete beam with partial replacement of vermiculite. *Materials Today: Proceedings, 46*(12), 5885–5888. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.743.

Nawar, A., Ghaedi, H., Ali, M., Zhao, M., Iqbal, N., & Khan, R. (2019). Recycling waste-derived marble powder for CO_2 capture. *Process Safety and Environmental Protection, 131*, 214–225. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.005

Nenadović, S., Petrović, R., Marković, D., & Ilić, J. (2022). Structural, mechanical and chemical properties of low carbon content geopolymers. *Sustainability, 14*(9), 4885. https://doi.org/10.3390/su14094885

NYCO. (2012). *NYCO*. http://nycominerals.com/

Ohno M. ve Li V. (2014), "A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites", *Construction and Building Materials, 57*, 163-168. 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.005

Okucu, A. (1992). *Hafif inşaat malzemeleri (Anorganik)* [Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi]. Yüksek Öğretim Kurumu Dökümantasyon Merkezi.

Önen, U. (2013). *Alüminyum titanat/spinel seramik kompozitlerin üretilmesi ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

Önen, U., & Boyraz, T. (2024). Correlation between bending strength and porosity in vermiculite added ceramic bodies. *Ceramic Processing Research*. 25(4), 624-632. 10.36410/jcpr.2024.25.4.624.

Önen, U., Ercenk, E. , Yılmaz, Ş. , . (2022). An investigation about crystallization properties of vermiculite based machinable glass-ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 276, https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125369

Özdil, Ö., 2025, *Geopolimer Malzeme Üretiminde Mikronize Vermikülit Atığının Kullanımının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi. Mersin, Türkiye; Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Öztemel, E. (2003). *Yapay sinir ağları*. Papatya.

Öztürk, K., & Şahin, M. E. (2018). Yapay sinir ağları ve yapay zekâ'ya genel bir bakış. *Takvim-i Vekayi*.

Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., & Fernández-Jiménez, A. (2011). A review on alkaline activation: New analytical perspectives. *Materiales de Construcción, 61*(301), 81–97. 10.3989/mc.

Panias, D., Giannopoulou, I. P., & Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 301*, 246–254.

Parlak, M. S., & Kayri, M. (2022). Öğretmenlerin E-Öğrenme Hazırbulunuşluk Düzeylerini Etkileyen Faktörlerin Rastgele Orman Algoritması Yöntemi İle İncelenmesi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 19*(3), 670–696.

Pekel, E. (2020). Estimation of soil moisture using decision tree regression. *Theoretical and Applied Climatology, 139*(3), 1111–1119. https://doi.org/10.1007/s00704-019-03048-8

Petersen, Rasmus R., Martin B. Olesen, Jakob König, and Yuanzheng Yue. 2023. Expansion and shrinkage of lightweight vermiculite material at high temperatures. *Ceramics International 49*: 23605–23611. doi:10.1016/j.ceramint.2023.04.195.

Potter, M. (1991). Vermiculite. *American Ceramic Society Bulletin, 70*(5), 887–888.

Pouhet, R. , Cyr, M. , Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer, (2016), *Cement and Concrete Research, 88*, 227-235. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.008.

Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research, 44*, 299–327. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art*. Springer.

Qian, J., & Song, M. (2015). Study on influence of limestone powder on the fresh and hardened properties of early age metakaolin based geopolymer. *RILEM Bookseries, 10,* 253–259. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_31

Qu, X. , Zhao, Z. , Zhao, X. , (2018), Microstructure and characterization of aluminumincorporated calcium silicate hydrates (C–S–H) under hydrothermal conditions, *Royal Society Chemistry Advances, ,8*,28198–28208, 10.1039/c8ra04423f.

Ramli, M., Rossani, R. B., Nadia, Y., Darmawan, T. B., Febriani, Jabar, S., & Ismail, Y. S. (t.y.), (2019), Nanoparticle fabrication of calcium oxide (CaO) mediated by the extract of red dragon fruit peels (Hylocereus Polyrhizus) and its application as inorganic–anti-microorganism materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/509/1/012090

Ransınchung, G. D., & Kumar, B. (2009). Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica. *Construction and Building Materials, 23*, 1168–1177. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.06.011.

