

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF/ÇİMENTO
KATKISININ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Eray YILDIRIM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF/ÇİMENTO
KATKISININ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN GEOTEKNİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

Eray YILDIRIM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ertan BOL

HAZİRAN 2025

Eray YILDIRIM tarafından hazırlanan “Alkali ile Aktive Edilmiş Cüruf/Çimento Katkısının İnce Daneli Zeminlerin Geoteknik Özelliklerine Etkisi” adlı tez çalışması 18.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ertan BOL** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Murat UTKUCU**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç. Dr. İsa VURAL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr. Öğr. Üyesi Kurban ÖNTÜRK**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF/ÇİMENTO KATKISININ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete ’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(18/06/2025)

Eray YILDIRIM





Aileme, Eşime ve Oğluma,



TEŞEKKÜR

Akademik yolculuğum boyunca ve tez çalışmamda bana destek olan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle gerek geçmiş akademik hayatımda gerekse tez çalışmam süresince bilgi birikimi, tecrübesi ve yapıcı yönlendirmeleriyle bana her zaman destek olan değerli danışmanım Prof. Dr. Ertan BOL'a, aynı şekilde katkılarını esirgemeyen, yol gösterici yaklaşımlarıyla akademik gelişimime önemli katkılarda bulunan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK, Prof. Dr. Murat UTKUCU ve Prof. Dr. Sedat SERT'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince ve diğer akademik çalışmalarında değerli fikirleriyle katkı sunan, her zaman destekleyici yaklaşımıyla yanımda olan kıymetli mesai arkadaşım Prof. Dr. Eyüphan AVCI'ya içten teşekkürlerimi sunarım.

FTIR, XRD ve SEM-EDS analizlerinin tüm aşamalarında bilgi ve tecrübesiyle katkı sağlayan, her zaman destekleyici yaklaşımıyla yanımda olan, akademik birikimine ve kişiliğine büyük saygı duyduğum değerli mesai arkadaşım Doç. Dr. Ömer Yunus GÜMÜŞ'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince laboratuvar çalışmalarında verdikleri destek ve yardımları için araştırma görevlisi Emre DEVECİ ve araştırma görevlisi Melih UYSAL'a teşekkür ederim.

Bu çalışmaya sağladığı maddi destek için Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (Proje No: 2022-7-25-89) teşekkür ederim.

Eğitim öğretim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destek veren aileme, tüm bu yıllar boyunca bana verdiği motivasyon ve her şeyden önce sabrı için sevgili eşime ve varlığıyla bana güç veren biricik oğluma en içten saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Eray YILDIRIM



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	5
2. KİLLİ ZEMİNLER VE ZEMİNLERİN KATKI MALZEMELERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ	13
2.1. Killi Zeminler	13
2.2. Zeminlerin İyileştirilmesi	15
2.3. Zeminlerin Katkı Malzemesi Kullanılarak İyileştirilmesi.....	16
3. MALZEMELER VE YÖNTEM.....	21
3.1. Ukrayna Kilinin Kimyasal, Fiziksel ve İndeks Özellikleri	21
3.1.1. Kimyasal özellikleri	21
3.1.2. Fiziksel ve indeks özellikleri.....	21
3.1.2.1. Elek analizi ve hidrometre deneyleri.....	22
3.1.2.2. Kıvam limitleri deneyleri	23
3.1.2.3. Özgül ağırlık deneyi.....	25
3.1.2.4. Standart sıkıştırma (kompaksiyon) deneyleri.....	26
3.1.2.5. Serbest basınç dayanım (tek eksenli) deneyi	27
3.1.2.6. Permeabilite deneyi	30
3.1.2.7. Ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyi.....	31
3.2. Ögütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)	35
3.3. Çimento	36
3.4. Alkali Aktivatörler ve Aktivasyon Mekanizması.....	37
3.4.1. Sodyum silikat.....	39
3.4.2. Sodyum hidroksit	40
3.5. İleri Malzeme Karakterizasyonu ve Yapısal Analiz Teknikleri.....	40
3.5.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi	40
3.5.1.1. Kil, ÖYFC ve OPC'nin FTIR analizleri	42
3.5.2. X-ışınımı kırınımı (XRD) analizi.....	43
3.5.2.1. Kil, ÖYFC ve OPC'nin XRD analizleri.....	44
3.5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi.....	46
3.5.3.1. Kil, ÖYFC ve OPC'nin SEM-EDS analizleri	47
3.6. METODOLOJİ.....	51

3.6.1. Stabilizasyonda kullanılan malzemelerin karışım oranları	51
3.6.2. Alkali aktivatörlerin hazırlanması	52
3.6.3. Alkali aktivatör kullanılan numunelerin hazırlanması	53
4. AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTO/CÜRUF KATKISININ STABİLİZASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA	55
4.1. Kompaksiyon Deneyleri	55
4.2. Serbest Basınç Dayanımı Deneyleri	60
4.2.1. Serbest basınç dayanım numunelerinin, kütle ve hacimsel değişimleri ...	76
4.3. Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) Deneyleri	78
4.4. Killi zemin ve Stabilize Zeminlerin FTIR, XRD ve SEM-EDS ile Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu	81
4.4.1. FTIR spektrumlarının analizi	83
4.4.2. XRD kırınım verilerinin analizi	96
4.4.3. SEM-EDS yöntemleriyle mikroyapısal ve elementel bileşim analizi	103
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ	133

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
C-A-H	: Kalsiyum alüminat hidrat
C-A-S-H	: Kalsiyum alüminosilikat hidrat
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CC	: Kalsiyum klorit
CH	: Yüksek plastisiteli kil
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
CU	: Konsolide drenajsız test
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EICP	: Enzim kaynaklı kalsit çökmesi
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
HM	: Hidrolik modül
IR	: Kızılötesi
KOH	: Potasyum hidroksit
LL	: Likit limit
LOI	: Kızdırma kaybı
LS	: Pota fırın cürufu
MATLAB	: MATrix LABoratory
MDD	: Maksimum kuru birim hacim ağırlığı
MICP	: Mikrobiyal kaynaklı kalsit çökmesi
N-A-S-H	: Sodyum alüminosilikat hidrat
OPC	: Portland çimentosu
OWC	: Optimum su muhtevası
ÖYFC	: Öğütölmüş yüksek fırın cürufu
PI	: Plastisite indisi
PJ	: Prosopis juliflora
PL	: Plastik limit
POFA	: Palmiye yağı yakıt külü
SAÜ-BAP	: Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi
SBD	: Serbest basınç dayanımı

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sodyum hidroksit
SS	: Sodyum silikat
UPV	: Ultrasonik darbe hızı
XRD	: X-ışını kırınımı
YFC	: Yüksek fırın cürufu



SİMGELER

R²	: Belirlilik katsayısı
G_s	: Özgöl ağırlık
γ_{su}	: Suyun birim hacim ağırlığı [kN/m ³]
ω	: Su muhtevası [%]
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık [kN/m ³]
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık [kN/m ³]
V	: Hacim [cm ³]
k	: Permeabilite katsayısı
a	: Permeabilite dikey borunun en kesit alanı [cm ²]
A	: Numune kesit alanı [cm ²]
L	: Numunenin boyu [cm]
h₁	: Permeabilite testi başlamadan önceki su seviyesi [cm]
h₂	: Permeabilite testinin bitimindeki su seviyesini [cm]
Δt	: Zaman farkı [sn]
V_s	: S dalgası hızı [m/sn]
V_p	: P dalgası hızı [m/sn]
E	: Elastisite modülü [Pa]
G	: Kayma modülü [Pa]
λ	: Dalga boyu [cm]
μ	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Kil minerallerinin sınıflandırılması (Kumari ve Mohan, 2021).....	14
Tablo 2.2. Zemin sınıflarına göre çimento miktarı (Tunç, 2002).....	17
Tablo 2.3. Zemin cinslerine göre kullanılacak kireç yüzdesi (Tunç, 2002).....	18
Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan Ukrayna kilinin kimyasal bileşimleri.	22
Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan kile ait PL deney sonuçları.	24
Tablo 3.3. Çalışmada kullanılan killi zeminin özgül ağırlık deney sonuçları.	26
Tablo 3.4. Çalışmada kullanılan kilin serbest basınç dayanım deney sonuçları.	29
Tablo 3.5. Çalışmada kullanılan kilin fiziksel ve geoteknik özellikleri.	34
Tablo 3.6. Çalışmada kullanılan ÖYFC'nin kimyasal analizi.....	35
Tablo 3.7. ÖYFC'nin hidrolik reaktivitesinin değerlendirilmesi için önerilen formüller (Pal ve ark., 2003).	36
Tablo 3.8. Çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	37
Tablo 3.9. Çalışmada kullanılan SH ve SS'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	39
Tablo 3.10. Kullanılan karışımın oranları ve notasyonları (Yıldırım ve ark., 2024). 52	
Tablo 4.1. Killi zemin ve karışımların ilave edilmesiyle hazırlanan killi zeminlerin standart Proktor testleri sonucunda elde edilen kompaksiyon parametreleri.	60
Tablo 4.2. Killi zemin ve 27 farklı karışım ile stabilize edilen killi zeminlerin kür şartları ve kür sürelerine göre SBD değerleri.....	73
Tablo 4.3. Killi zemin ve farklı karışımlar ile stabilize edilen killi zeminlerin UPV değerleri.....	80
Tablo 4.4. FTIR, XRD ve SEM-EDS testlerinin yapıldığı numunelerin listesi.	82



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Kil minerallerinin kafes yapıları a) Tetrahedron ve b) Oktahedron (Kök ve ark., 2023).	14
Şekil 2.2. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002).....	16
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kil malzeme.....	22
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan zeminin dane dağılım eğrisi (Yıldırım ve ark., 2024).	23
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan zemine ait Casagrande yöntemiyle elde edilen LL grafiği.	24
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan zeminin LL ve PI değerlerinin plastisite kartı üzerindeki yeri.....	25
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan zeminin kompaksiyon eğrisi.	27
Şekil 3.6. Numune hazırlamada kullanılan başlıca ekipmanlar a) Özel olarak tasarlanmış silindirik numune hazırlama kalıbı b) Numune çıkarma krikosu.	28
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan killi zeminin serbest basınç dayanım testi. a) ve b) Serbest basınç dayanım testi için hazırlanan zemin numuneleri, c) ve d) ise serbest basınç dayanım deneyi sonrası yenilmeye uğramış zemin numuneleri.....	29
Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan killi zemine ait numunelerin serbest basınç dayanım deneyleri, numunelerin eksenel gerilmeye karşılık yüzde birim boy değişimi grafikleri.	30
Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan düşen seviyeli permeabilite test sistemi.....	31
Şekil 3.10. UPV test düzeneğinin şematik diyagramı (Kencanawati ve ark., 2018; Malhotra ve Carino, 2003).	32
Şekil 3.11. UPV test ölçümleri a) Sistemin kalibrasyonu b) Killi zeminin UPV ölçümü.	33
Şekil 3.12. Geopolimerizasyon süreci (Zhang ve ark, 2020'den modifiye edilmiştir.).	38
Şekil 3.13. Kalsiyumun geopolimer reaksiyon mekanizması üzerindeki etkileri (Guo ve ark, 2016'dan modifiye edilmiştir.).	38
Şekil 3.14. FTIR spektrometresinin temel bileşenlerinin şematik gösterimi (Ojeda ve Dittrich, 2012).	41
Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan kilin FTIR spektrumu.....	42
Şekil 3.16. ÖYFC'ye ait FTIR spektrumu.	42
Şekil 3.17. OPC'ye ait FTIR spektrumu.	43
Şekil 3.18. XRD ölçüm sisteminin şematik gösterimi (Jung ve ark, 2023; Piyathissa ve ark, 2023; Warren 1990).	44
Şekil 3.19. Çalışmada kullanılan killi zeminin XRD kırınım deseni.....	45
Şekil 3.20. Çalışmada kullanılan ÖYFC'nin XRD kırınım deseni.	45
Şekil 3.21. OPC'nin XRD kırınım deseni.....	46
Şekil 3.22. SEM ölçüm sisteminin şematik gösterimi (Nour ve ark, 2024).	47

Şekil 3.23. Çalışmada kullanılan killi zemine ait SEM görüntüleri.....	48
Şekil 3.24. Çalışmada kullanılan killi zeminin EDS analizleri.....	48
Şekil 3.25. Çalışmada kullanılan ÖYFC'ye ait SEM görüntüleri.....	49
Şekil 3.26. Çalışmada kullanılan ÖYFC'nin EDS analizi.	50
Şekil 3.27. a) OPC'nin EDS analizi Sayyed ve ark. (2024) b-d) OPC'nin SEM görüntüleri sırasıyla Sayyed ve ark, 2024; Vargas, 2010; Sinkhonde, 2023.	50
Şekil 4.1. Killi zemin ve %5, %10 ve %15 OPC katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.	56
Şekil 4.2. Killi zemin ve alkali aktivatör katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.	56
Şekil 4.3. Killi zemin, %20 ÖYFC katkılı killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC ve OPC katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.	57
Şekil 4.4. Killi zemin, a) %20 ÖYFC, b) %18 ÖYFC + %2 OPC, c) %16 ÖYFC + %4 OPC ve d) %12 ÖYFC + %8 OPC oranlarında katkılar ile yapılan ve ayrıca her bir katkı kombinasyonu için alkali aktivatör ilavesiyle elde edilen killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.....	58
Şekil 4.5. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC + alkali aktivatör katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.....	59
Şekil 4.6. SBD testi için hazırlanan numuneler a) Havada kurutulan numuneler b) Plastik filme sarılmış numuneler.....	61
Şekil 4.7. SBD deneyi için dolapta bekletilen numuneler.	61
Şekil 4.8. SS/SH oranı 1 olan numunelerde kristallenme (Yıldırım ve ark, 2024)....	62
Şekil 4.9. SS/SH oranı 1 olan numunelerde gözlemlenen kristallerin FTIR spektrumları (Yıldırım ve ark, 2024).	63
Şekil 4.10. Killi zemin ve %5, %10 ve %15 OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin SBD değerlerinin zamana bağlı değişimi a) Havada kurutma çizgi grafik b) Islak kürlenmiş çizgi grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).	65
Şekil 4.11. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin SBD değerlerinin zamana bağlı değişimi a) Havada kurutma b) Islak kürlenmiş (Yıldırım ve ark, 2024).....	66
Şekil 4.12. Killi zemin ve alkali aktivatörler ile stabilize edilen killi zeminlerin SBD değerlerinin zamana bağlı değişimi a) Havada kurutma b) Islak kürlenmiş (Yıldırım ve ark, 2024).....	66
Şekil 4.13. Killi zemin ve SS/SH oranı 1 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize edilmiş killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgi grafik b) Islak kürlenmiş çizgi grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).	67
Şekil 4.14. Killi zemin ve SS/SH oranı 3 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgi grafik b) Islak kürlenmiş çizgi grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).....	68
Şekil 4.15. Killi zemin ve SS/SH oranı 5 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgisel grafik b) Islak kürlenmiş çizgisel grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).....	69

Şekil 4.16. Killi zemin ve SS/SH oranı 7 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgisel grafik b) Islak kürlenmiş çizgisel grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).	70
Şekil 4.17. Killi zemin ve farklı karışımlarla stabilize edilen killi zeminlerin zamana bağlı SBD değerleri. (a, b): %20 ÖYFC, (c, d): %18 ÖYFC + %2 OPC, (e, f): %16 ÖYFC + %4 OPC, (g, h): %12 ÖYFC + %8 OPC, a, c, e, g: havada kurutma, b, d, f, h: ıslak kürlenme koşulları (Yıldırım ve ark, 2024).	72
Şekil 4.18. Killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin 90 günlük havada kurutulmuş ve ıslak kürlenmiş numunelerin SBD değerleri.	74
Şekil 4.19. SBD deneyi yapılan bazı numunelerin kırım öncesi ve sonrasına ilişkin fotoğrafları.	75
Şekil 4.20. SS/SH=1 oranının kullanıldığı S00_C0_GP10_R1 ve S16_C4_GP10_R1 karışımlarının kullanıldığı numunelerin SBD öncesi ve sonrası kırılma şekilleri.	75
Şekil 4.21. 28 ile 90 günlük kürlenme sürelerinde killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin SBD değerlerinin yüzdesel değişimi (Yıldırım ve ark, 2024).	77
Şekil 4.22. Havada kurutulmuş ve ıslak kürlenmiş koşullarda, killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin 90 günlük hacimsel değişimi (Yıldırım ve ark, 2024).	77
Şekil 4.23. Havada kurutulmuş ve ıslak kürlenmiş koşullarda, killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin 90 günlük kütleli değişimi (Yıldırım ve ark, 2024).	78
Şekil 4.24. Çalışmada kullanılan UPV test düzeneği	79
Şekil 4.25. Doğrusal regresyon analizleri a) Havada kurutulmuş numuneler b) Islak kürlenmiş numuneler ve c) Her iki kür koşulundaki numuneler.	81
Şekil 4.26. Killi zemin, ÖYFC ve OPC'ye ait FTIR spektrumları.	84
Şekil 4.27. Killi zemin, OPC ve %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu.	84
Şekil 4.28. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu arasındaki fark spektrumu.	85
Şekil 4.29. Killi zemin, ÖYFC ve %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu.	85
Şekil 4.30. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu arasındaki fark spektrumu.	86
Şekil 4.31. Killi zemin ve %20 ÖYFC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) karışımlarıyla stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.	87
Şekil 4.32. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %20 ÖYFC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) karışımıyla stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.	88
Şekil 4.33. Killi zemin ve farklı yüzdelerdeki ÖYFC + OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.	89
Şekil 4.34. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile farklı oranlardaki ÖYFC + OPC karışımıyla stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.	90
Şekil 4.35. Killi zemin ve %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.	91
Şekil 4.36. Killi zemin ve %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.	91

Şekil 4.37. Killi zemin ve %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.....	92
Şekil 4.38. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.....	92
Şekil 4.39. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.....	93
Şekil 4.40. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.	93
Şekil 4.41. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH=3 olan stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.....	94
Şekil 4.42. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH=5 olan stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.....	95
Şekil 4.43. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH=7 olan stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.....	95
Şekil 4.44. Killi zemin, ÖYFC ve OPC'ye ait XRD kırınım desenleri.	97
Şekil 4.45. Killi zemin, %15 OPC ve %20 ÖYFC ile stabilize edilen killi zeminlerin XRD kırınım desenleri a) %15 OPC, b) %20 ÖYFC numunelerine ait XRD kırınım desenleri.....	98
Şekil 4.46. Killi zemin, %20 ÖYFC ve %12 ÖYFC + %8 OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin XRD kırınım desenleri a) %20 ÖYFC, b) %12 ÖYFC + %8 OPC numunelerine ait XRD kırınım desenleri.	99
Şekil 4.47. Killi zemin, %20 ÖYFC ve %20 ÖYFC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminlerin XRD kırınım desenleri.....	100
Şekil 4.48. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC + SS/SH ile stabilize edilen killi zeminin XRD kırınım desenleri a) %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH (Oran 3, 5 ve 7), b) %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH (Oran 3, 5 ve 7), c) %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH (Oran 3, 5 ve 7).	101
Şekil 4.49. Stabilizasyon sonrası, killi zeminlerin XRD kırınım deseninde gözlenen değişimlerin detaylandırılmış görünümü.	102
Şekil 4.50. Çalışmada kullanılan killi zemine ait SEM görüntüleri.....	103
Şekil 4.51. Çalışmada kullanılan killi zeminin SEM-EDS analizi.	104
Şekil 4.52. %15 OPC ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi.	104
Şekil 4.53. %20 ÖYFC ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi.	105
Şekil 4.54. %20 ÖYFC ve alkali aktivatörler ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.	106
Şekil 4.55. %20 ÖYFC + alkali aktivatörler ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri	107
Şekil 4.56. %18 ÖYFC + %2 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.	108
Şekil 4.57. %18 ÖYFC + %2 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri.	109
Şekil 4.58. %16 ÖYFC + %4 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3, 5 ve 7 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.	110
Şekil 4.59. %16 ÖYFC + %4 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3, 5 ve 7 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri.	111