Ransınchung, G. D., & Kumar, B. (2010). Investigations on pastes and mortars of ordinary Portland cement admixed with wollastonite and microsilica. *Journal of Materials in Civil Engineering, 22*(4), 305–313.

Rashad, A. M. (2022). Effect of limestone powder on the properties of alkali-activated materials – A critical overview. *Construction and Building Materials, 356*, 129188. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129188

Rashad, A. M., Essa, G. M. F., Mokhtar, M. M., & Mohamed, R. A. E. (2025). Valorization of calcined Egyptian marble waste as a reactive CaO additive for fortifying alkali-activated slag cement. *Journal of Engineering and Applied Science, 72*, 167. https://doi.org/10.1186/s44147-025-00754-1

Rattanasak U. ve Chindaprasirt P. (2009), "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer", *Minerals Engineering*, *22*, 1073-1078. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022

Ravikumar, D., & Neithalath, N. (2012). Effects of activator characteristics on the reaction product formation in slag binders activated using alkali silicate powders. *Cement and Concrete Composites, 34*(7), 809–818. 10.1016/j.cemconcomp.2012.03.006.

Rehman, F., Khokhar, S. A., & Khushnood, R. A. (2022). ANN based predictive mimicker for mechanical and rheological properties of eco-friendly

geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials, 17*, e01536. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01536

Rehman, F., Li, H., Khokhar, S. A., Malik, U. J., Hamza, A., & Song, S. (2025). Development of an artificial neural network (ANN) based model for tailoring the fracture response of eco-friendly engineered geopolymer composites (EGC). *Next Materials*. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100812

Rufo, D. D., Taye, G. D., Ibenthal, A., & Negera, W. G. (2021). Diagnosis of diabetes mellitus using gradient boosting machine (LightGBM). *Diagnostics, 11*(9), 1714. https://doi.org/10.3390/diagnostics11091714

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

Sarıdemir, M. (2009). Prediction of compressive strength of concretes containing metakaolin and silica fume by artificial neural networks. *Adv. Eng. Softw., 40*, 350-355. 10.1016/j.advengsoft.2008.12.008.

Subaşi, S., İşbilir, B., Ercan, İ., (2011) Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi. *Politeknik Dergisi, 14* (2): 141–148.

Şahin, N. (1978). *Türkiye kalsit olanakları ve kalsitin endüstriyel hammadde olarak hazırlanması* [Lisans Bitirme Çalışması, Hacettepe Üniversitesi, Ankara].

Shalev-Shwartz, S., & Ben-David, S. (2014). *Understanding machine learning: From theory to algorithms*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107298019.

Shamsah, M., Kalfat, R., & Subramaniam, K. V. L. (2025). Impact of low NaOH molarities on mechanical and durability properties of ambient and oven-cured fly ash geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering, 105*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112491

Shamsudin, R., Azam, F.A.A., Abdul Hamid, M.A. , Ismail, H. , (2017). Bioactivity and cell compatibility of *β*-wollastonite derived from hydrothermal synthesis. *Materials*. *10*(10), 1188, https://doi.org/10.3390/ma10101188.

Siddique, R., & Kalus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science, 43*, 392–400.

Simão, L., Hotza, D., Ribeiro, M. J., Novais, R. M., Montedo, O. R. K., & Raupp-Pereira, F. (2020). Development of new geopolymers based on stone cutting waste. *Construction and Building Materials, 257*, 119525. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119525

Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2019). Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste

marble powder slurry. *Construction and Building Materials*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005

Sinap, Z. (2024). Eğitimde makine öğrenmesi alanındaki bilimsel yayın analizini konu alan çalışma. *Baskent University Journal of Education, 11*(1), 10-25.

Sofuoğlu, T. (2022). *Şeker üretim sürecinde açığa çıkan pres filtre atığının geopolimer harç üretiminde kullanılması* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye].

Springer, J. (1994). Ontario wollastonite: Uses, markets and Ontario's potential as a future producer. *Industrial Mineral Background, 17*, 22.

Sua-iam, G., Sokrai, P. and Makul, N. (2016). Novel ternary blends of Type 1 Portland cement, residual rice husk ash, and limestone powder to improve the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1028-1034. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.002.