Şekil 4.60. %12 ÖYFC + %8 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.	112
Şekil 4.61. %12 ÖYFC + %8 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri.	113
Şekil 4.62. %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen killi zeminde gözlenen kristal yapılar.	114
Şekil 4.63. %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen killi zeminde gözlenen kristal yapıların EDS haritalanması.	114
Şekil 4.64. %12 ÖYFC + %8 OPC ve SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen killi zeminde gözlenen elementlerin dağılım haritaları.	115
Şekil 4.65. SS/SH oranı 1 ile stabilize edilmiş killi zeminin SEM görüntüsü.	116
Şekil 4.66. SS/SH oranı 1 ile stabilize edilmiş killi zeminin EDS analizi.	116





ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ CÜRUF/ÇİMENTO KATKISININ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, alkali ile aktive edilmiş hibrit cüruf/çimento kullanılarak işlenmiş yüksek plastisiteli killi zeminin stabilizasyon performansı araştırılmıştır. Zemin olarak Ukrayna kili, alüminosilikat kaynağı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), bağlayıcılığı desteklemek amacıyla ise Portland çimentosu (OPC) kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) tercih edilmiştir. Killi zeminin stabilizasyonunda farklı içeriklere sahip 27 karışım kullanılmıştır. ÖYFC ve OPC birlikte kullanıldığında, bu iki bağlayıcının toplam oranı kilin kuru ağırlığının %20'si olacak şekilde belirlenmiştir. Alkali aktivatörler, kilin ağırlığının %10'u oranında kullanılmıştır. Aktivatör sistemi, SS ve SH karışımı olarak hazırlanmış ve SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7 olacak şekilde belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak killi zeminin bazı fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Her bir karışım ile işlenmiş killi zemine standart Proktor deneyleri uygulanarak, optimum su muhtevası (OWC) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) değerleri belirlenmiştir. Kil ve stabilize edilmiş killi zeminin serbest basınç dayanımı (SBD), havada kurutma ve ıslak kürleme koşulları altında 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kürleme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 90 günlük kür süresine sahip numunelere, her iki kür koşulunda ultrasonik darbe hızı (UPV) testi uygulanmıştır. SBD ile UPV değerleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Stabilizasyon sonrası meydana gelen alkali aktivasyon ve/veya hidrasyonu etkili bir şekilde değerlendirmek amacıyla seçili numunelere Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Standart Proktor deneylerinin sonuçlarına göre, killi zemine kıyasla stabilize zeminlerin OWC değerleri azalmış, MDD değerleri artmıştır. %20 ÖYFC içeren karışımda, OWC değerinde en fazla azalma, MDD değerinde en yüksek artış gözlenmiştir. Sadece alkali aktivatör ile stabilize edilmiş numunelerin SBD değerlerinde, killi zemine kıyasla belirgin bir artış gözlemlenmemiştir. Bu bulgu, yalnızca SS ve SH'den oluşan karışımın killi zeminin stabilizasyonunda etkili olmadığını göstermektedir. Sadece OPC ile stabilize edilmiş killi zeminde, OPC miktarının artmasına bağlı olarak SBD değerlerinde artış gözlemlenmiştir. %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinde, killi zemine kıyasla SBD değerlerinde sınırlı bir artış gözlemlenmiştir. ÖYFC ve OPC ile stabilize edilmiş numunelerde, OPC miktarındaki artışa bağlı olarak SBD değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu grupta en yüksek SBD değeri hem havada kurutma hem de ıslak kür koşullarında %12 ÖYFC + %8 OPC ile stabilize edilmiş numunelerde elde edilmiştir. Sadece OPC ile stabilize edilmiş numuneler, erken kür sürelerinde daha hızlı ve yüksek dayanım kazanırken, alkali aktivasyon prosesinin olduğu numunelerde dayanım artışı daha uzun kür sürelerinde belirgin hâle gelmiştir. SS/SH oranı stabilizasyon performansını etkilediği görülmektedir. ÖYFC, OPC ve alkali aktivatör ile stabilize edilmiş numuneler arasında, en yüksek SBD değerleri SS/SH oranı 5 olan numunelerde gözlenmiştir. Bu

oranı sırasıyla 7, 3 ve 1 takip etmiştir. En yüksek SBD değeri %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=5 oranına sahip karışım ile stabilize edilmiş numunede gözlenmiştir. Bu numuneyi sırasıyla %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH=5, %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=7, %20 ÖYFC + SS/SH=5 karışımlarıyla stabilize edilmiş numuneler izlemiştir. Alkali ile aktive edilmiş cüruf ve Portland çimentosundan oluşan hibrit bağlayıcı sistem ile stabilize edilmiş killi zemin, %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zemine kıyasla daha iyi stabilizasyon performansı sergilemiştir. Bu durum, havada kurutma kür koşullarında 10 numunede, ıslak kür koşullarında ise 9 numunede belirgin olarak gözlemlenmiştir. SS/SH oranı 1 ile stabilize edilmiş ve havada kurutulan numunelerde kristallenme gözlenmiştir. Fazla SH, reaksiyona girmeyen kısmıyla havadaki nemi emmiş, ardından karbon dioksit (CO_2) ile tepkimeye girerek sodyum karbonat monohidrat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kristallerini oluşturmuştur. Bu durum stabilizasyon üzerinde olumsuz etki yaratmıştır. SBD ile UPV verileri arasındaki doğrusal regresyon analizleri sonucunda, R^2 değerleri sırasıyla havada kurutma kür koşullarında 0,87, ıslak kür koşullarında 0,88 ve her iki kür koşulu için genel analizde 0,89 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, iki parametre arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki olduğunu göstermektedir. FTIR, XRD, SEM-EDS yöntemleriyle killi zemin numuneleri ile stabilize edilmiş killi zemin numuneleri arasında karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Stabilize killi zemin numunelerinde hidrasyon ve geopolimerleşme neticesinde meydana gelen faz oluşumları (kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum alüminosilikat hidrat ve/veya sodyum alüminosilikat hidrat (N/C-A-S-H)) ve bu fazların kimyasal bağ yapıları, fonksiyonel grupları, amorf yapıları, morfolojisi ve mikroyapısal dağılımları gözlenmiştir. Geopolimerleşmede SS/SH oranının etkili olduğu gözlemlenmiştir. ÖYFC ve OPC'nin bir arada kullanılması hibrit olarak tanımlanmıştır. Killi zeminin alkali ile aktive edilmiş hibrit cüruf/çimento ile stabilizasyonu oldukça iyi performans sergilemiştir.

EFFECT OF ALKALI-ACTIVATED SLAG/CEMENT ADDITIVE ON GEOTECHNICAL PROPERTIES OF FINE-GRAINED SOILS

SUMMARY

This study investigated the stabilization performance of high-plasticity clayey soil treated with alkali-activated hybrid slag/cement. Ukrainian clay was used as the clay soil, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) as the aluminosilicate source, and Portland cement (OPC) was added to enhance the binding properties. Sodium hydroxide (SH) and sodium silicate (SS) were preferred as the alkali activators. Twenty-seven mixtures with different contents were used in the stabilization of the clay soil. The total proportion of GGBFS and OPC used together was determined to be 20% of the dry weight of the clay. Alkaline activators were used at a rate of 10% of the dry weight of the clay. The activator system was prepared as a mixture of SS and SH, and the SS/SH ratio was determined as 1, 3, 5, and 7. First, the physical and geotechnical properties of the untreated clay were determined. Sieve analysis and a hydrometer test were performed to determine the grain distribution of the clay. Accordingly, no gravel was observed in the clay, 3% sand, 29% silt, and 68% clay. It was observed that the fine content in the soil was quite high. Liquid and plastic limit tests were carried out to determine the plasticity properties of the clay. Because of these tests, the liquid limit of the clay was 57% and the plastic limit was 26%. According to the plasticity card, the clay belongs to the high-plasticity (CH) clay group. Standard Proctor tests were performed to determine the compaction properties of the clay. According to these tests, the optimum water content (OWC) value of the clay was 21.6% and the maximum dry unit weight (MDD) value was 15.7 kN/m³. The OWC values of the additive soil varied between 21.6% and 19.2%, and the MDD values varied between 15.7 kN/m³ and 16.5 kN/m³. The Unconfined Compressive Strength (UCS) value of the clay was 346.6 kPa and the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) was measured as 1131 m/sec. Standard Proctor tests were performed on the treated clay soil for each mixture, and the OWC and MDD values of the treated soils were determined. The OWC and MDD values of the mixture were used in the samples prepared to determine the stabilization performance. The UCS values of the clay and stabilized clay were obtained under air-drying and wet-curing conditions at 0, 3, 7, 28, and 90 days of curing time. The air-dried and wet-cured samples were kept in closed cabinets to protect them from sunlight. In addition, the UPV test was applied to samples with 90 days of curing time under both curing conditions. Linear regression analyses were performed to evaluate the relationship between the UCS and UPV values. Within the scope of the regression analysis, three separate regression models were developed for the air-dried samples, the wet-cured samples, and samples covering both curing conditions. Empirical equations were generated to describe the relationship between the data. Using these equations, parameter estimation can be performed between the data. Fourier transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray diffraction (XRD), and scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS) tests were performed on selected samples in order to effectively evaluate alkaline activation and/or hydration after stabilization. According

to the results of the standard Proctor tests, the OWC values of the treated clay decreased, whereas the MDD values increased, compared with the untreated clay. The highest decrease in OWC value and the highest increase in MDD value occurred in the mixture containing 20% GGBS. No significant increase in UCS values was observed in specimens stabilized with alkaline activator alone compared with the untreated specimen. These results indicate that a mixture of SS and SH alone is not effective for stabilizing clay soil stabilization. In the samples stabilized only with OPC, an increase in the UCS values was observed due to the increase in the amount of OPC. In the samples where the clay was stabilized with 20% GGBS, a limited increase in the UCS values was observed compared with the untreated clay. In the samples stabilized with GGBS and OPC, an increase in the UCS values was observed due to the increase in the amount of OPC. The highest UCS value in this group was obtained in the samples stabilized with 12% GGBS + 8% OPC under both air-drying and wet curing conditions. Samples stabilized only with OPC gained strength faster and higher strength at early curing times, while the strength increase in the samples with the alkaline activation process became evident at longer curing times. The SS/SH ratio seems to affect the stabilization performance. Among the samples stabilized with GGBS, OPC, and the alkaline activator, the highest UCS values were observed in the samples with an SS/SH ratio of 5. This ratio was followed by 7, 3, and 1, respectively. The highest UCS value was observed in the sample with 16% GGBS + 4% OPC + SS/SH=5. This was followed by samples prepared with 18% GGBS + 2% OPC + SS/SH=5, 16% GGBS + 4% OPC + SS/SH=7, 20% GGBS + SS/SH=5 mixtures, respectively. In the sample treated with 15% OPC, the strength increase compared to natural clay at the end of the 90-day curing period was determined to be 240.1% in the air-dried samples and 427.7% in the wet-cured samples. In the samples stabilized with 16% SFC + 4% OPC and an SS/SH ratio of 5, the increase was 298.4% in air-dried specimens and 536.7% in wet-cured specimens. Clay soils stabilized with hybrid slag/cement obtained by alkali activation exhibited better stabilization performance than soils stabilized with 15% OPC. This was observed in 10 specimens under air-dried curing conditions and 9 specimens under wet-curing conditions. Crystallization was observed in the specimens with an SS/SH ratio of 1 and the air-dried specimens. Excess SH absorbed moisture due to its unreacted portion and subsequently reacted with carbon dioxide (CO_2) to form sodium carbonate monohydrate ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) crystals. This phenomenon had a negative impact on the stabilization process. According to the linear regression analyzes of the UCS and UPV data, the determination coefficient (R^2) value was found to be 0.87 for air drying, 0.88 for wet curing and 0.89 for the overall analysis. These results show that there is a positive and significant relationship between the two parameters. A Comparative analysis was performed between the untreated and treated clay samples using FTIR, XRD, and SEM-EDS methods. Within the scope of the study, FTIR spectroscopy was performed on 22 samples, XRD on 20 samples, and SEM-EDS on 18 samples for material characterization, morphological analysis, functional analysis, phase analysis, surface imaging, and elemental analysis of both the clay and stabilized samples. The difference between the FTIR spectra of the untreated clay and the treated clay was taken. Thanks to the difference spectra obtained, the structural changes occurring in the clay were revealed more clearly. In the difference spectra, new phases formed because of the geopolymerization were observed. In the XRD diffraction patterns, new peaks indicating geopolymerization and hydration were observed in three different regions when the clay and stabilized clay samples were compared. In the treated clay samples, new phase formations (C-S-H and N/C-A-S-H), chemical bond structures, functional

groups, amorphous structures, morphology and microstructural distributions of the gel structures formed because of hydration and geopolymerization were observed. In this study, the SS/SH ratio is effective in the geopolymerization and it was observed that stabilization with a ratio of 5 and 7 gave better results. The combined use of GGBS and OPC has been defined as a hybrid. The stabilization of clayey soil using alkali-activated hybrid slag/cement binders demonstrated a notably good performance.





1. GİRİŞ

Artan insan nüfusu, kırsal bölgelerden kentlere göç, turizm ve sosyal faaliyetler, eski yapıların yenilenme ihtiyacı, ekonomik ve teknolojik ilerlemeler ile eğitim, sağlık, ulaşım ve sanayi gibi alanlardaki gelişmeler, farklı özellik ve boyutlarda yeni yapı ihtiyacını her geçen gün artırmaktadır. Yapılaşma ihtiyacının artmasıyla sorunsuz zemin alanları azalmış, yapıların yumuşak ve zayıf zeminler üzerine inşa edilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Zeminden kaynaklanan başlıca sorunlar, zemin taşıma kapasitesinin aşılması, oturma, çökme, heyelan ve kayma riski, zemin sıvılaşması, erozyon, kayma mukavemeti kayıpları, yeraltı suyu sorunları, şişme ve büzülme, doğal drenajın bozulması, donma ve çözülme etkisi sayılabilir. Zeminin kullanım amacına uygun özellik göstermediği zaman problemin çözümünde; üstyapı temellerini mevcut zemin özelliklerine göre projelendirmek, amaca uygun olmayan zemin veya zemin tabakalarını geçerek üstyapı temellerini sağlam zemin tabakalarına aktarmak, problemli zeminin yerinden çıkartılarak uygun özellikli yeni malzemenin yerleştirilmesi veya mevcut zemini uygun yöntemlerle iyileştirilerek yerine geri konulması ve problemli zemini yerinde yapılan işlemler ile amaca elverişli hale getirmek seçeneklerinden birisi seçilebilir (Özdemir ve Özdemir, 2006). Bu seçeneklerden özellikle zemini yerinde yapılan işlemler ile amaca uygun hale getirme düşüncesi, zemin iyileştirme kavramının ortaya çıkmasına ve gelişmesine neden olmuştur. Bu kapsamda birçok yöntem ve yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bir kısmında zeminin dayanımını artırmak, sıkışmayı ve oturmaya azaltmak, geçirgenliği düşürmek, şişme potansiyelini azaltmak, donma-çözünme direncini artırmak amacıyla bağlayıcı malzemeler kullanılmaktadır. Çimento, kireç ve bitüm tek başına bağlayıcılık özelliğine sahipken, uçucu kül, yüksek fırın cürufu (YFC), mikrosilika gibi malzemeler tek başına yeterli bağlayıcılık sağlayamamaktadır. Tek başına bağlayıcılığı olmayan malzemeler ise puzolanik reaksiyonlar, alkali aktivasyon yöntemleriyle bağlayıcılık kazanabilmektedir. Zemin iyileştirme çalışmalarında en çok kullanılan bağlayıcılardan birisi de çimentodur. Çimentonun su ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazı bağlayıcı matrisin temel bileşeni olup zemin danelerini birbirine bağlamaktadır. Ayrıca kalsiyum hidroksit

(Ca(OH)₂) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) ise bağlayıcılığa doğrudan veya dolaylı sınırlı katkı sağlayan ikincil hidratasyon ürünleridir. Çimento, zeminler için oldukça etkili bir stabilizör olmasına karşın yüksek karbon dioksit salınımı (CO₂ emisyonu), fosil yakıt ve doğal kaynak tüketimi, toprak ve su kirliliği, küresel ısınma, toz ve partikül oluşumu gibi olumsuz etkileri sebebiyle doğaya ve insan sağlığına zarar veren birçok dezavantajı bulunmaktadır (Habert ve ark, 2020). Çimento üretiminde kullanılan başlıca hammaddeler kalker, kil ve alçı taşıdır. Bu hammaddelerin temininde doğal alanlar tahribata uğramakta, çevresel sorunlar oluşmakta, biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve canlıların zarar görmesine neden olabilmektedir (Mihra ve ark, 2022; Schuhmacher ve ark. 2004). Çimento üretiminde ortaya çıkan toz ve atıklar, çevredeki toprak ve su kaynaklarına zarar vermekte ve en önemlisi insan sağlığını tehdit ederek akciğer hastalıklarına, göz ve cilt tahrişlerine ve solunum hastalıklarına yol açabilmektedir (Adeyanju ve Okeke, 2019; Kakooei ve ark, 2012; Schuhmacher ve ark, 2004). Ayrıca cilde uzun süre temas ettiğinde ciltte yanıklara ve alerjilere neden olabilmektedir (Manjula ve Praveena, 2013; Rauf ve ark, 2020). Küresel ölçekte çimento üretiminde en büyük tehlike karbon emisyonudur. Bir ton çimento üretiminde atmosfere yaklaşık 0,8-1,0 ton CO₂ salınımı meydana gelmekte (Arora ve ark, 2019; Manjunath ve Narasimhan, 2020) ve çimento endüstrisi küresel karbon salınımının yaklaşık %8'ini oluşturmaktadır. Karbon dioksit, insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının en büyük payını oluşturan ve küresel ısınmaya neden olan birincil sera gazıdır (Yoro ve Daramola, 2020). Küresel ısınmayı azaltmak ve iklim değişiklikleriyle mücadele etmek amacıyla Paris anlaşması 2015 yılında kabul edilmiş ve 2016 yılında yürürlüğe girmiştir (Adoption of the Paris Agreement, 2015). Bu anlaşma, sera gazı salımlarını hızla azaltmayı ve 21. yüzyılın ortalarında bu salımları dengelemeyi hedeflemektedir. Anlaşma kapsamında ülkeler, karbon dioksit emisyonlarını azaltmaya yönelik çeşitli önlemler almaya başlamış ve yüksek karbon ayak izine sahip çimento sektöründe alternatif malzeme arayışını hızlandırmıştır. Son zamanlarda çimentoya alternatif olarak geopolimerler üzerine araştırmaların yoğunlaştığı görülmektedir. Geopolimerler, YFC ve uçucu kül gibi sanayi yan ürünlerinin alkali aktivasyon yoluyla bağlayıcı özellik kazanmasıyla elde edilen inorganik polimer bağlayıcılardır. Çimento ve beton üretiminde uçucu kül ve YFC belli oranlarda kullanılmasına karşın endüstriyel atıkların sadece %20-30'u değerlendirilebilmekte, geriye kalan atıklar çevresel, teknik ve ekonomik sorunlara neden olmaktadır (Aydın, 2010). Geopolimerizasyon için gerekli olan temel bileşen,

yüksek oranda silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) içeren bir alüminosilikat kaynağı olup bu bileşenler uçucu kül ve YFC bol miktarda bulunmaktadır. Bu malzemeler, alkali aktivatörlerle kolayca reaksiyona girerek C-S-H, kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) ve sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) gibi dayanıklı bağlayıcı jeller oluşturur. Bu jeller, matrisinin sertleşmesini ve yüksek mekanik dayanım kazanmasını sağlamaktadır (Li ve ark, 2023; Mohamed ve ark, 2022; Rawat ve Pasla, 2024). Geopolimerleşme sürecinde yaygın olarak kullanılan başlıca alkali aktivatörler olarak sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) sayılabilir. Alkali aktivatörler, alüminosilikat içeren malzemeleri çözündürerek reaksiyonu başlatan yüksek pH değerine sahiptir. Alkali aktivasyon ile elde edilen bağlayıcıların çimentoya göre başlıca avantajları, yüksek mekanik özellikler, kimyasal etkilere ve karbonatlaşmaya karşı yüksek dayanıklılık, enerjinin verimli kullanımı, düşük üretim maliyeti, çevre dostu olması, düşük karbon ayak izi ve agresif kimyasal ajanlara karşı daha üstün dayanıklılık olarak sayılabilir (Aydın, 2010; Pacheco-Torgal ve ark., 2012; Wang ve ark, 1995).