Sun, Z., & Vollpracht, A. (2018). Isothermal calorimetry and in-situ XRD study of the NaOH activated fly ash, metakaolin and slag. *Cement and Concrete Research, 103*, 110–122. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.004.

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

Tapik, Ş. (2019). *Sivas–Yıldızeli yöresi vermikülit hammaddesinin seramik sektöründe kullanımının araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

Tawfik, T.A. , AlSaffar, D.M. , Tayeh, B.A. , Metwally, K.A. , ElKattan, I.M. , (2021), Role of expanded clay aggregate, metakaolin and silica fume on the of modified lightweight concrete properties, *Geosystem Engineering, 24* (3) 145–156. https://doi.org/10.1080/12269328.2021.1887002.

Tchadjié, L. N., Djobo, J. N. Y., Ranjbar, N., Tchakouté, H. K., Kenne, B. B. D., Elimbi, A., & Njopwouo, D. (2016). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. *Ceramics International, 42*(3), 3046–3055. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.091

Tecimer, D.,(2021), *Vollastonit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Geopolimerin Taze Ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Niğde, Türkiye; Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Tekin, H. (2006). Yapay zekâ. *Journal of Yasar University*, *1*(1), 81–93.

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.

Temuujin, J., van Riessen, A., & Williams, R. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials, 167*(1–3), 82–88. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.121.

Tenza-Abril, A. J., Villacampa, Y., Solak, A. M., & Baeza-Brotons, F. (2018). Prediction and sensitivity analysis of compressive strength of segregated lightweight concrete based on artificial neural network using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials, 189*, 1173–1183. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.096.

Thang, X. N. (2016). Influence of curing and water to the mechanical properties of geopolymer mortar. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Article 2278-0181.

Tokay, H. (2019). *Vermikülit ve uçucu kül katkılı geopolimer harç üretilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi].

Tokdemir, M. (2023). *Atık tuğla tozu ve uçucu kül kullanılarak mikrodalga kürü ile gözenekli geopolimer yapı malzemesi geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi].

Toksoy Köksal, F. (1997). Vermikülit mineraloji jeolojik oluşum endüstriyel kullanım ve Türkiye'deki durumu. *2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* (ss. 123-139), İzmir

Tonyalı, T. , (2021), *Farklı Tür Atık Malzemeler Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik Ve Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi. İstanblu, Türkiye; İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Top, F. (2023). *Metakaolin ve geri dönüştürülmüş beton agregası kullanılarak üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Munzur Üniversitesi].

Toprak, M. U., Şenol, A. F., Demiral, N. Ç., & Karakurt, C. (2022). Tuğla, kiremit ve mermer atığı tozları ile üretilen jeopolimer harçların özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9*(2), 918–930. https://doi.org/10.35193/bseufbd.1100183

Tosunoğlu, E., Yılmaz, R., Özeren, E., & Sağlam, Z. (2021). Eğitimde makine öğrenmesi: Araştırmalardaki güncel eğilimler üzerine inceleme. *Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Dergisi, 3*(2), 178–199.

Trezza, M. A., & Scian, A. N. (2000). Thermal treatment of calcium carbonate: Analysis by XRD and FTIR. *Journal of Materials Science, 35*, 4101–4106.

Tulga, İ., Kilinç, K., (2018) Uçucu kül kullanımının farklı dayanım sınıflarındaki betonların mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi. *Kırklareli University Journal of Engineering and Scienc, 4* (2): 212–236

Ulusu, O., , (2025). *Düşük molarite farklılığının yüksek fırın cürufu ikameli uçucu kül bağlayıcılı geopolimer özelliklerine etkisinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi].

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxon, P., & Lukey, G. C. (2007). Reaction mechanism in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3):506-13.10.1016/j.jhazmat.2006.02.044.

Verma, N. K., Meesala, C. R., & Kumar, S. (2023). Developing an ANN prediction model for compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with experimental investigation. *Neural Computing and Applications*. https://doi.org/10.1007/s00521-023-08237-1

Viola, V., Allah, P., Perumal, P., & Catauro, M. (2024). Alkali activation of metakaolin and wollastonite: Reducing sodium hydroxide use and enhancing gel formation through carbonation. *Materials, 17*(19), 4910. https://doi.org/10.3390/ma17194910

Vu, C. C., & Tran, H. H. (2023). Performance analysis of methods to estimate Weibull parameters for the compressive strength of concrete. *Case Studies in Construction Materials, 19*, e02330. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02330

Wang, Q., Ding, Z. Y., Da, J., Ran, K., & Sui, Z. T. (2011). Factors influencing bonding strength of geopolymer-aggregate interfacial transition zone. *Advanced Materials Research, 224*, 1–7. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.224.1

Wang, Q., Guo, H., & Ting, Y. (2022). Utilization of calcium carbide residue as solid alkali for preparing fly ash-based geopolymers: Dependence of compressive strength and microstructure on calcium carbide residue, water content and curing temperature. *Materials, 15*(3), 973. https://doi.org/10.3390/ma15030973

Wang, Y., Zhang, J., Liu, J., Fan, D., Qu, H., Zhou, L., & Zheng, S. (2024). Effects of different calcium sources on mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymers. *Materials, 17*(3), 682. https://doi.org/10.3390/ma17030682

Weng, P., Xie, J., & Zou, Y. (2023). Compressive strength prediction of admixed HPC concrete by hybrid deep learning approaches. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 44*(5), 8711–8724. https://doi.org/10.3233/JIFS-221714

Witzke, F. B., Beltrame, N. A. M., Luz, C. A., & Medeiros-Junior, R. A. (2023). Abrasion resistance of metakaolin-based geopolymers through accelerated testing and natural wear. *Wear, 530-531*, 204996. 10.1016/j.wear.2023.204996

Wu, H., Yang, J., Ma, H., & Wang, M. W. (2013). Preparation of acicular wollastonite using hydrothermal and calcining methods. *Integrated Ferroelectrics,* 146(1). 10.1080/10584587.2013.789777.

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.

Yang, T., Zhu, H., & Zhang, Z. (2017). Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars. *Construction and Building Materials, 153*, 284–293. 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.067.

Yazıcı, Ş., Anuk, D., & Arel, H. Ş. (2010). Metakaolin kullanımının harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25*(2), 13–24.

Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (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

Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2008). Effect of calcium silicate sources on geopolymerization. *Cement and Concrete Research, 38*(4), 554–564. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.001

Yu, P., Kirkpatrick, R. J., Poe, B., McMillan, P. F., & Cong, X. (2004). 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

Yusuf, M. O. (2023). Bond characterization in cementitious material binders using Fourier-Transform infrared spectroscopy. *Applied Sciences, 13*(5), 3353. https://doi.org/10.3390/app13053353

Yusuf, M. O., Johari, M. A. M., Ahmad, Z. A., & Maslehuddin, M. (2014). Evolution of alkaline activated ground blast furnace slag–ultrafine palm oil fuel ash based concrete. *Materials & Design, 55*, 387–393. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.047.

Yüksek, A. G.,Boyraz, T.,Ahmet Akkus, A. (2024). Prediction of Wear Properties of CaO and MgO Doped Stabilized Zirconia Ceramics with Artificial Neural Networks. *Transactions of the Indian Ceramic Society, 83(3),* 188-198. https://doi.org/10.1080/0371750X.2024.2401783.

Yüksek, A. G.,Boyraz, T.,Ahmet Akkus, A. (2024). Prediction of wear properties of CaO and MgO doped stabilized zirconia ceramics produced with different pressing methods using adaptive neuro fuzzy inference systems.

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 55(9), 1227-1247. https://doi.org/10.1002/mawe.202300329.

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. H., & Malhotra, V. M. (1995). Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement & Concrete Research, 25,* 1713–1725. https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00167-0.

Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.

Zhong, Y., Qıu, X., Gao, J., & Guo, Z. (2019). Chemical structure of Si–O in silica fume from ferrosilicon production and its reactivity in alkali dissolution. *ISIJ International, 59,* 1098–1104. https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-516

Zilyas, D., & Yılmaz, A. (2023). Makine öğrenmesi yöntemleri ile eğitim başarısının tahmini modeli. *Dicle University Journal of Engineering*, 437–447. https://doi.org/10.24012/dumf.1322273