Bu çalışmada, ülkemizde demir-çelik üretimi sırasında ortaya çıkan öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) ile Portland çimentosu (OPC) karışımından alkali aktivasyonu yoluyla elde edilen bağlayıcının, yüksek plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Alkali aktivasyon yoluyla üretilen bağlayıcı malzemenin performansını değerlendirmek amacıyla, geoteknik mühendisliği açısından problemli zemin olarak kabul edilen yüksek plastisiteli killi zemin tercih edilmiştir. Bu tür zeminler, düşük taşıma gücü, oturma sorunları ve şişme-büzülme gibi hacim değişimlerine yol açma potansiyeli nedeniyle iyileştirme gerektirebilir. Çalışmada, ince dane yüzdesinin oldukça fazla olması ve yüksek plastisite özelliği göstermesi nedeniyle Ukrayna kili tercih edilmiştir. Çalışmada Ereğli demir-çelik fabrikasında üretim sırasında açığa çıkan ÖYFC kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak ise pellet formunda sodyum hidroksit (SH) ve sıvı halde sodyum silikat (SS) kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek plastisiteli killi zeminin stabilizasyonu amacıyla, farklı içeriklere sahip ve birbirine referans olacak şekilde tasarlanmış toplam 27 karışım hazırlanmıştır. ÖYFC, OPC ve alkali aktivatörün killi zeminin stabilizasyonuna etkileri, farklı oranlarda ve her biri ayrı ayrı olacak şekilde ayrıca değerlendirilmiştir. ÖYFC, OPC ve alkali aktivatörün birlikte kullanıldığı kombinasyonda hem hidratasyon hem de alkali aktivasyonun gerçekleştiği hibrit bir

bağlayıcı sistem olarak tasarlanmıştır. Optimum oranları bulmak için farklı oranlarda ÖYFC ve OPC kullanılmıştır. Alkali aktivatör, SS ve SH'ın farklı oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanmış olup, SS/SH oranları 1, 3, 5 ve 7 olarak belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak killi zeminin fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Bu kapsamda kilin dane dağılımı, Atterberg limit değerleri, permeabilite katsayısı, özgül ağırlığı, ultrasonik darbe hızı (UPV) ve serbest basınç dayanımı (SBD) değerleri belirlenmiştir. Killi zemine ilave edilen 27 farklı karışım ile stabilize edilmiş numunelere ayrı ayrı standart Proktor deneyleri uygulanmış ve her numune için optimum su muhtevası (OWC) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) değerleri belirlenmiştir. Stabilize numunelerin hazırlanmasında her bir karışım için belirlenen OWC ve MDD değerleri kullanılmıştır. SBD ve UPV testleri için özel olarak tasarlanmış kalıp kullanılmış ve numuneler bu kalıba üç aşamalı olarak, el yordamıyla ile tabakalar hâlinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin boyu ve çapı ölçülerek karneye yazılmıştır. Karışımların stabilizasyona etkisini zamana bağlı olarak değerlendirebilmek amacıyla, numuneler 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. Hazırlanan numuneler havada kurutma ve ıslak kürleme şartlarında bekletilmiştir. Bu kür süreleri ve koşulları sonunda, numunelere SBD testleri uygulanarak dayanım değerleri belirlenmiştir. Ayrıca, 90 günlük kür süresine sahip numunelere yönelik olarak her iki kür koşulunda da UPV ölçümleri yapılmıştır. SBD ve UPV sonuçları arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, havada kurutulmuş numuneler, ıslak kürlenmiş numuneler ve tüm numuneler olmak üzere üç farklı grup için ayrı ayrı yapılmıştır. Kil, ÖYFC, OPC ve stabilize numunelerden seçilenlerin, 22'sine Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), 20'sine X-ışını kırınımı (XRD), 18'ine taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Killi zemin, ÖYFC ve OPC'ye ait FTIR spektrumları, XRD kırınım desenleri, SEM görüntüleri ve SEM ile birlikte yapılan EDS analizlerinin sonuçları, stabilize edilmiş numunelerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar ve stabilize edilmiş numuneler üzerinde gözlemler neticesinde yeni oluşan kimyasal bağlar, fonksiyonel gruplar, kristal fazlar, yüzey morfolojisi, mikroyapı özellikleri ile elementlerin türü ve yüzeydeki dağılımı incelenmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

Killi zeminlerin stabilizasyonunda çimento, kireç, uçucu kül, ÖYFC, silis dumanı, alkali aktivatörler, kalsiyum klorür, polimer bazlı malzemeler, doğal malzemeler, inşaat atıkları, biyolojik malzemeler ve bitüm gibi katkı malzemelerinin kullanıldığı görülmektedir. Çimento hidrasyon etkisiyle bağlayıcı jel oluşturmakta ve killi zeminde dayanımı artırmaktadır. Kireç, puzolanik reaksiyonlar geliştirerek kildeki plastisiteyi düşürmekte ve dayanımı yükseltmektedir. Uçucu kül, yüksek kalsiyum içeriği sayesinde tek başına bağlayıcı etki gösterebilmektedir. ÖYFC, yeterli kalsiyum içeriğine sahipse uçucu kül gibi tek başına kullanılabilir. Silis dumanı, özellikle ince daneli olduğundan mikro-yapıda iyileştirme göstermektedir. Kalsiyum klorür özellikle donma-çözünmede etkili olmaktadır. Pirinç kabuğu, pomza ve organik lifler (Hindistan cevizi lifi, keten lifleri gibi) gibi doğal malzemelerde puzolanik etki, çatlak kontrolü ve çekme dayanımında olumlu etkiler göstermektedir. Mikrobiyal ve enzim bazlı malzemeler ise başlıca gözeneklerin kapanması, bağlayıcılık özelliği göstermesi, şişme oturma davranışını iyileştirebilmektedir. Son yıllarda, alüminosilikat içeren malzemelerin alkali aktivasyon yoluyla bağlayıcılık kazandığı ve bu bağlayıcıların beton ve zemin iyileştirme çalışmalarında kullanıldığı görülmektedir.

Öztürk (2009), Ankara-Gölbaşı bölgesindeki şişme potansiyeli yüksek olan killerin stabilizasyonunda kireç kullanmıştır. Kireç oranını %1, 3, 5, 7 ve 9 olarak belirlemiştir. Kireç miktarının artmasıyla birlikte numunelerin şişme yüzdesinin azaldığı gözlenmiştir. Doğal kilde şişme yüzdesi %9,4 iken %9 kireç ilave edilmiş killi zeminde şişme yüzdesi %0,4 olarak hesaplanmıştır. Kireç katkısının yüksek plastisiteli killi zeminde likit limit, plastik limit ve şişme özelliklerinde iyileştirme göstermiştir. Kalay (2010), yüksek plastisite özellikli kilin stabilizasyonu için kireç, mermer tozu ve pomza kullanmıştır. Bu katkıları arasında kombinasyon yaparak belirli yüzdelerde uygulamıştır. Kireç, mermer tozu ve pomza kilin stabilizasyonuna olumlu katkı sağlamıştır. Kireç katkısı, likit limit değerinin azaltılmasında en etkili sonuçları göstermiştir. Katkılar ile stabilize edilen zemin 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda en yüksek SBD değeri %6 kireç ile stabilize edilen zeminde gözlenmiştir. Zorluer (2003), zemin iyileştirme çalışmasında Afyon bölgesindeki mermer tesisinin çökeltme havuzundan temin edilen mermer tozunu kullanmıştır. Deneylerde, iki farklı düşük plastisiteli killi zemine %1 ila %7

arasında değişen oranlarda mermer tozu eklenmiştir. şişme yüzdesinin en düşük olduğu karışım %5 oranında mermer tozu içeren numune olmuştur.

imen ve ark. (2017) yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonu için inşaat atıklarını 40 nolu elekten geçirerek %2, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 oranlarında kullanmışlardır. Numunelere standart proktor testi, Atterberg limit deneyleri, bir kısmına ise SBD deneyleri uygulamışlardır. İnşaat atıkları ile stabilize edilen killi zeminde yaklaşık iki kat bir iyileşme gözlenmiştir. Vural (2019), Sakarya'daki 1999 depreminde yıkılan binalardan elde edilen inşaat yıkıntı atıkları, kaolin ve kirecin farklı oranlardaki karışımları ile zemin iyileştirmesi gerçekleştirmiştir. Karışımlar hazırlanırken kireç %0 (referans), %5 ve %8 oranlarında, inşaat atığı %0 (referans) ile %23 arasında, kaolin ise %0 (referans) ile %72-100 aralığında olacak şekilde belirlenmiştir. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değerleri 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde llmştir. CBR deney sonuçlarına göre, en düşük değerler %3 inşaat yıkıntı atığı, %5 kireç ve %92 kaolin içeren karışımda elde edilirken, en yüksek CBR değeri ise %23 inşaat yıkıntı atığı, %5 kireç ve %72 kaolin içeren karışımda gözlemlenmiştir.

Yavaşcan (2010), bentonit ve kolsuz kilinin YFC ile stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmada, YFC katkı oranları %5, %10, %15, %20, %30 ve %50 olarak belirlenmiş ve stabilizasyon sonrası örneklerin kıvam limitleri, dane birim hacim ağırlığı ve kompaksiyon özellikleri değerlendirilmiştir. Bentonit kilinde kolsuz kile kıyasla daha fazla iyileşme sağlanmasına rağmen, her iki kil türü için de istenen düzeyde bir iyileşme elde edilememiştir. Bilgen (2011), bentonit ve düşük plastisiteli Uzuniftlik kilinin kireç ve elikhane cürufu ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Numunelerde eşme suyu ve deniz suyu kullanılarak çeşitli zemin deneyleri ve sismik ölçümler gerçekleştirilmiştir. 28 günlük kür sonunda, düşük plastisiteli kilde deniz suyu ile hazırlanan %5 kireç + %3,33 elikhane cürufu karışımıyla SBD değeri 16 kat artarken, yüksek plastisiteli bentonit kilinde %7,5 kireç + %3,33 cüruf katkısıyla 10 katlık bir artış sağlanmıştır. Kızırgil (2001), zemin stabilizasyonunda imento ve cürufun etkinliğini araştırmıştır. Aynı zemin yalnızca çimentoyla ve imento + cüruf karışımıyla stabilizasyon uygulanmıştır. Çimento katkısıyla zeminin dayanımının arttığı gözlemlenmiş, çimentonun bir kısmının crufla değiştirilmesi durumunda ise yakın mukavemet değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bilge (2011), bentonit zeminini iyileştirmek amacıyla YFC, uçucu kül, kireç ve zeolit kullanmıştır. %5, %10

ve %15 oranlarında katkılarla hazırlanan karışımlarda, 1., 7. ve 28. günlerde SBD değeri ölçülmüştür. En yüksek dayanım, 7. ve 28. günlerde %15 YFC + %15 zeolit katkısıyla elde edilmiş, bu karışım sade kile göre önemli oranda dayanım artışı sağlamıştır. Al-Khafaji ve ark. (2017) orta plastisiteli killi zeminin iyileştirilmesi amacıyla %3, %6, %9 ve %12 oranlarında YFC kullanarak stabilizasyon çalışması yapmışlardır. SBD testleri sonucunda, özellikle %6 YFC içeren karışımın, zeminin dayanımını yaklaşık %80 oranında artırdığı belirlenmiştir. Pathak ve ark. (2014), killi zeminin iyileştirilmesi amacıyla YFC kullanılmışlardır. YFC, zemine farklı oranlarda (%0-%25) eklenmiş ve çeşitli zemin deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar, YFC katkısının zeminin mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini, özellikle kuru birim hacim ağırlığını artırıp optimum su içeriğini düşürdüğünü göstermiştir. En başarılı sonuç %25 YFC kullanılan katkı oranında elde edilmiştir. Duyu ve ark. (2015) iki farklı zemine (black cotton soil ve red soil) farklı oranlarda YFC ekleyerek iyileştirme yapmışlardır. En uygun katkı oranı %20 ve %30 arası olarak belirlenmiştir. Siyah toprakta belirgin iyileşme olurken, kırmızı toprakta daha sınırlı etkiler gözlemlenmiştir. YFC ilavesiyle likit limit, plastik limit ve şişme indeksi azalmış ve özgül ağırlık değeri bir miktar artmıştır. SBD değeri YFC ilavesiyle artış göstermiştir. Son yıllarda, çimento ve kireç gibi geleneksel stabilizörlere alternatif olarak sağlamak amacıyla alkali aktivasyon temelli bağlayıcı sistemlerin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanımına yönelik araştırmaların yaygınlaştığı görülmektedir (Aydın, 2013; Phoo-Ngernkham ve ark., 2017; Shi ve ark., 2003; Turner ve Collins, 2013). Hibrit çimento, geleneksel OPC'nin ve alkali aktivasyonla oluşturulan bağlayıcıların (geopolimerlerin) özelliklerini birleştiren karma bir sistemdir. Hibrit çimentoda hem hidratasyon hem de alkali aktivasyon reaksiyonlarının aynı anda gerçekleştiği düşünülmektedir. Birçok avantajından dolayı son yıllarda hibrit çimentolara ilişkin çalışmaların yapıldığı görülmektedir (Amer ve ark, 2021; Askarian ve ark., 2018; Dener ve ark., 2025; Gutiérrez-Orrego ve ark., 2023; Valencia-Saavedra ve ark., 2021). Arun ve ark. (2019), zemin stabilizasyonunda alkali aktivatörler (SS ve SH) ile Prosopis Juliflora (PJ) bitkisini kullanmıştır. Bitki kabukları öğütülüp 75 mikron elekten geçirilmiş ve %5, %10, %15 oranlarında zemine karıştırılmıştır. Alkali çözeltiler 4, 8 ve 12 mol olarak hazırlanmıştır. PJ katkılarıyla toplam 9 farklı karışım elde edilmiştir. Numuneler 3, 7, 14, 21 ve 28 günlerde kürlenmiş ve SBD değerleri ölçülmüştür. En yüksek dayanım, %15 PJ katkısı ve 8 mol alkali aktivatör

kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu karışım doğal zemine göre yaklaşık 3,35 kat daha yüksek dayanım göstermiştir. Singhi ve ark. (2016), düşük plastisiteli kilin stabilizasyonunda YFC ve uçucu kül esaslı jeopolimerlerin zemin etkilerini araştırmıştır. YFC oda sıcaklığında yüksek dayanım sağlarken, uçucu kül ısıl kür ile yüksek dayanım göstermiştir. Bağlayıcı oranı arttıkça dayanım artmıştır. Abdullah ve ark. (2019), düşük ve yüksek plastisiteli iki killi zemini uçucu kül, YFC ve jeopolimerle stabilize etmiştir. Aktivatör olarak SS/SH (2,33 oranında) kullanılmış ve jeopolimer oranı %10 ve %20 olarak belirlenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kürler sonrası SBD ve konsolide drenajsız (CU) test üç eksenli basınç deneyi testleri uygulanmıştır. Düşük plastisiteli kil, yüksek plastisiteli kile göre daha yüksek dayanım göstermiştir. Geopolimer katkısıyla doğal zemine kıyasla dayanımda yaklaşık 6 kat artış sağlanmıştır. Ma ve ark. (2015), Şangay bölgesindeki yumuşak killi zeminlerin iyileştirilmesinde OPC, SS, SH, kalsiyum hidroksit, sodyum alüminant ve kalsiyum klorit (CC) kullanmışlardır. Çalışmada hem çimento hem de geopolimer bazlı katkıların farklı oranlarda kombinasyonları denenmiştir. Numunelerin SBD değerleri ölçülmüştür. %5 OPC + %1 SS + %2 SH/CC içeren karışımın en iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir. Genel olarak, geopolimer katkılı karışımların, sadece çimento kullanılan karışımlara kıyasla daha yüksek dayanım sağladığı gözlemlenmiştir. Xu ve Yi (2019), killi zeminlerin stabilizasyonunda pota fırın cürufu (LS) ve YFC'yi kullanmışlardır. LS:YFC oranları 0:10'dan 10:0'a kadar çeşitli kombinasyonlarla belirlenmiş ve bu karışımlar kile %20 ve %30 oranlarında eklenmiştir. Aynı katkı oranlarında OPC ile karşılaştırmalı deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, LS:YFC oranı 2:8 ve 5:5 arasında olan karışımlar, 56 günlük kür süresi sonunda OPC ile stabilize edilmiş zeminlere eşdeğer veya daha yüksek SBD değeri göstermiştir. Eskisar ve Aksu (2020), kil, killi kum ve kum zeminlerin tek fazlı jeopolimerizasyon yöntemiyle mukavemet değişimlerini incelemişlerdir. Çalışmada likit aktivatör oranları, içeriği, kür süresi ve donma-çözülme çevrimlerinin SBD değerine etkisi değerlendirilmiştir. Kum ve killi kum zeminlerde OWC miktarı kadar, killi zeminlerde ise bunun iki katı kadar aktivatör kullanıldığında dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. İki farklı aktivatör oranı (%90 SS + %10 SH ve %70 SS + %30 SH) kullanılmış ve dayanım gelişimi analiz edilmiştir. Doğru seçim ile likit aktivatörler, zemin mukavemetini 2,5-3 kat artırabildiğini ve daha yüksek dayanım için uçucu kül veya benzeri prekürsörlerin eklenebileceğini belirtmişlerdir. Ghadir ve Ranjbar (2018), düşük plastisiteli killi zemini iyileştirmek amacıyla geopolimer esaslı volkanik

kül ve OPC kullanmıştır. Çalışmada kür süresi, alkali aktivatör/kil oranı, aktivatör molaritesi ve volkanik kül/kil oranlarının etkisi incelenmiştir. Deneyler hem kuru hem de ıslak koşullarda gerçekleştirilmiştir. %15 katkı oranıyla, dayanım kuru koşullarda 2 MPa'dan 12 MPa'ya, ıslak koşullarda ise 0,2 MPa'dan 4 MPa'ya kadar artış göstermiştir. Geopolimer kuru koşullarda daha etkili bulunurken, OPC ıslak ortamlarda daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Bagewadi ve Rakaraddi (2015), killi zeminlerin iyileştirilmesinde alkali aktivatör olarak SS ve 12 molar SH içeren geopolimer sistemini kullanmıştır. Aktivatör oranı SS/SH = 2,5 olarak belirlenmiş ve numunelere 7, 15 ve 28 günlük kürler uygulanmıştır. Deneyler, geopolimerin hem basınç dayanımını hem de yoğunluğu artırdığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar geopolimerin yumuşak toprağı iyileştirmede başarılı olduğunu göstermiştir. Padmakumar ve ark. (2017), killi zeminlerin iyileştirilmesinde SS, 10 molar SH ve uçucu kül içeren geopolimer sistemini kullanmıştır. SS/SH oranları 40:60, 50:50, 70:30 ve 90:10 olarak belirlenmiş ve alkali aktivatörlerle aktive edilen uçucu kül zemine %30 oranında ilave edilmiştir. Ayrıca likit aktivatör/uçucu kül oranı 0,8 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, bu karışım oranlarıyla hazırlanan geopolimerin killi zeminin stabilizasyonunda etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ma ve ark. (2018), düşük plastisiteli killi zeminlerin stabilizasyonunda OPC, SS, SH ve kalsiyum klorür içeren farklı karışımlar kullanmışlardır. OPC yerine, daha çevreci bir alternatif olan CSCN (OPC, SS, kompozit promotör) katkısının performansı değerlendirilmiştir. CSCN içeren karışımlar hazırlanarak zeminlerin mekanik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar OPC ile karşılaştırılmıştır. Deneyler, CSCN katkısı arttıkça ve kür süresi uzadıkça stabilize zeminin dayanımında bir artış olduğunu göstermiştir. OPC'ye kıyasla daha az miktarda CSCN yeterli olmuştur. CSCN düşük miktarda kullanılsa bile zemini güçlendirdiğini ve çimentoya göre daha çevreci bir yöntem olduğunu göstermiştir. Sagnak (2018), tez çalışmasında bentonit ve kaolinit içeren iki farklı killi zemin stabilizasyonunda geri dönüştürülmüş alçı ve sıvı SS kullanmıştır. Zeminlerin stabilizasyonda yalnızca geri dönüştürülmüş alçı, yalnızca sıvı SS ve her ikisinin eşit miktarda karışımını kullanmıştır. Stabilizatörler zemine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında eklenmiştir. Hazırlanan numuneler 0, 3, 7, 14, 28 ve 56 günlük kürlere tabi tutulmuştur. Kür sonunda numunelerin SBD değerleri ölçülmüştür. SBD test sonuçlarına göre, tüm katkı türleri zemin dayanımında belirgin artış sağlamıştır. Bentonitli zeminde geri dönüştürülmüş alçı katkısı dayanımı yaklaşık 4 kat, sıvı SS

3,5 kat, her iki katkının karışımı ise 2,5 kat artırmıştır. Kaolinitli zeminde ise en yüksek dayanım artışı sıvı SS ve geri dönüştürülmüş alçı + SS katkılarında (yaklaşık 3,5 kat) görülürken, yalnızca geri dönüştürülmüş alçı ile yapılan iyileştirme 2,5 katlık bir artış elde edilmiştir. %6 oranındaki geri dönüştürülmüş alçı ve sıvı SS karışımı, her iki zeminde de en yüksek dayanım artışını sağlamıştır. Geri dönüştürülmüş alçı ve SS birlikte kullanıldığında zeminin dayanımının arttığı belirtilmiştir. Amulya ve ark. (2018), yol yapımında karşılaştıkları killi zeminin stabilizasyonuna yönelik, uçucu kül, YFC ve alkali aktivatör (SS ve SH) kullanmışlardır. YFC ve uçucu kül %20, %30 ve %40 oranlarında kullanılmış, SS/SH oranı ise sabit olarak 1,25 tutulmuştur. Karışımlar 3, 7 ve 28. günlerde SBD, standart ve modifiye proktor testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca CBR ölçümleri yapılmıştır. Alkali-aktive edilmiş zemin karışımları, YFC ve uçucu kül ile stabilize edilen zeminlere kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Khasib ve ark. (2021), yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda palmiye yağı yakıt külü (POFA) bazlı geopolimer kullanmışlardır. İyileştirmenin performansını ölçmek için SBD ve doğrudan kesme deneyleri yapılmıştır. POFA bazlı geopolimer miktarı arttıkça, zeminlerin hem kayma dayanımı hem de basınç dayanımı belirgin şekilde yükselmiştir. Özellikle %40 POFA içeren karışım, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde en yüksek dayanım değerlerine ulaşmıştır. Mikroyapı incelemeleri ise bu dayanım artışının, zemin içinde oluşan N-A-S-H jel yapılarından kaynaklandığını ortaya koymuştur. Zhang ve ark. (2013), killi zeminin stabilizasyonunda farklı oranlarda metakaolin bazlı geopolimer kullanmıştır. Stabilizasyonda geopolimer içeriği arttıkça basınç dayanımı ve young modülü artmış, büzülme miktarı azalmıştır. Mikroyapısal incelemelerde geopolimer jel oluşumu görülmüştür. Metakaolin bazlı geopolimerin killi zeminlerin iyileştirilmesinde etkili bir stabilizatör olduğu ifade edilmiştir. Xing ve ark. (2021), tuzlu zeminlerin iyileştirilmesinde farklı alkali aktivatörler ile aktive edilen YFC'nin performansı incelenmiştir. Aktivatörlerden SH ve kalsiyum hidroksit, tuzlu zeminin SBD değerini belirgin bir şekilde artırmıştır. Sodyum sülfat dayanımı kısmen arttırmış, sodyum karbonat ise etkili bir sonuç vermemiştir. SEM analizinde oluşan bağlayıcı fazlar ve kimyasal yapı, kullanılan aktivatöre göre değişkenlik göstermiştir. Kim ve ark. (2016), termik santrallerde kömür yakımıyla oluşan alt külü, alkali aktivatörler ile kullanarak kum zeminlerin stabilizasyonundaki etkisini incelemişlerdir. Alkali aktivatör olarak SS ve SH kullanmışlardır. SH konsantrasyonu ve SS/SH oranı arttıkça numunelerin dayanımı yükselirken, su miktarı arttığında ise dayanım azalmıştır. Pourakbar ve ark. (2024), killi zeminin stabilizasyonunda SS ve

SH ile aktive edilmiş arıtma çamurunu kullanmışlardır. SBD, doğrudan kesme, SEM, EDS ve FTIR testlerini uygulamışlardır. Alkali aktive yaklaşımı ile stabilize edilmiş killi zeminlerde SBD ve kohezyon değerlerinde artış gözlenmiştir. SEM görüntülerinde stabilize zeminde daha az boşluklu ve daha bütüncül yapı gözlenmiştir. Wang ve ark. (2023), şişen zeminlerin SH ile aktive edilmiş uçucu külün stabilizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada zemindeki şişmenin SH miktarının artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca geopolimerizasyon sonucunda kohezyon değerinin arttığını ve kayma mukavemetinin yükseldiğini belirtmişlerdir. XRD ve SEM analizinde ise C-S-H ve (C,N)-A-S-H oluşumlarını gözlemlemişlerdir.





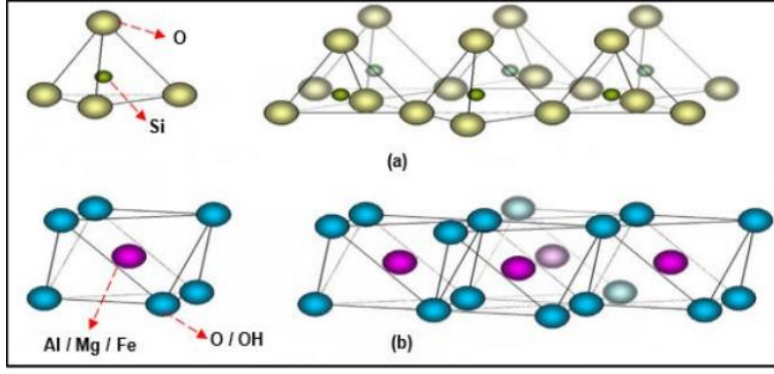
2. KILLİ ZEMİNLER VE ZEMİNLERİN KATKI MALZEMELERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Çalışmada kullanılan zemin oldukça yüksek ince oranına sahip olup, yüksek plastisite özelliği göstermektedir. Killi zemine uygulanan Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizleri sonucunda, zeminin mineralojik ve yapısal karakterizasyonu yapılmış ve kaolin ağırlıklı bir bileşime sahip olduğu belirlenmiştir.

2.1. Killi Zeminler

Kil, kayaçların fiziksel ve kimyasal süreçler sonunda ayrışması neticesinde oluşan, ince daneli ($<0,002$ mm), su ile temas ettiğinde şişme özelliğine sahip ve genellikle hidratlı alüminyum silikatlı zeminler olarak tanımlanmaktadır. Kil yapısı genellikle tabakalı olup su moleküllerini ve iyonlarını aralarına alabilir. Kil mineralleri doğada genellikle saf halde değil, çeşitli minerallerle karışık ve heterojen yapılar şeklinde bulunur. Temel kil mineralleri haricinde kuvars, kalsit, feldspatlar, prit gibi minerallerde bulunabilmektedir (Turan, 2015). Killer, oluşum yerlerine ve şekillenme süreçlerine göre, rezidüel kil ve taşınmış kil olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Rezidüel killer genellikle kimyasal ayrışma ürünü olup oluştukları kayaçların yerinde kalırlar. Taşınmış killer ise oluştuğu kaynaktan ayrılmış ve farklı bir ortamda birikmiş killerdir (Kumari ve Mohan, 2021).

Kil minerallerinin kafes yapıları temel olarak iki tür tetrahedron (düzgün dört yüzlü) ve oktahedron (düzgün sekiz yüzlü) yapısal birimden oluşmaktadır (Şekil 2.1). Oktahedral yapı oksijen ve hidroksil (OH^-) gruplarıyla çevrili iki tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakaların arasında alüminyum, magnezyum ya da demir atomları yer almaktadır. Bu atomlar, oksijen ve OH^- gruplarına simetrik olarak ve eşit uzaklıkta konumlanır. Tetrahedral yapı ise silisyum ve oksijen atomlarından oluşur. Bu yapıda bir Si atomu, dört oksijen atomuyla simetrik ve eşit uzaklıktadır. Yapıdaki denge için bazı durumlarda oksijen yerine OH^- da yer alabilir (Kök ve ark., 2023).



Şekil 2.1. Kıl minerallerinin kafes yapıları a) Tetrahedron ve b) Oktahedron (Kök ve ark., 2023).

Killer oktahedral ve tetrahedral tabaka sayılarına ve düzenleniş biçimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Tablo 2.1’de görüleceği üzere sınıflandırmada başlıca gruplar, tabakalı silikatlar, zincir silikatlar, seskioksitler ve diğer inorganik minarellerdir.

Tablo 2.1. Kıl minerallerinin sınıflandırılması (Kumari ve Mohan, 2021).

Kıl Mineralleri	Tabakalı Silikatlar	1:1 tipi	Kaolinit, Halloysit
		2:1 tipi	Smektit, Vermikülit, Mika, İllit
		2:1:1 tipi	Klorit
	Zincir Silikatlar		Paligorskit, Sepiyolit
	Seskioksitler	Kristalin	Metal oksitler, Metal hidroksitler
		Amorf	Allofan, İmogolit, Metal oksitler, Metal hidroksitler
Diğer Mineraller	Karbonatlar, Sülfatlar		

Kaolinit genellikle tropikal ve astropik iklim bölgelerinde, volkanik kayaların uzun süreli ayrışmasıyla meydana gelir. Klorit, özellikle denizel tortulların ve çökel kayaların bulunduğu metamorfik kayaç bölgelerinde oluşur ancak doğada yüksek miktarda bulunmaz. İllit, sıcak ve kurak bölgelerde yer alan çökel kayaların aşınması sonucu ortaya çıkar. Montmorillonit ise zayıf drenaj koşullarının hakim olduğu kurak alanlarda, volkanik kül ve kayaların ayrışmasıyla oluşur ve çoğu zaman illit ile birlikte bulunur (Genç, 2009).

Kıl yapısal olarak tabakalı (lamelli) kristal yapıda olup tetrahedral ve oktahedral tabakalardan oluşmaktadır. Tabakalar arasında farklı genişliklerde boşlukların

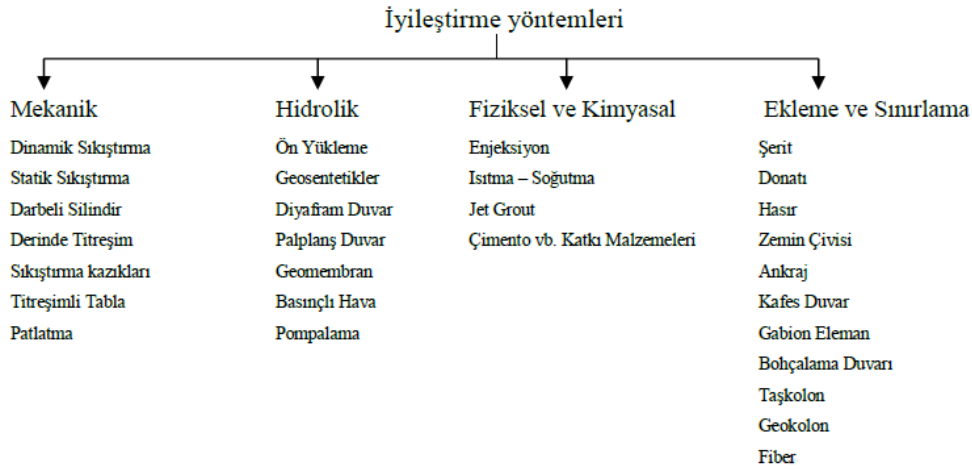
bulunması, kil minerallerine gözenekli bir yapı kazandırmaktadır. Yüzey ve yük özellikleri bakımından killer ortamdaki zıt iyonları kendine çeker ve yüksek absorpsiyon kapasitesine sahiptir. Absorpsiyon özelliği sayesinde yalnızca suyu değil, aynı zamanda organik molekülleri ve metal iyonlarını da bünyesinde tutabilir. Killer doğada oldukça yaygın bir halde bulunmakta ve aynı zamanda düşük maliyetli ve çevre dostudur (Kök ve ark., 2023; Kumari ve Mohan, 2021).

Killerin başlıca mühendislik özellikleri olarak konsolidasyon ve oturma, şişme davranışı ve hacim değişimi, permeabilite, kesme dayanımı ve taşıma kapasitesi sayılabilir. Kil, tüm zemin türleri arasında en düşük su geçirgenliğine sahip zemindir. Kil dane boyutunun çok küçük olması ve elektro-kimyasal etkileşimler nedeniyle gözeneklerindeki suyun geçişi oldukça yavaştır. Kilin düşük permeabiliteye sahip olması özellikle su sızdırmazlık istenen projelerde tercih edilmesini sağlamaktadır. Özellikle kil çekirdekli barajlarda, kompozit geosentetiklerde ve atık depolama alanlarında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Buna karşın kilin düşük permeabilitesi nedeniyle, dış yüklemeler altında suyun yavaşça dışarı çıkması, uzun süreli oturmalar ve gecikmeli hacim değişimlerine yol açmaktadır. Bu süreç konsolidasyon olarak tanımlanır. Kil tabakalarının konsolidasyon sonucu oturması, yapılarda farklı oturmalar sebebiyet verebilmektedir. Killi zeminler su ile temas ettiğinde genellikle hacim artışı göstermektedirler. Killi zemin kurutulduğunda ise hacminde azalma gözlenir ve genellikle yüzeyinde çatlaklar meydana gelir. Su ile temas ettiğinde çamur kıvamına gelir ve kolayca şekil verilebilir. Belli bir sıcaklıkta pişirildiğinde ise sertleşmekte ve dayanımında artış meydana gelmektedir (Önalp ve Arel, 2018). Killi zeminlerde kesme dayanımı kohezyon değerine ve içsel sürtünme açısına (genellikle düşüktür) bağlıdır. Su içeriği arttıkça genellikle kesme dayanım değeri azalmaktadır. Pekleşmiş ve katı killerde taşıma kapasitesi yüksek iken suya doymun yumuşak killerde taşıma kapasitesi düşüktür. Yumuşak kil mühendislik açısından en zayıf zemin sınıflarından birisidir. Aşırı konsolide killer yüksek taşıma kapasitesi gösterirken, normal konsolide killerin taşıma kapasitesi düşüktür ve yük altında fazla oturma yapabilmektedir.

2.2. Zeminlerin İyileştirilmesi

Zemin iyileştirmesi başlıca taşıma gücünü artırmak, oturmaları kontrol altına almak, permeabiliteyi düzenlemek, sıvılaşma riskini ve çevresel etkileri azaltmak, kaymaya

karşı direnci artırmak, inşaat süresini ve maliyeti azaltmak gibi amaçlar için yapılmaktadır. Araştırmacılar zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırmalarında farklı yaklaşım ve sınıflandırma sistemleri yapmışlardır. Bu sınıflandırmalarda, uygulama derinliği, yöntemin uygulanış biçimi, iyileştirmenin süresi ve zemin türü gibi ölçütlere bağlı olarak farklı yaklaşımlar ortaya konmaktadır. Hausmann (1990), zemin iyileştirme yöntemlerini mekanik, hidrolik, fiziksel ve kimyasal, ekleme ve sınırlama yoluyla iyileştirme olmak üzere dört ana gruba ayırmıştır. Şekil 2.2’de zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.2. Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması (Yıldırım, 2002).

Zemin iyileştirme yönteminin seçiminde, iyileştirmenin amacı, jeolojik yapı, zemin türü ve özellikleri, inşaat alanı, iyileştirme derinliği, yeraltı su durumu, iyileştirme süresi, yükleme türü ve büyüklüğü, ekonomik ve teknik uygulanabilirliği, çevresel durum ve güvenlik gibi koşullar ve parametreler dikkate alınmaktadır.

2.3. Zeminlerin Katkı Malzemesi Kullanılarak İyileştirilmesi

Zeminlerin katkı malzemesi kullanılarak iyileştirilmesi, zeminlere çeşitli bağlayıcı veya iyileştirici malzemelerin eklenmesiyle mekanik, fiziksel ve/veya kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesini hedefleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde zemin ile katkı maddesi arasında meydana gelen fiziksel etkileşim ve/veya kimyasal reaksiyonlar yoluyla zemin davranışının iyileşmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde başlıca kullanılan malzemeler; çimento, kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu (YFC), bitüm, asfalt, mikrobiyal, bitkisel katkıları ve nano malzemelerdir. Çimento ve kireç, katkı malzemesi ile gerçekleştirilen stabilizasyon çalışmalarında gelenekselleşmiş ve en yaygın kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, zeminle etkileşime girerek güçlü

bağlar oluşturmakta ve zemin özelliklerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Buna karşın çimento ve kirecin çevreye verdikleri zarar ve küresel ısınmaya katkıları nedeniyle kullanımı küresel ölçekte endişe yaratmaya başlamıştır. Bu nedenle son yıllarda çevre dostu yeni malzemelerin araştırılması giderek artmaya başlamıştır.

Çimento, zemin stabilizasyonu uygulamalarında yaygın olarak kullanılan başlıca malzemelerden biridir. Çimento, su ile karıştırıldığında gerçekleşen hidrasyon reaksiyonları sonucunda sertleşerek yüksek mukavemetli bir bağlayıcıya dönüşür. Çimento ile gerçekleşen zemin stabilizasyonunda oluşan bağlayıcı ürünler zemin daneleri arasındaki boşlukları doldurmakta ve etrafını sarmaktadır. Bağlayıcı özelliği olan bu yapılar sayesinde zeminin dağılması önlemekte ve mukavemet değerleri artmaktadır. Çimento her tür zeminin stabilizasyonunda kullanılabilir. Çimento ile stabilize edilen zeminin mukavemet kazanma süreci betonun dayanım kazanma sürecine oldukça benzerdir. Zemin sınıflarına göre çimento ihtiyacı farklılık gösterebilmektedir (Tablo 2.2). Granüler zeminlerde çimento stabilizasyonu en iyi sonuçları verirken, bu tür zeminler için gereken çimento miktarı da genellikle düşüktür.

Tablo 2.2. Zemin sınıflarına göre çimento miktarı (Tunç, 2002).

AASHTO (Zemin Sınıfı)	USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıfı)	Ağırlıkça tipik çimento içeriği (%)	Çimento ihtiyacı sınırları (%)	
			Hacimce	Ağırlıkça
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	5	5-7	3-5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	6	7-9	5-8
A-2	GM, GC, SM, SC	7	7-10	5-9
A-3	SP	9	8-12	7-12
A-4	CL, ML	10	8-12	7-12
A-5	ML, MH, CH	10	8-12	8-13
A-6	CL, CH	12	10-14	9-15
A-7	MH, CH	13	10-14	10-16

Kireç, Çin'deki lös zeminlerin iyileştirilmesinde ve Romalıların yol yapım çalışmalarında kullanılan, bilinen en eski zemin stabilizatörlerinden biridir. Kireç stabilizasyonunda genellikle sönmüş kireç (hidrate kireç) kullanılmaktadır. Sönmemiş kireç ise yakıcı ve tehlikeli özelliklerinden dolayı tercih edilmemektedir (Tumluer, 2006). Kireç özellikle ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılan etkili bir

katkıdır. Kireç, kil parçacıkları ile hızlı bir kimyasal etkileşime girerek zeminin özelliklerini değiştirmektedir. Zemin ile kireç arasındaki reaksiyon mekanizmasında, katyon değişimi, flokülasyon, aglomerasyon, puzolanik reaksiyonlar ve karbonatlaşma süreçleri gerçekleşmektedir (Cömert ve Ural, 2015; Peethamparan, 2006). Katyon değişimi ve flokülasyon-aglomerasyon kısa dönemde gerçekleşirken, puzolanik reaksiyonlar uzun vadeli iyileşmelerde gözlenmektedir. Reaksiyonlar, çevre koşullarının etkisiyle zamanla gelişir ve bu süreç ile stabilize zeminin mukavemetinde artış meydana gelir. İçeriğinde silis ve alüminyum bulunması nedeniyle kil, puzolanik reaksiyonlar için uygun bir malzeme olarak kabul edilir (Önalp, 1997). Kireçle yapılan stabilizasyon, zeminin dayanımını artırırken, kabarma ve şişme sorunlarını da azaltmaktadır. Özellikle killi zeminlerde ve yol yapımında sıkça kullanılmaktadır (Özaydın, 2000). Tablo 2.3'te zemin türlerine göre kullanılabilecek kireç yüzdesi görülmektedir. Organik zeminlerde kireç yeteri kadar puzolanik reaksiyona girmediğinden dolayı tavsiye edilmez. Sade kumlarda reaktif mineral olmadığı için kireç gereği kadar reaksiyon oluşturmaz. Plastik olmayan veya düşük plastisiteli zeminlerde kireç tek başına genellikle yeterli olmayabilir. Böyle durumlarda uçucu kül eklenerek zeminle kireç arasında reaksiyon sağlanabilir. İnce malzemesi az olan zeminlerde ise kireç, çimento ve uçucu kül birlikte kullanıldığında daha iyi sonuçlar alınabilmektedir (Tumluer, 2006).

Tablo 2.3. Zemin cinslerine göre kullanılabilecek kireç yüzdesi (Tunç, 2002).

Zemin Cinsi	Zeminin ağırlıkça yüzdesi olarak
İyi derecelenmiş çakıl	3
Kumlar	Tavsiye edilmez
Kumlu kil	5
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10
Organik zemin	Tavsiye edilmez

Bitüm ile stabilizasyonda özellikle su geçirimsizliği sağlamak, zeminin dayanımını artırmak, daneleri birleştirmek ve suya karşı direnç oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır. Asfalt, ince daneli zeminlerde suya karşı koruma sağlarken, iri daneli zeminlerde kohezyon kazandırır ve ayrıca danelerin birbirine yapışmasını sağlayarak

su ve rüzgar erozyonuna karşı direnci artırır (Özaydın 2000; Tumluer, 2006). Bitümle gerçekleştirilen stabilizasyonda, çimento ve kireç gibi kimyasal bir reaksiyonla gerçekleşen bağ oluşmaz, sadece fiziksel bir yapıştırıcı ve kaplama etkisi meydana gelir.

Uçucu kül, kömür yanmasıyla oluşan çok ince, puzolanik özellik gösteren yan sanayi ürünüdür. Bu kül parçacıkları elektrostatik filtreler ile yakalanarak atmosfere karışmaları ve çevreye zarar vermeleri önlenmekte, depolanarak çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Uçucu küller kimyasal bileşimlerine göre C ve F tipi olarak iki sınıfa ayrılmaktadır (ASTM C618, 2000). F tipi uçucu kül, bitümlü kömürden elde edilmekte olup düşük kireç içeriğine sahiptir. Bu nedenle kendi başına çimentolaşma özelliği zayıf olup reaksiyonun gelişmesi için dışarıdan kireç eklenmesi gerekebilir. C tipi uçucu kül ise kömür veya linyitten elde edilmekte ve daha fazla kireç içermektedir. Kireç içeriğinden dolayı C tipi uçucu külde reaksiyon hızlıca meydana gelmekte ve bağlayıcılık oluşmaktadır (Tumluer, 2006). Uçucu küllerin inceliği ve bileşimi puzolanik reaksiyonları etkilemektedir. Uçucu kül fiziksel olarak ince daneli ve küresel yapıli partikülleri sebebiyle zemin boşluklarına dolmakta ve zeminin granülometrisini iyileştirmektedir. Uçucu külde reaksiyonlar geç başlamasına karşın uzun dönemde yüksek dayanım göstermektedir. Uçucu kül ile yapılan zemin stabilizasyonu, zeminin mukavemetini artırırken plastisiteyi azaltır, şişme ve kabarma etkisini düşürür, ayrıca geçirimsizliğı artırır (Aruntaş, 2006; Aytekin, 2009; Totiç ve ark., 2019). Ülkemizde Afşin-Elbistan, Çatalağızı, Seyitömer, Soma, Tunçbilek ve Yatağan gibi termik santrallerde uçucu kül oluşmaktadır. Uçucu küller, çimento üretiminde, agrega olarak, betonda, kerpiç ve tuğla yapımında ve geoteknik çalışmalarda kullanılmaktadır.

Bahsi geçen stabilizörlerinden başka araç lastiklerinin, reçinelerin, atık çamurların, granüler kauçuğun, mermer tozu, değirmen artığı, kloritlerin ve doğal atık kökenli katkıların kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca kireç-çimento, çimento-uçucu kül, kireç-uçucu kül, cüruf-bentonit-kireç gibi malzemelerde birlikte kullanılarak zemin stabilizasyonunda kullanılmaktadır.

Son yıllarda zeminlerin stabilizasyonunda nano malzemelerin, biyolojik ajanların, polimer esasli katkıların ve geopolimer mekanizmalarının kullanıldığı görülmektedir. Nano-malzemeler, zeminin mikroyapısına etki ederek iyileştirme gerçekleştirmektedir. Nano boyuttaki partiküller veya lifler reaktivite sonucu zemin

özelliklerinde önemli derecede iyileştirmeler gösterebilmektedir. Nano-silika, nano-kil, nano-alümina vs. gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler hem fiziksel hem de kimyasal etkileşimleri ile zeminde iyileştirmeler meydana getirmektedir (Alireza ve ark., 2013; Haeri ve Valishzadeh, 2021; Majeed ve Taha, 2013).

Biyolojik zemin stabilizasyonunda mikroorganizmalar ve enzimler gibi biyolojik kökenli ajanları kullanarak zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu stabilizasyon alanında özellikle mikrobiyal kaynaklı kalsit çökmesi (Microbial-Induced Calcite Precipitation, MICP), enzim indüklemeli kalsit çökmesi (Enzyme-Induced Calcite Precipitation, EICP) ve biopolimer enjeksiyonu gibi yaklaşımlar bulunmaktadır (Almajed ve ark., 2021; Latifi ve ark., 2017). MICP yaklaşımında bakteriler ile üretilen kalsiyum karbonat kristalleri zemin daneleri arasında birikerek zemine mukavemet kazandırmaktadır. Enzim bazlı stabilizasyon yaklaşımında ise enzimler zemindeki minarellerle etkileşerek daneleri birbirine bağlamakta ve zeminin dayanım değeri artmaktadır (Ahenkorah ve ark., 2021; Gebru ve ark., 2021).

Sentetik veya doğal polimerler zemindeki parçacıkların etrafını sararak birbirine bağlamakta ve zeminin mukavemetini artırmaktadır. Ayrıca su geçirimsizliği, esneklik, çatlama direnci ve erozyona karşı zeminin direnci de olumlu yönde etkilenmektedir. En sık kullanılan polimerler arasında akrilik polimerler, polivinil asetat ve poliüretan köpükler sayılabilir. Geçirimsiz killerde ve organik zeminlerde iyi performans göstermeyebilir (Ghith ve ark., 2024; Huang ve ark., 2021; Rezaeimalek ve ark., 2017; Zumrawi ve Mohammed, 2019).

3. MALZEMELER VE YÖNTEM

Bu çalışmada zemin olarak yüksek plastisiteli Ukrayna kili, alüminosilikat kaynağı olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), Portland çimentosu (OPC) ile ÖYFC karışımı (hibrit cüruf/çimento) ve alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) kullanılmıştır. Killi zeminin stabilizasyonunda kullanılan karışımların etkisini değerlendirmek amacıyla belirli oranlarda OPC, referans malzeme olarak seçilmiştir.

3.1. Ukrayna Kilinin Kimyasal, Fiziksel ve İndeks Özellikleri

Çalışmada kullanılan killi zemin Bilecik ili, Bozüyük ilçesinde faaliyet gösteren Esan Eczacıbaşı Endüstriyel Hammaddeler San. ve Tic. A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Bu zemin Ukrayna'nın Donbas (Donetsk) bölgesindeki Miosen yaşlı çökellerin oluşturduğu havzadan çıkarılmaktadır (Mariani, 2010; Murray, 2006). Çeşitli alanlarda hammadde olarak kullanılan Ukrayna kili, oldukça yüksek oranda kil içeriğine sahiptir (Zanelli ve ark, 2015).

3.1.1. Kimyasal özellikleri

Çalışmada kullanılan Ukrayna kilinin kimyasal özellikleri, tedarikçi firma tarafından sağlanan verilere dayanarak Tablo 3.1'de sunulmuştur. Kilin kimyasal bileşiminde, %59,71 oranıyla en büyük yüzde silisyum dioksit (SiO_2) aittir. SiO_2 , cam üretimi, seramik, yapı malzemesi ve kimya endüstrisi gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. SiO_2 'den sonra %27,20 ile alüminyum oksit (Al_2O_3) en büyük yüzdeye sahip olduğu görülmektedir. Diğer bileşiklerin kildeki yüzdesi ise %2'nin altındadır. Numunedeki kızdırma kaybı (K.K. Lost on ignition, LOI) %7,62 olarak belirlenmiştir. Firma tarafından temin edilen numunedeki su muhtevası %19,1 olarak ölçülmüştür.

3.1.2. Fiziksel ve indeks özellikleri

Çalışmada kullanılan zeminin yüksek kil içeriği ve özellikle mineral bileşiminden dolayı rengi beyaza yakın bir ton göstermektedir (Şekil 3.1). Kilin temel fiziksel, indeks, hidrolik ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, özgül

ağırlık, kıvam limitleri, standart Proktor deneyleri, permeabilite, ultrasonik darbe hızı (UPV) ve serbest basınç dayanım (SBD) deneyleri yapılmıştır.

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan Ukrayna kilinin kimyasal bileşimleri.

Kimyasal İçerik	Yüzdesi (%)
Silisyum dioksit (SiO_2)	59,71
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	27,20
Titanyum dioksit (TiO_2)	1,31
Potasyum oksit (K_2O)	1,81
Magnezyum oksit (MgO)	0,49
Demir oksit (Fe_2O_3)	0,96
Kalsiyum oksit (CaO)	0,44
Sodyum oksit (Na_2O)	0,41
Kızdırma kaybı (K.K., LOI)	7,62
TOPLAM	99,95

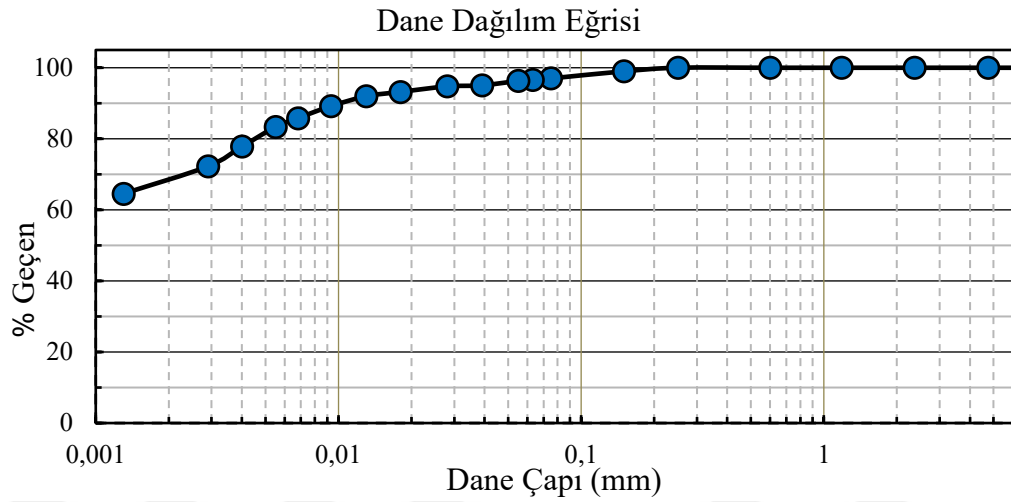


Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kil malzeme.

3.1.2.1. Elek analizi ve hidrometre deneyleri

Çalışmada ilk olarak zeminin dane dağılım eğrisinin elde edilmesi için elek analizi ve hidrometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elek analizi için TS1900-1, hidrometre deneyi için ise ASTM D7928-17 standartları kullanılmıştır. Deney için yeterli miktarda zemin numunesi alınarak 105 °C'lik etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutulan numune, #200 eleğe konularak üzerine yavaşça su eklenip yıkama işlemi

yapılmıştır. Yıkama işlemi su berraklaşana kadar tekrarlanmıştır. Böylece ince parçacıklar elekten geçerken, iri daneler üstte kalmıştır. Eleklerin üzerinde kalan zemin kurutulmuş ve tartılmıştır. Kalan malzeme ağırlıkları ve hata payları dikkate alınarak deney formuna işlenmiş ve geçen yüzdeleri bulunmuştur. #200 elekten geçen zemin için hidrometre deneyi gerçekleştirilmiştir. Hidrometre okumalarına sıcaklık, menisküs ve ayrıştırıcı madde düzeltmeleri uygulanmıştır. Elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda çalışmada kullanılan zeminin dane dağılım eğrisi elde edilmiştir (Şekil 3.2). Çalışmada kullanılan killi zeminde organik madde görülmemiştir.



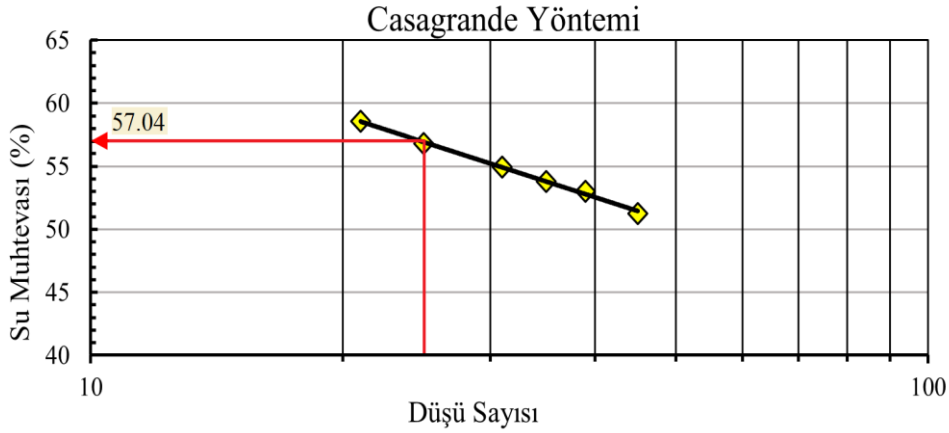
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan zeminin dane dağılım eğrisi (Yıldırım ve ark., 2024).

Elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucu elde edilen dane dağılım eğrisine göre çalışmada kullanılan zeminde çakıl bulunmamaktadır. Dane dağılım eğrisine göre zeminin %3'ü kumdan, %97 ise kil ve siltlerden oluştuğu görülmektedir. Kil oranı %68 olup, silt oranı %29'dur. Buna göre zemin ince daneli olarak nitelendirilmiştir.

3.1.2.2. Kıvam limitleri deneyleri

Zemin sınıfının ve kıvam limitlerinin belirlenmesi için likit limit (LL) ve plastik limit (PL) deneyleri yapılmıştır. İnce daneli zeminlerin mühendislik davranışları içerdikleri su muhtevasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Zeminler çok katı kıvamdan viskoz bir sıvı kıvama kadar farklı miktarlarda su muhtevasına sahip olabilmektedir. Atterberg (1911) tarafından LL, kohezyon limiti, yapışma limiti, PL ve büzülme limiti olmak üzere 5 ayrı kıvam limiti tanımlamıştır. Bu kıvam limitlerinden mühendislik çalışmalarında en çok LL ve PL değerleri kullanılmaktadır. Zeminin LL değerini belirlemek amacıyla Casagrande yöntemi uygulanmıştır. Killi zeminin Casagrande

deneyleri sonucunda elde edilen su muhtevası ve düşü sayısının grafiği çizilerek LL değeri 57,04 olarak bulunmuştur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan zemine ait Casagrande yöntemiyle elde edilen LL grafiği.

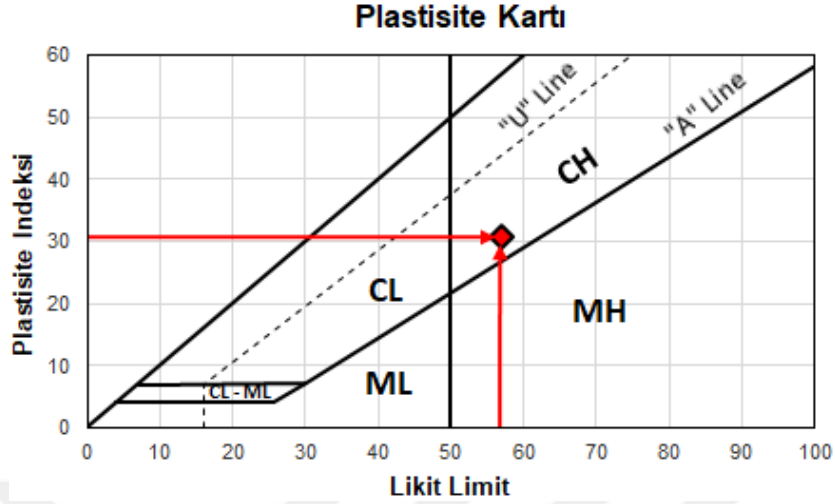
PL deneyleri için başlıca cam plaka, terazi, karıştırma ıspatulası, su içeriğini ölçmek için kaplar, etüv ve terazi kullanılmıştır. Numune cam levha üzerinde avuç içi ve cam arasında bir ipçik meydana getirecek şekilde yuvarlanmış ve 3 mm çapındaki numunenin çatlayıp birkaç parçaya ayrılıncaya kadar devam edilmiştir. Elde edilen parçaların su muhtevası ölçülerek PL değerleri belirlenmiştir. PL deneyinden elde edilen veriler Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Çalışmada kullanılan kile ait PL deney sonuçları.

Plastik Limit		
Kap No	K-8	K-32
Kap (g)	21,16	28,9
Kap + Yaş Numune (g)	31,48	36,24
Kap + Kuru Numune (g)	29,32	34,73
Su Muhtevası (%)	26,47	25,90

PL deney sonuçlarına göre zeminin PL değeri 26,19 olarak belirlenmiştir. Zemin sınıflandırması ve tipinin belirlenmesi amacıyla elde edilen LL ve PL değerlerinin farkı alınarak zeminin plastisite indis (PI) değeri 30,85 olarak hesaplanmıştır. LL ve PI değerleri Şekil 3.4’te görülen plastisite kartına işlenmiştir. Çalışmada kullanılan

zemin, dane dağılım grafiği, LL, PL değerleri ve plastisite kartı bulgularına göre yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfına girmektedir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan zeminin LL ve PI değerlerinin plastisite kartı üzerindeki yeri.

3.1.2.3. Özgül ağırlık deneyi

Özgül ağırlık (G_s), geoteknik anlamda zeminin dane birim ağırlığının, suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanmakta olup boyutsuz bir değerdir. Zeminlerin özgül ağırlık değerlerini ölçmek için başlıca piknometre, desikatör, etüv ve hassas terazi kullanılmaktadır. Piknometre içerisindeki zeminin boşluklarında sıkışmış halde hava bulunmaktadır. Bu havanın çıkartılması deneyin en önemli aşamalarından biridir. Bu havayı almak için vakum desikatör kullanılmaktadır. Desikatör çalıştırıldıktan sonra piknometre içindeki zemin-su karışımından hava kabarcıkları çıkmakta ve hava çıkması durana kadar işlem devam etmektedir. Deneyde ilk olarak numune ve piknometre şişesi kurutulmuştur. Boş ve kurutulmuş piknometrenin ağırlığı (M_1), su ile doldurulmuş piknometrenin ağırlığı (M_2), numunenin piknometreye konulmasının ardından piknometre + numune ağırlığı (M_3) ve numune piknometreye konulduktan sonra üzerine su eklenmesiyle oluşan piknometre + numune + su ağırlığı (M_4) ölçülmüştür. Tablo 3.3'te Ukrayna kili için yapılan ölçüm değerleri görülmektedir. Verilen ölçüm değerleri kullanılarak, numunenin özgül ağırlığı denklem 3.1 ile hesaplanmıştır.

$$G_s = \frac{M_3 - M_1}{(M_2 - M_1) - (M_4 - M_3)} \times \gamma_{su} \quad (3.1)$$

Tablo 3.3. Çalışmada kullanılan killi zeminin özgül ağırlık deney sonuçları.

Numune	Sıcaklık (°C)	Kütle (g)				Gs	Gs Ortalama
		Piknometre (M1)	Piknometre + Su (M2)	Piknometre + Numune (M3)	Piknometre + Numune + Su (M4)		
1	20	156,9	675,22	254,51	736,39	2,68	
2	20	158,8	682,09	257,99	744,13	2,67	2,67
3	20	156,82	679,74	252,51	739,61	2,67	

Çalışmada kullanılan killi zemin için üç özgül ağırlık deneyi yapılmış ve her bir deney için hesaplanan özgül ağırlık değerlerinin ortalaması alınarak zemin numunesinin nihai özgül ağırlık değeri 2,67 olarak bulunmuştur.

3.1.2.4. Standart sıkıştırma (kompaksiyon) deneyleri

Mevcut zemin veya başka bir bölgeden alınarak inşaat alanına doğrudan gelişi güzel dökülen zeminler düşük mukavemetli, gevşek, su geçirimsizliği ve boşluk oranı yüksek bir yapıya sahip olabilmektedir. Böyle zeminlerdeki oturmaları azaltmak, taşıma kapasitesini artırmak, geçirimsizliği düşürmek, şişme ve büzülme kontrolünü sağlamak, dinamik yüklere karşı dayanım kazandırmak ve ayrıca inşaat maliyetinin azaltılması amacıyla sıkıştırma işlemine ihtiyaç duyulabilmektedir. Zeminde sıkıştırma işlemi ile boşluk oranı azalmakta, zeminin birim hacim ağırlığı artmakta ve zeminin mühendislik özellikleri iyileştirilmektedir. Zeminlerin sıkışmasına etki eden başlıca faktörler; zeminin cinsi, dane dağılımı, en büyük dane çapı, su muhtevası, sıkıştırma enerjisi, sıkıştırma vasıtasının özellikleridir (Coduto ve ark, 2011; Kolymbas ve Fellin, 2000). Laboratuvar ortamında zeminlerin sıkışma özelliklerini belirlemek amacıyla proktor testleri yapılmaktadır. Sıkıştırma testlerinde, standart Proktor ve modifiye proktor olmak üzere iki farklı test türü uygulanmaktadır. Bu testler arasındaki temel fark uygulanan enerji miktarıdır.

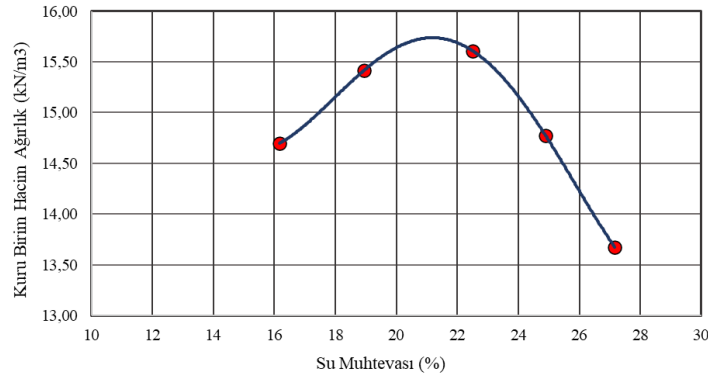
Bu çalışmada standart Proktor testleri uygulanmıştır. Bu testte zemin 3 eşit ağırlıkta tabaka halinde serilerek, her bir tabaka için 305 mm yüksekten serbest düşüş yapan 2,5 kg'lık tokmakla 25 vuruşta sıkıştırılmıştır. Zemin 6 farklı su muhtevasında hazırlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Denklem 3.2 ve 3.3 kullanılarak zemin numunelerinin yaş birim hacim ağırlıkları ve kuru birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır.

$$\gamma_n = \frac{M2 - M1}{V} \times 9,81 \quad (3.2)$$

Burada, γ_n , doğal birim hacim ağırlık olup birimi kN/m^3 'tür. M2, kalıp + taban + yaş numune ağırlığı ve M1 ise kalıp + taban ağırlığıdır. V ise kalıbın iç hacmini göstermektedir.

$$\gamma_k = \frac{100 \times \gamma_n}{100 + \omega} \times 9,81 \quad (3.3)$$

Burada, γ_k , kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3) ve ω ise su muhtevasını ifade etmektedir. Kalıp hacmi cm^3 ve ağırlık değerleri g cinsinden ölçülmüş olup birimi kN/m^3 olarak ifade etmek için 9,81 değeri ile çarpılmıştır. Her bir numune için ayrıca su içeriği hesaplanmıştır. Şekil 3.5'te çalışmada kullanılan zeminin standart Proktor deneyleri sonucunda hesaplanan kuru birim hacim ağırlık ile su muhtevası ilişkisine ait eğri (kompaksiyon eğrisi) görülmektedir. Zeminlerin sıkılaştırılmasında su içeriği zemin danelerindeki bağlanmayı ve özellikle zemin daneleri arasındaki hareketi sağlamaktadır. Optimum su miktarı sayesinde zemin daneleri sıkı bir şekilde düzenlenmektedir. Çalışmada kullanılan killi zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) değeri $15,7 \text{ kN/m}^3$ ve optimum su muhtevası (OWC) ise %21,6 olarak tespit edilmiştir.

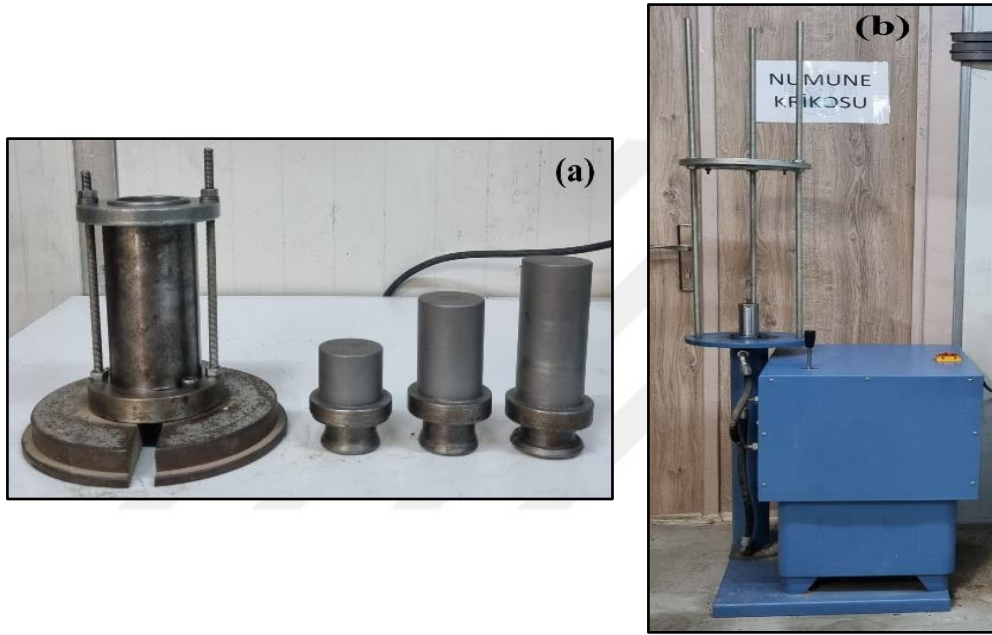


Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan zeminin kompaksiyon eğrisi.

3.1.2.5. Serbest basınç dayanım (tek eksenli) deneyi

Serbest basınç dayanım deneyi, genel anlamda zeminlerin eksenel doğrultuda üzerine gelecek yük karşısında gösterdiği mukavemeti ölçmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu deney yanal bir destek almaksızın kendini dik olarak tutabilen kohezyonlu zeminler ve özellikle doygun killi zeminlerde uygulanabilmektedir. Deneyde zemin yanal bir etkiye maruz kalmamakta sadece eksenel doğrultuda yük uygulanmaktadır. Bu

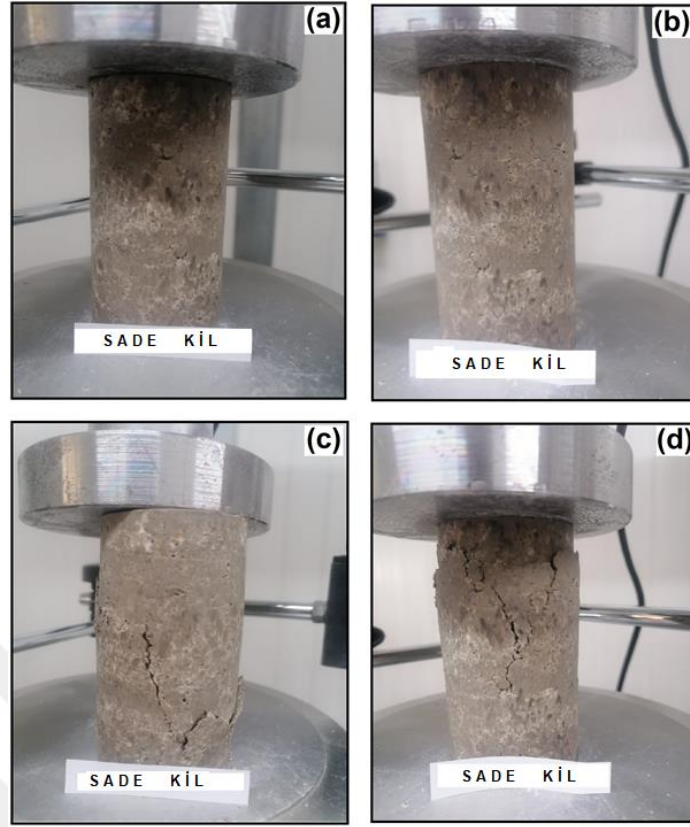
çalışmada eksenel yükleme karşısında zeminde meydana gelen birim boy kısalması ölçülerek gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. SBD deneyi için numuneler standart Proktor testiyle elde edilen MDD ve OWC değerleri kullanılarak hazırlanmıştır. SBD deneyi için numunelerin hazırlanmasında özel olarak tasarlanmış bir kalıp kullanılmıştır (Şekil 3.6.a). Zemin özel olarak tasarlanmış kalıba üç katman halinde serilerek sıkıştırılmıştır. Hazırlanan zemin numunesi çıkarma krikosu kullanılarak kalıptan çıkartılarak çap ve boyu ölçülerek hesaplamalar için karneye yazılmıştır. Şekil 3.6.b’de numune çıkarma krikosu görülmektedir.



Şekil 3.6. Numune hazırlamada kullanılan başlıca ekipmanlar a) Özel olarak tasarlanmış silindirik numune hazırlama kalıbı b) Numune çıkarma krikosu.

Numune hazırlama kalıbının özelliklerine göre numunenin çapının yaklaşık 5 cm, boyunun ise 10 cm olması beklenmektedir. SBD deneyleri için aynı numuneden üç adet örnek hazırlanarak teste tabi tutulmuştur. Deney düzeneğindeki ring saatinin hassasiyeti 0,002 mm ve deformasyon saatinin hassasiyeti ise 0,01 mm’dir. Yükleme hızı 1,00 mm/dk, ring katsayısı 100 kgf’dir. Şekil 3.7. a ve b’de hazırlanan killi zemin numuneleri, Şekil 3.7. c ve d’de ise test sonucunda yenilmeye uğramış numuneler görülmektedir.

SBD deneyleri öncesinde numunelerin kütlesi, çapı ve yüksekliği ölçülmüştür. Numunelerin boyutlarından alan ve hacim hesapları, kütle değerinden ise yaş birim hacim ağırlık ve kuru birim hacim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca numunelerin SBD deneyi tamamlandıktan sonra su muhtevası bulunmuştur.



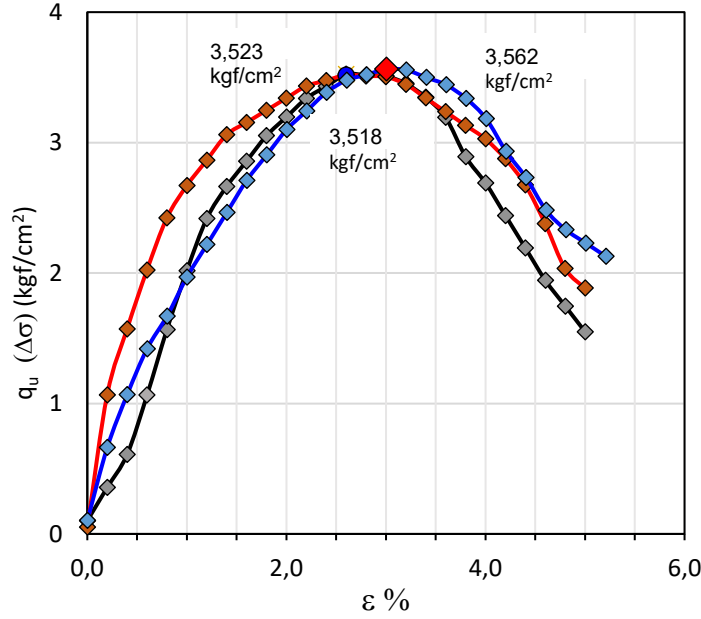
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan killi zeminin serbest basınç dayanım testi. a) ve b) Serbest basınç dayanım testi için hazırlanan zemin numuneleri, c) ve d) ise serbest basınç dayanım deneyi sonrası yenilmeye uğramış zemin numuneleri.

Killi zeminin doğal haldeki SBD değerini belirlemek amacıyla, standart Proktor deneyi sonucunda elde edilen OWC ve MDD değerleri esas alınarak, el yordamıyla üç aşamada sıkıştırılarak üç silindirik numune hazırlanmıştır. Bu numunelere herhangi bir işlem ve kütleme yapılmamıştır. Tablo 3.4'te işlem görmemiş Ukrayna kiline ait numuneler için SBD deney sonuçları görülmektedir.

Tablo 3.4. Çalışmada kullanılan kilin serbest basınç dayanım deney sonuçları.

Numune No	Çapı (cm)	Yüksekliği (cm)	Yaş Kütlesi (g)	Yaş BHA (kN/m^3)	Kuru BHA (kN/m^3)	Deney sonu su içeriği	Maks. $\Delta\sigma_1$ (kgf/cm^2)	Serbest basınç dayanımı (kN/m^2)
1	5,00	10,00	384,46	19,22	15,83	21,37	3,523	345,527
2	5,00	10,00	383,06	19,11	15,76	21,29	3,518	344,978
3	5,00	9,98	383,23	19,21	15,84	21,25	3,562	349,357
Ortalama				19,18	15,81	21,30	3,534	346,621

Şekil 3.8’de çalışmada kullanılan killi zeminin eksenel gerilmeye karşılık yüzde birim boy değişim grafiği görülmektedir. Yenilme anındaki en büyük gerilme değeri SBD değerini ifade etmektedir. Killi zemin numunelerinin SBD değerleri 3,523 kgf/cm², 3,518 kgf/cm² ve 3,562 kgf/cm² olarak ölçülmüştür. Bu değerlerin kN/m² birimi karşılığı ise sırasıyla 345,527, 344,978 ve 349,357 olarak hesaplanmış ve ortalaması ise 346,621 kN/m² olarak bulunmuştur.



Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan killi zemine ait numunelerin serbest basınç dayanım deneyleri, numunelerin eksenel gerilmeye karşılık yüzde birim boy değişimini grafikleri.

3.1.2.6. Permeabilite deneyi

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin su geçirgenliğinin nicel ölçüsünü belirlemek amacıyla permeabilite deneyleri uygulanmakta ve bu doğrultuda permeabilite katsayısı hesaplanmaktadır. Permeabilite katsayısının belirlenmesinde laboratuvarda sabit seviyeli geçirgenlik ve düşen seviyeli geçirgenlik deneyleri, arazide ise sondaj deliği ve pompalama deneylerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Permeabilite katsayısının belirlenmesinde laboratuvar ve arazi yöntemlerinin yanı sıra konsolidasyon ve ampirik bağıntılar kullanılarak dolaylı olarak hesaplanabilmektedir. Killi zeminin permeabilite katsayısının belirlenmesinde düşen seviyeli permeabilite testi uygulanmıştır. Bu deney sisteminde zamana bağlı olarak zemin içerisinden geçen su miktarı, boru içerisindeki su seviyesindeki düşüş gözlemlenerek permeabilite katsayısı hesaplanmaktadır. Şekil 3.9’da çalışmada kullanılan permeabilite test sistemi görülmektedir.



Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan düşen seviyeli permeabilite test sistemi.

Permeabilite testi için özel permeabilite test kalıpları hazırlanmıştır. Zemin numunesi kalıplara Proktor sıkılığında ve OWC değerinde 3 aşamada yerleştirilmiştir. Kalıplardaki numunenin çapı ve boyu 10 cm'dir. İlk olarak kalıp içerisindeki zemin numunesi doygun hale getirilmiş ve kalıp dikey borulara bağlanmıştır. Dikey borular belirli bir seviyeye kadar su ile doldurulmuştur. Süre kaydedilerek sistem açılarak dikey borudaki suyun akmasına ve zemin içerisinden geçmesine izin verilmiştir. Alt seviyeye düşmesi için gereken süre kaydedilmiştir. Numunelerin permeabilite katsayısı denklem 3.4 ile hesaplanmıştır.

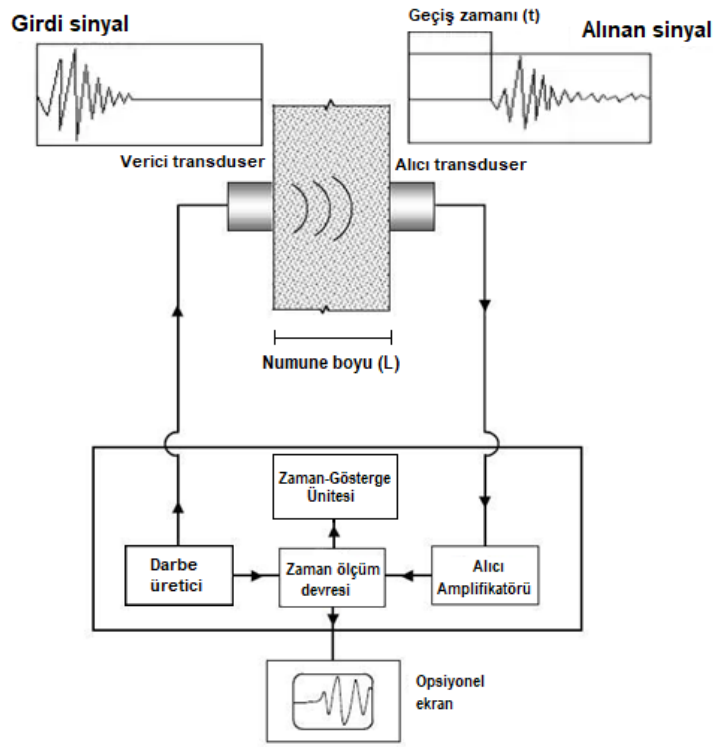
$$k = 2,303 \times \frac{a \times L}{A \times \Delta t} \log_{10} \times \frac{h_1}{h_2} \quad (3.4)$$

Bu denklem de L; zemin numunesinin boyunu, A; numunenin kesit alanını, a; dikey borunun en kesitini alanını, h_1 ; permeabilite testi başlamadan önceki su seviyesini, h_2 ; testin bitimindeki su seviyesini ve Δt ise suyun numune içerisinden akması için geçen süreyi ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan zemin yüksek plastisite özelliği gösteren kil olduğundan dolayı permeabilite testi oldukça uzun sürmüştür. Çalışmada kullanılan killi zeminin permeabilite katsayısı $2,89 \times 10^{-8}$ m/s olarak hesaplanmıştır.

3.1.2.7. Ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyi

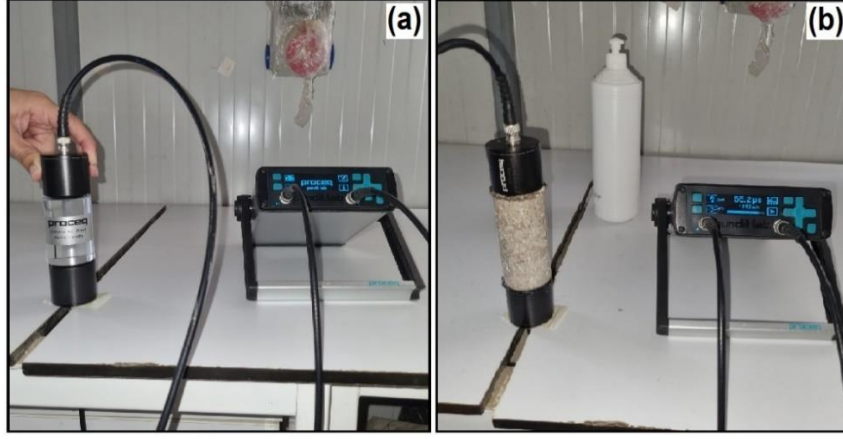
Ultrasonik darbe hızı (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) testi, ağırlıklı olarak inşaat mühendisliği alanında kullanılan tahribatsız bir test olup, beton, metal, kaya ve zemin gibi malzeme ve materyallerin homojenlik, boşluk, çatlak, kırılma, hasar ve kalitesi hakkında bilgiler sunmaktadır (Malhotra ve Carino, 2003). UPV, ortamın

yoğunluğuna, poisson oranına ve dinamik özelliklerine duyarlıdır. UPV test düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. UPV test düzeneğinin şematik diyagramı (Kencanawati ve ark., 2018; Malhotra ve Carino, 2003).

Numunelerin UPV testlerine başlamadan önce özel tasarlanmış kalibrasyon çubuğu kullanılarak sistemin kalibrasyonu yapılmıştır (Şekil 3.11.a). UPV testinde ilk olarak testi gerçekleştirilecek numunenin boyu ölçülmektedir. Transdüserlerin numuneye temas etmesi, hava boşluklarının kalmaması ve özellikle dalga iletiminin ve alınmasının en üst düzeyde sağlanması amacıyla ince bir bağlayıcı jel katman kullanılmıştır. Ölçüm gerçekleştirilirken frekans değeri, darbe genişliği, uyarı gerilim değeri, sinyal kazanç miktarı ve ölçüm birimi tanımlanmıştır. UPV test sisteminde ilk olarak seçilen frekans ve darbe genişliği değerine göre darbe sinyalleri üretilmektedir. Verici transdüser vasıtasıyla darbe numuneye aktarılmakta darbe sinyali numunenin özelliğine göre seyahat etmekte ve gelen sinyal alıcı transdüsere aktarılmaktadır. Alınan sinyal kazanç işlemine tabi tutularak ekran varış zamanı ve numunenin UPV değeri görülmektedir (ASTM 597-02, 2003; Naik ve ark., 2003). Sisteme arzu edilirse osiloskop gibi ayrı bir görüntüleyici sistemde entegre edilebilmektedir. Şekil 3.11.b'de çalışmada kullanılan işlem görmemiş kilin UPV test ölçümü görülmektedir. Numuneye transdüserler doğrudan yerleştirilmiştir.



Şekil 3.11. UPV test ölçümleri a) Sistemin kalibrasyonu b) Killi zeminin UPV ölçümü.

UPV test sisteminde numunenin ortam hızı ve dalganın seyahat süresi gösterge ünitesinde görülmektedir. Ayrıca numunenin ortam hız değeri, numune boyu ve sinyalin seyahat süresinden de hesaplanabilmektedir (denklem 3.5).

$$Hız = \frac{L(cm)}{t(\mu s)} \times 10^4 \frac{m}{s} \quad (3.5)$$

UPV testi sonucunda elde edilen hız değerinden numunenin iç yapısı hakkında birtakım çıkarımlar yapılabilmektedir. Hız değerinin düşük olması numunenin yoğunluğunun daha düşük olduğunu, yüksek olması ise numunenin yoğunluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Denklem 3.6 ve 3.7 kullanılarak numunenin elastisite modülüne, kayma modülü gibi parametrelerde hesaplanabilmektedir.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (3.6)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 ve 3.7’de görülen V_p , boyuna dalgayı (P dalgası veya sıkışma dalgası) V_s ise enine dalgayı (S dalgası veya kesme dalgası) göstermektedir. Ayrıca E , elastisite modülünü, ρ yoğunluğu, μ , poisson oranını ve G ise kayma modülünü ifade etmektedir.

Çalışmada kullanılan killi zeminin UPV testi için numune hazırlanmasında, tek eksenli basınç deneyi ve permeabilite testinde olduğu gibi standart Proktor testinden elde

edilen OWC ve MDD değerleri kullanılmıştır. Numune 5 cm çaplı ve 10 cm uzunluktaki kalıba üç katman halinde el yordamıyla sıkıştırılmıştır. UPV testleri için hazırlanan numuneler 90 günlük kür süresince bekletilmiştir. 90 gün süreyle havada kurutulan işlenmemiş killi zeminin UPV testinde V_p hız değeri 1131 m/s olarak hesaplanmıştır. Darbe sinyali numune içerisinde 88,4 mikro saniye yolculuk etmiştir. Numunenin hız değeri ve seyahat süresi UPV test cihazının ekranından okunmuştur. Denklem 3.5 kullanılarak ayrıca numune boyu, hız değeri veya seyahat süresi hesaplanabilmektedir. İlgili denklem kullanılarak UPV ölçümü yapılan numunenin boyu 9,998 cm olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan killi zemin için gerçekleştirilen geoteknik laboratuvar deneylerinin sonuçları Tablo 3.5'te görülmektedir. Zemin yüksek oranda kil içeriğine sahip olup yüksek plastisite özelliği göstermektedir. Permeabilite değeri oldukça düşüktür. SBD değerinin düşük olması ve özellikle yüksek plastisite özelliği göstermesinden dolayı mühendislik uygulamalarında dikkatli bir şekilde incelenmesi ve ayrıca proje kriterlerine göre iyileştirme uygulamalarına tabi tutulması gerekebilir.

Tablo 3.5. Çalışmada kullanılan kilin fiziksel ve geoteknik özellikleri.

Kilin özellikleri	Laboratuvar Sonuçları
Dane dağılımı	
Çakıl (%)	0
Kum (%)	3
Silt (%)	29
Kil (%)	68
Atterberg Limitleri	
Likit limit (LL) (%)	57
Plastik limit (PL) (%)	26
Plastisite indisi (PI)	31
Kompaksiyon özellikleri	
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) (kN/m^3)	15,7
Optimum su muhtevası (OWC) (%)	21,6
USCS sınıfı	CH
AASHTO sınıfı	A-7-6
Proktor sıkılığında Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	346,6
Özgül ağırlık	2,67
Ultrasonik darbe hızı (m/sn)	1131
Permeabilite katsayısı	$2,89 \times 10^{-8}$

3.2. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC)

Bu çalışmada ÖYFC, alkali aktivasyon yöntemiyle bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik üretim tesislerindeki yüksek fırınlarda oluşan bir atık malzemedir. Demir cevherinin işlenmesiyle ham demir elde edilirken, cevherde bulunan alüminatlar, silikatlar ve diğer mineraller cüruf olarak ayrılmaktadır. Cürufun yoğunluğu demirden daha düşük olduğundan dolayı yüksek sıcaklıklı fırınlarda üst kısımda toplanmakta ve sıvı halde alınmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 2003). Demir-çelik fabrikalarında üretimin yaklaşık %25-30'u kadar YFC meydana gelmektedir (Bilgen ve ark, 2010). Yüksek sıcaklıkta bulunan cüruf soğutma yöntemine göre farklı tür ve özellikler gösterebilmektedir. İnşaat sektöründe en çok kullanılan türü ÖYFC'dir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile YFC atık bir malzeme olarak tanımlanmaktan çıkıp çimento üretimi, yol ve altyapı çalışmalarında, tarımda, seramik ve cam sanayisinde ve çevresel uygulamalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. ÖYFC, inşaat mühendisliği alanında başlıca çimento ve beton üretiminde, zemin stabilizasyonunda ve yalıtım malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (Yi ve ark., 2014; Suresh ve Nagaraju, 2015). YFC'nin kimyasal bileşiminde başlıca CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve MgO bulunmaktadır. YFC tek başına bağlayıcılık özelliği oldukça düşük olup çimento veya alkali aktivatörler ile bağlayıcılık özelliği kazanabilmektedir. Alkali aktivatörlerin kullanılmasıyla YFC, alkali aktif cüruf haline gelerek yüksek mukavemetli ve dayanıklı bağlayıcı malzemeye dönüşmektedir.

Bu çalışmada kullanılan ÖYFC, Ereğli demir-çelik fabrikasından temin edilmiş olup özgül ağırlık değeri 2,90 g/cm³, blaine inceliği 4341 cm²/g ve 0,045 mm'lik elekten geçen ÖYFC oranı ise yüzdesi %99'dur. ÖYFC'nin tedarikçi firma tarafından sağlanan kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.6'da görülmektedir.

Tablo 3.6. Çalışmada kullanılan ÖYFC'nin kimyasal analizi.

Kimyasal Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃
%	34,25	12,30	1,44	30,81	9,35	0,62	0,45	0,78	1,34	4,01

YFC'lerin hidrolik reaktivitesini değerlendirmek için hidrolik modül (HM) değeri kullanılmaktadır. Genellikle düşük HM değerleri düşük hidrolik reaktiviteye karşılık gelmesine karşın kesin bir ilişki bulunmamaktadır (Alp, 2012). Tablo 3.7'de Pal ve

ark., (2003) tarafından HM değerin hesaplanması için önerilen formüller, referans, tercih dereceleri ve bu çalışmada kullanılan ÖYFC'nin HM değeri görülmektedir.

Tablo 3.7. ÖYFC'nin hidrolik reaktivitesinin değerlendirilmesi için önerilen formüller (Pal ve ark., 2003).

Sıra	Formül	İyi performans için gereklilik	Tercih	Bu çalışmadaki ÖYFC'nin değeri
1	$\text{CaO} / \text{SiO}_2$	1,3-1,4	1	0,90
2	$(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$	>1,4	1	1,17
3	$(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$	1,0-1,3	1	0,86
4	$(\text{CaO} + 0,56 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,4 \text{ MgO}) / \text{SiO}_2$	$\geq 1,65$	2	1,48
5	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$	$\geq 1,0$	3	1,53

Tablo 3.7'ye göre bu çalışmada kullanılan ÖYFC'nin hidrolik reaktivite değeri referans değerlerine göre ilk dört formülde düşük 5. formüle göre ise orta derecede yeterli olarak görülmektedir. Genel anlayışa göre HM değerin düşük olması düşük hidrolik reaktiviteyi göstermekte ancak HM değerin yüksek olması her zaman yüksek dayanım elde edileceği anlamına da gelmemektedir (Kocabıyık, 2010). ÖYFC inşaat mühendisliği alanında özellikle çimento ve beton üretiminde oldukça sık kullanıldığı görülmektedir. Deniz suyu, sülfatlı, klorlu ve karbonatlı sular, termal kaynaklar ve buz çözücü kimyasallar gibi agresif ortamlarda gerçekleştirilen uzun süreli dayanım testleri sonucunda, cürufu çimentoların bu zararlı kimyasal etkilere karşı yüksek direnç gösterdiği belirlenmiş, özellikle sülfat ve klorür etkilerine maruz kalan yapıların uzun ömürlü olmasını sağlayarak, korozyon ve kimyasal bozulmalara karşı üstün performans sergilemektedir (Liu ve ark, 2018; Regourd, 1986; Shi ve Qian, 2000).

3.3. Çimento

Bu çalışmada Bursa çimento fabrikasından temin edilen CEM I (OPC, 42,5R) tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimento tipi aynı zamanda OPC olarak adlandırılmakta ve oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Üretici firmadan sağlanan çimentonun fiziksel ve kimyasal karakteristikleri Tablo 3.8'de görülmektedir. Kullanılan

çimentonun 0,045 mm elek üzerinde kalan malzeme oranı %0,50 ve 0,09 mm elek üzerinde kalan malzeme oranı ise %0,00'dır.

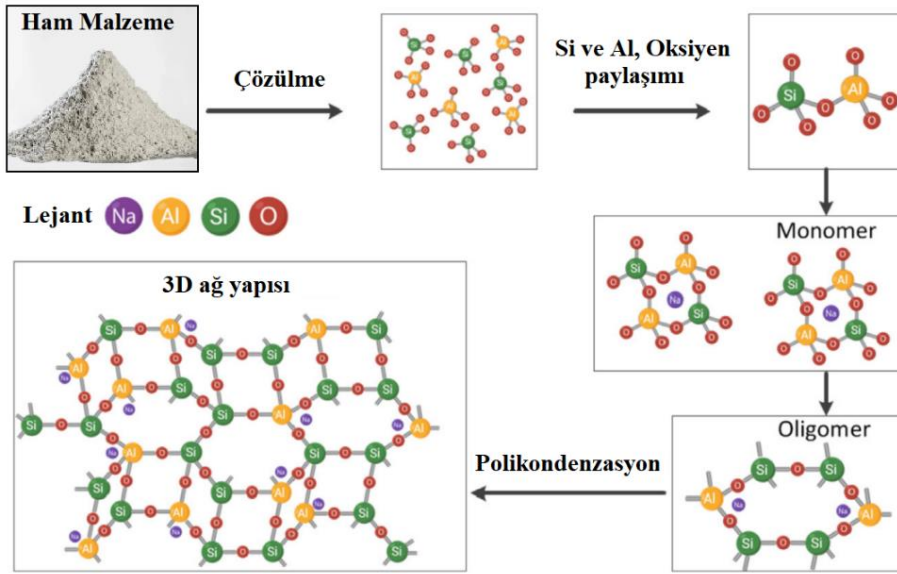
Tablo 3.8. Çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşenler (%)									Temel Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Kızdırma Kaybı	Özgül ağırlık	Blaine Özgül Yüzey (cm ² /g)
19,82	4,83	3,06	62,55	1,60	3,03	0,38	0,86	3,02	3,13	3612

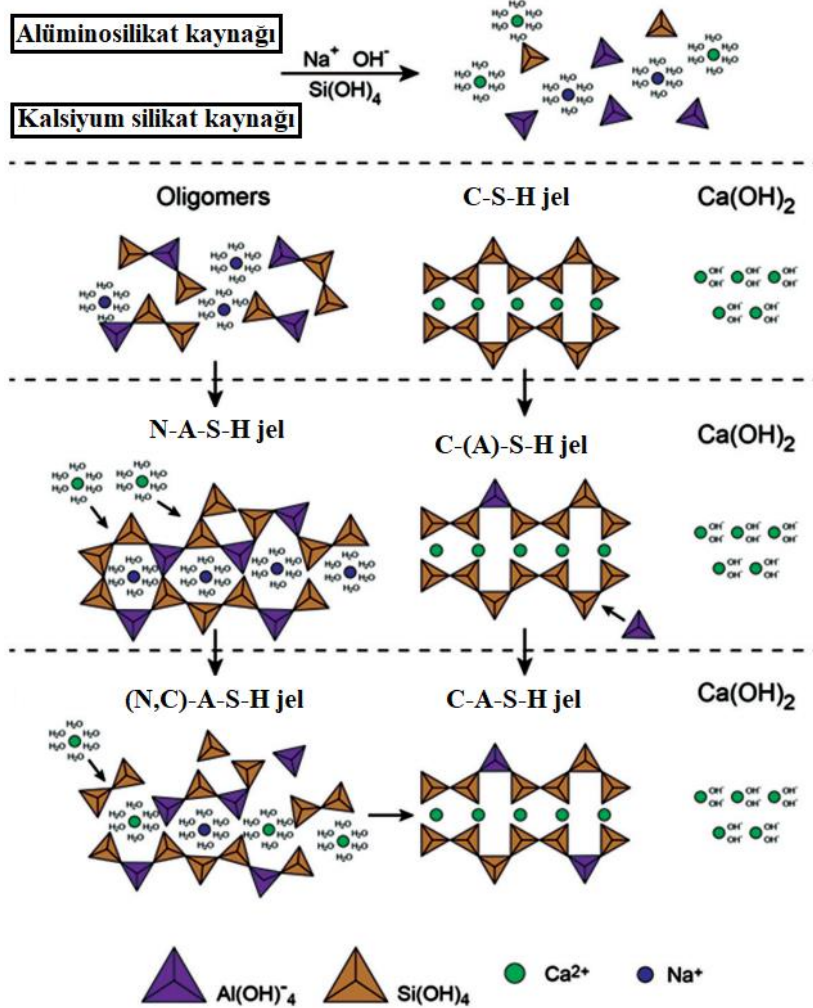
3.4. Alkali Aktivatörler ve Aktivasyon Mekanizması

Alkali aktivatörler, alkali (bazik) özellik sergileyen, bazı kimyasal reaksiyonları harekete geçiren ve hızlandıran bileşiklerdir. En çok kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na₂SiO₃), sodyum karbonat (Na₂CO₃), magnezyum oksit (MgO) ve sodyum sülfat (Na₂SO₃)'dır. Alkali aktivatörler, YFC, uçucu kül gibi amorf yapılı veya puzolanik malzemeler ile reaksiyona girerek bağlayıcı hale gelmelerini sağlamaktadır. Alkali aktivasyon sonucu meydana gelen geopolimerizasyon süreci çözünme, polikondensasyon ve kristalleşme olmak üzere başlıca üç aşamada gerçekleşmektedir (Chuewangkam ve ark, 2024; Khale ve Chaudhary, 2007). Silis (Si) ve alüminyum (Al) açısından zengin malzemeler, alkalilerle aktive edildikten sonra çözünerek AlO₄ ve SiO₄ tetrahedronları oluşturmakta ve bu tetrahedronlar bir oksijen (O) atomunu paylaşarak monomerleri oluşturur ve monomerler etkileşime girerek oligomerleri meydana getirir ve ardından alüminosilikat yapıların üç boyutlu bir ağ yapısı sentezlenir. (Davidovits, 1994; Zhang ve ark, 2020). Şekil 3.12'de görülen bu süreç geopolimerizasyon veya alkali aktivasyon olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 3.13'te kalsiyumun (Ca²⁺) geopolimer reaksiyon sürecine etkisi ve oluşan bağlayıcı fazların dönüşüm mekanizmaları görülmektedir. Si-Al bazlı hammadde ve kalsiyum içeren bileşenlerin alkali aktivasyon altındaki çözünme, polimerleşme ve nihai bağlayıcı faz oluşumu aşamalarını içermektedir. Geopolimerizasyon sürecinde, Si-Al bazlı hammadde alkali aktivasyon ile çözünerek sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerine dönüşmektedir (Guo ve ark, 2016). Ca²⁺ oranı polimerleşme derecesini etkileyerek geopolimerin mekanik ve kimyasal dayanıklılığını etkilemektedir (Guo ve ark, 2016).



Şekil 3.12. Geopolimerizasyon süreci (Zhang ve ark, 2020'den modifiye edilmiştir.).

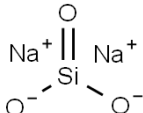
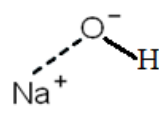


Şekil 3.13. Kalsiyumun geopolimer reaksiyon mekanizması üzerindeki etkileri (Guo ve ark, 2016'dan modifiye edilmiştir.).

Yapılan çalışmalarda alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) kaynağı olarak metakaolin, kaolinitik killler, uçucu kül, ÖYFC veya bunların karışımlarının kullanıldığı görülmektedir (Gavali ve ark, 2019; Pacheco-Torgal ve ark, 2008). Gerek yapı malzemesinde gerekse zemin çalışmalarında bağlayıcı üretmek için uçucu kül ve ÖYFC gibi endüstri yan ürünleri için alkali aktivasyonu çevreyi kirleten gaz emisyonlarının ve enerji giderlerinin azalmasına, doğal kaynaklar yerine atıkların kullanılmasıyla doğanın daha az tahrip edilmesine ve atık malzemelerin depolanma sorunlarının azalmasına fayda sağlamaktadır. Alkali aktivasyon ile üretilen bağlayıcılar OPC'ye göre başlıca, daha yüksek dayanım, düşük hidrasyon ısı, düşük karbon emisyonu ve sülfat, klor gibi agresif kimyasallara karşı daha yüksek dayanıklılık gibi avantajlar sağlamaktadır (Aydın, 2010).

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak SS ve SH seçilmiştir. Bu kimyasallar alkali aktivasyon işleminde en yaygın kullanılan ve etkili kombinasyonlardan birisidir. SH alkali aktivasyonu daha hızlı başlatma, SS ise bağlayıcı jel oluşum sürecini hızlandırmaktadır. Bu çalışmada Merck firması tarafından üretilen SS ve SH ürünleri kullanılmıştır. Tablo 3.9'da çalışmada kullanılan aktivatörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri görülmektedir. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri üretici firmanın kataloğundan alınmıştır.

Tablo 3.9. Çalışmada kullanılan SH ve SS'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellikler	Sodyum silikat	Sodyum hidroksit
Eş anlamlıları	Cam suyu	Kostik soda
Moleküler formül	Na_2SiO_3	NaOH
Yoğunluk	1,35 g/cm ³	2,13 g/cm ³
Moleküler ağırlık	122,06 g/mol	40 g/mol
Fiziksel form	Sıvı	Pellet
Renk	Renksiz	Beyaz
pH	11,0-11,5	>14
Kimyasal yapı		

3.4.1. Sodyum silikat

Sodyum silikat, genel formülü $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ olan kimyasal bileşiğin yaygın adıdır. Su camı veya sıvı cam olarak da bilinmektedir. En iyi bilinen üyesi meta silikattır

(Na_2SiO_3). SS yapı sektörü, temizlik ürünleri, endüstriyel yapıştırıcılar, çevre ve su arıtımı gibi farklı birçok sektörde kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan SS sıvı formda olup %65 H_2O , %27 SiO_2 ve %8 Na_2O 'dan oluşmaktadır. SS renksizdir ve 122,06 g/mol molekül ağırlığına ve 1,35 g/cm³ yoğunluğa sahiptir (Tablo 3.9).

3.4.2. Sodyum hidroksit

Sodyum hidroksit, kostik soda olarak da bilinen, Na^+ ve OH^- iyonundan (NaOH) oluşan inorganik ve kuvvetli bir bazdır. Su ile temas ettiğinde yoğun bir şekilde ısı üreterek çözünmektedir. Bu çalışmada kullanılan SH pelet formunda olup 40 g/mol molekül ağırlığında ve 2,13 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Hidroskopik özelliğinden dolayı havadaki nemi çekmektedir. SH'nin özellikleri Tablo 3.9'da görülmektedir

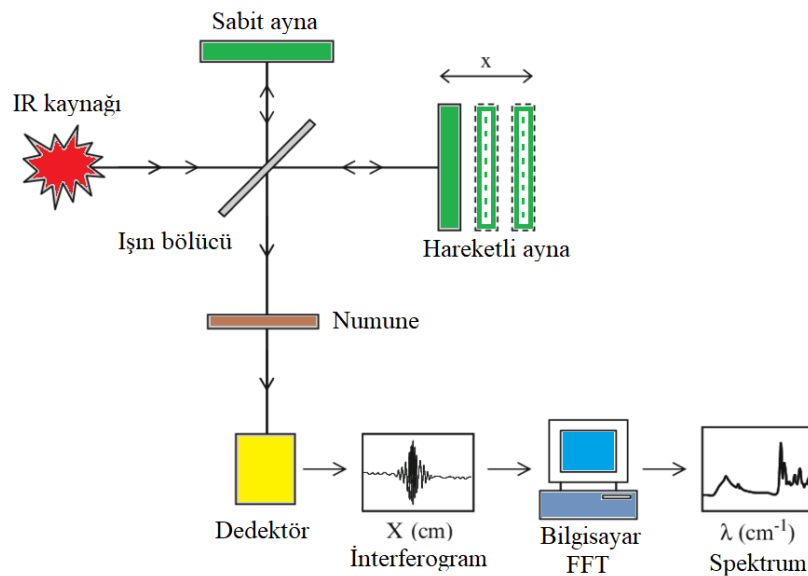
3.5. İleri Malzeme Karakterizasyonu ve Yapısal Analiz Teknikleri

Bu çalışmada kullanılan killi zemin, OPC, ÖYFC ve farklı oranlardaki katkılar ile stabilize edilen zeminlere ileri yapısal analizler ve malzeme karakterizasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal analizler, malzemelerin iç yapısı, yüzey morfolojisi, kristal yapıları, kimyasal bileşimi ve faz dağılımı hakkında bilgiler vermektedir (Brandon ve Kaplan, 2013). Çalışmada kullanılan killi zeminin mikro yapısal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR), X-ışını kırınımı (X-ray diffraction, XRD), taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope, SEM) ve SEM analizi ile birlikte enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (Energy dispersive spectroscopy, EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi

Spektroskopi, geniş anlamda ışın-madde arasındaki etkileşimi incelemektedir. Spektroskopik tekniklerde ışık veya farklı elektromanyetik dalgaların bir örnek ile etkileşime girerek atom, molekül veya iyonların enerji düzeylerindeki geçiş sırasındaki absorpsiyon, emisyon, dağılma ve yansıma (refleksiyon) özellikleri ölçülerek değerlendirilmektedir (Bacsik ve ark, 2004). Spektroskopik teknikler numunelerin kimyasal yapısı, fiziksel özellikleri ve bileşenlerinin konsantrasyonları gibi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Spektroskopik yöntemler genel olarak atomik ve moleküler olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Atomik spektroskopi elektronların bir enerji düzeyinden diğerine geçişini, moleküler

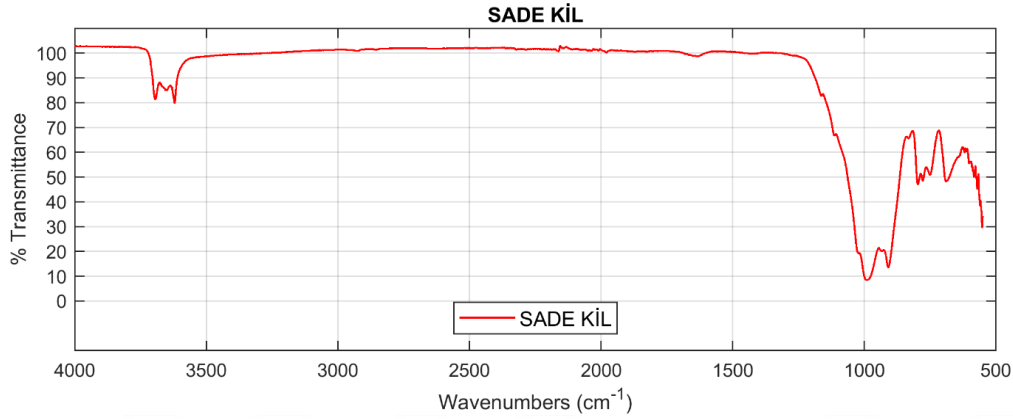
spektroskopi ise elektron düzeylerdeki geçişlere ilave olarak dönme ve titreşim enerji düzeyleri arasındaki geçişleri içermektedir (Lee ve ark, 1999). Moleküllerin başlıca fiziksel özelliklerini, kimyasal yapılarını, bağlarını ve fonksiyonel gruplarının incelenmesi amacıyla genellikle titreşimsel spektroskopi yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Titreşimsel spektroskopi ışığın maddeyle etkileşim özelliğine göre kızılötesi (InfraRed, IR) ve Raman spektroskopisi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. FTIR, titreşimsel spektroskopinin önemli bir tekniği olup, yüksek çözünürlük, hassasiyet, hızlı ve kolay analizi, geniş uygulama alanı, kimyasal bağların, fonksiyon gruplarının tespitinde ve karmaşık karışımların analizlerinde etkili olması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir (Subroto ve ark, 2020). FTIR yönteminde bir maddeye kızılötesi ışınlar uygulanmakta ve maddenin yapısal özelliklerine bağlı olarak meydana gelen titreşim, dönme gibi hareketleri sonucunda kızılötesi ışınlarda meydana gelen emilimin analiz edildiği spektroskopik bir yöntemdir. Şekil 3.14'te FTIR spektrometresinin temel bileşenleri olan IR kaynağı, sabit ayna, hareketli ayna, ışın bölücü, dedektör görülmektedir. IR kaynağından çıkan ışın, ışın bölücü vasıtasıyla ikiye bölünmekte ve bölünen ışınlar sabit ve hareketli aynaya gönderilmektedir. Bu aynalardan yansıyan ışınların yol farkından dolayı interferans paterni meydana getirmektedir. Işınlar numune ile etkileşime girmekte ve çeşitli enerji frekanslarında emilim meydana gelmektedir. Dedektör tüm frekanslar için zaman ortamında verileri oluşturmaktadır. Zaman ortamındaki veriler Fourier dönüşümü kullanılarak numunenin frekans bileşenlerini ayırarak spektrum elde edilmektedir.



Şekil 3.14. FTIR spektrometresinin temel bileşenlerinin şematik gösterimi (Ojeda ve Dittrich, 2012).

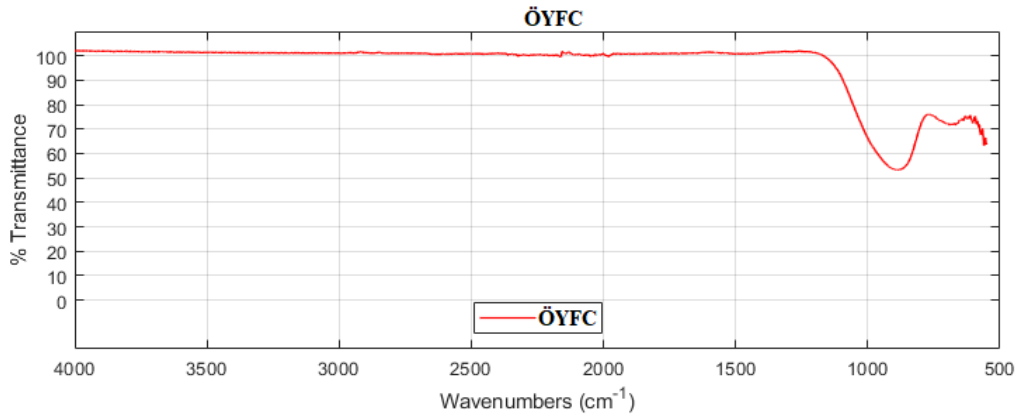
3.5.1.1. Kil, ÖYFC ve OPC'nin FTIR analizleri

Çalışmada kullanılan killi zeminin, ÖYFC ve OPC'nin işlem öncesindeki fonksiyonel grupların, bileşenlerin, kimyasal bağların, mineralojik yapısının ve organik maddelerin incelenmesine yönelik FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'te Ukrayna kilinin FTIR spektrumu görülmektedir. Şekildeki FTIR spektrumunun y eksenini % geçirgenliği, x eksenini ise dalga sayısını (cm^{-1}) ifade etmektedir. Kilin FTIR spektrumu incelendiğinde $3600\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ bandında keskin --OH piklerinin olduğu görülmektedir. 1630 cm^{-1} 'de gözlenen hafif pik nem kaynaklı olup kilde absorbe olmuş suyun varlığına işaret etmektedir. 1000 cm^{-1} civarında ise Si-O piklerinin varlığı görülmektedir.



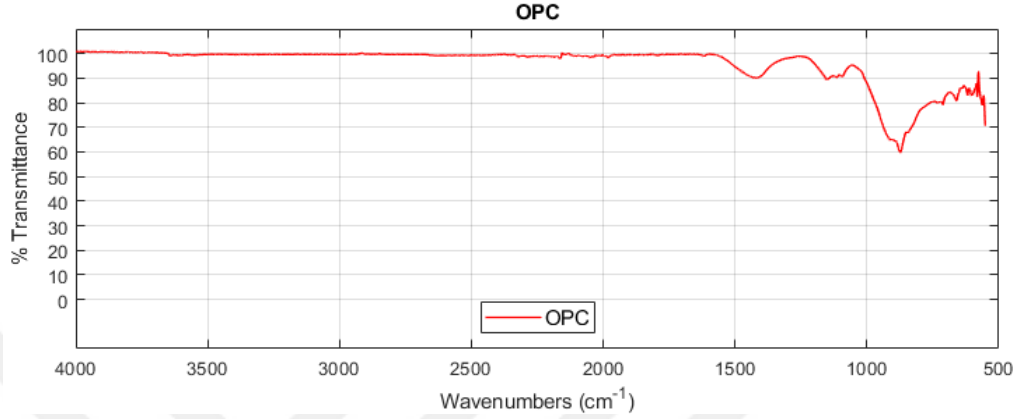
Şekil 3.15. Çalışmada kullanılan kilin FTIR spektrumu.

Çalışmada alümina-silika kaynağı olarak kullanılan ÖYFC'ye ait FTIR spektrumu Şekil 3.16'da görülmektedir. Spektrumun oldukça düz ve sabit bir yapıda olması, ÖYFC'nin amorf bir yapıda olduğunu göstermektedir. Spektrumda başlıca iki absorpsiyon bölgesinin olduğu görülmektedir. Bu bölgelerdeki pikler Si-O ve Al-O içeriği ile ilişkili olduğu yönünde değerlendirilmiştir.



Şekil 3.16. ÖYFC'ye ait FTIR spektrumu.

OPC'ye ait FTIR spektrumu ise Şekil 3.17'de görülmektedir. 1416, 874 ve 712 cm^{-1} 'deki pikler CO_3^{2-} grubundan kaynaklanmaktadır. 845 ve 1115 cm^{-1} 'de görülen pikler C_2S ve C_3S yapısındaki Si-O düzlem içi eğilme bağ titreşimleridir. Kilde 3600-3700 cm^{-1} bandında görülen -OH pikleri ve 1630 cm^{-1} 'de görülen nem kaynaklı pikler OPC'nin FTIR spektrumunda gözlenmemiştir.



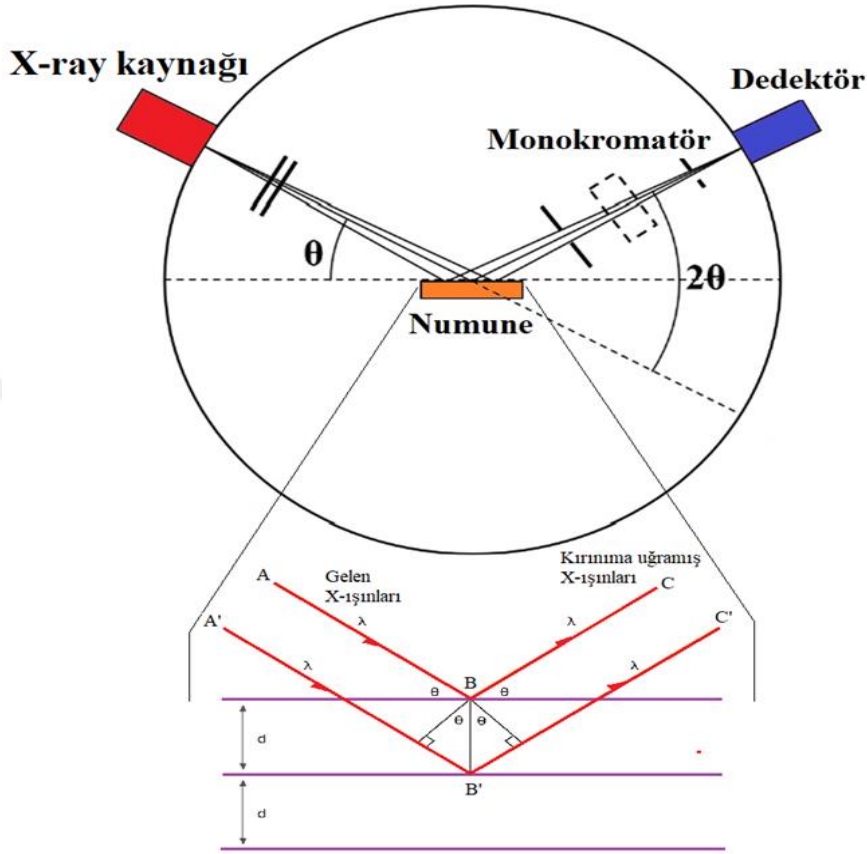
Şekil 3.17. OPC'ye ait FTIR spektrumu.

Kil, ÖYFC ve OPC'nin FTIR spektrumlarının temel özellikleri kısaca bahsedilmiş olup bu spektrumların birbirleriyle ve stabilize edilmiş zeminlere ait FTIR spektrumları ile olan ilişkileri ise Bölüm 4'te ayrıntılı şekilde incelenmiş ve tartışılmıştır.

3.5.2. X-ışınımı kırınımı (XRD) analizi

Ar-Ge, laboratuvar ve endüstriyel alanlarda çalışan birçok araştırmacı, yeni malzeme geliştirme çalışmalarında X-ışını kırınımı (X-ray diffraction, XRD) tekniğinden oldukça yoğun bir şekilde yararlandığı görülmektedir. XRD kristal yapıya sahip malzemelerin atomik düzenini, kristal yapısını, yönelimini, faz bileşenlerini ve malzeme karakterizasyonunu belirlemek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bir XRD cihazı, X-ışın kaynağı, numune tutucu ve XRD dedektörü olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 3.18). Bu yöntemde belirli dalga boyuna sahip X-ışınları, incelenen malzemenin yüzeyine gönderilmekte ve numunenin içinden geçen X-ışınları kırılarak dedektöre gitmektedir. Kırılan ışınlar girişimler meydana getirmektedir. Meydana gelen girişimler yapıcı veya yıkıcı etki sonucu düşük veya yüksek yoğunluklu desenler meydana getirmektedirler. Bir X-ışını difraktometresinde, farklı kristal fazlar, farklı kırınım desenleri oluşturmaktadır. Elde edilen bu desenler düzenlenerek malzemenin yapısı analiz edilmektedir. Yöntemin etkinliği X ışını

demetinin nüfuz derinliğine bağlıdır. Şekil 3.18’de XRD ölçüm sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi görülmektedir. Az miktarda numune yeterli olmakta, tahribatsız ve hızlı bir şekilde analiz yapılabilmektedir. Yeni geliştirilen veya bilinmeyen malzemelerin kesin olarak tanımlanması oldukça güvenilir bir tekniktir.

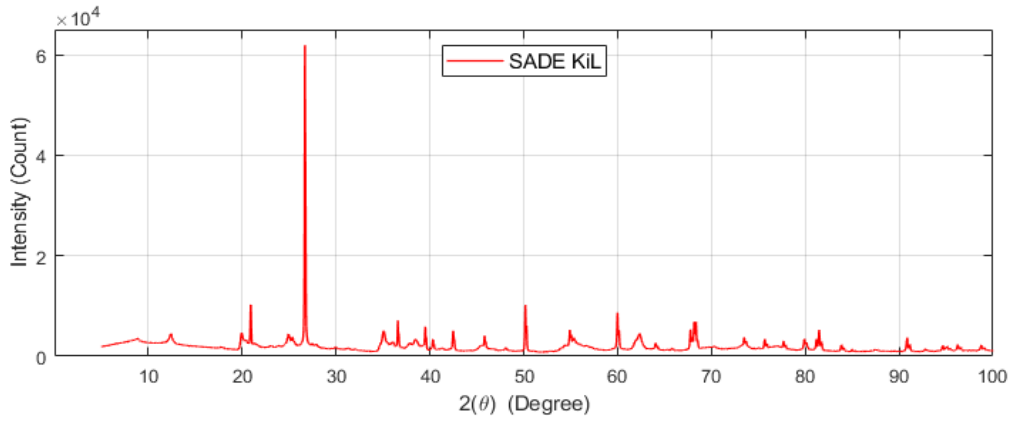


Şekil 3.18. XRD ölçüm sisteminin şematik gösterimi (Jung ve ark, 2023; Piyathissa ve ark, 2023; Warren 1990).

3.5.2.1. Kıl, ÖYFC ve OPC’nin XRD analizleri

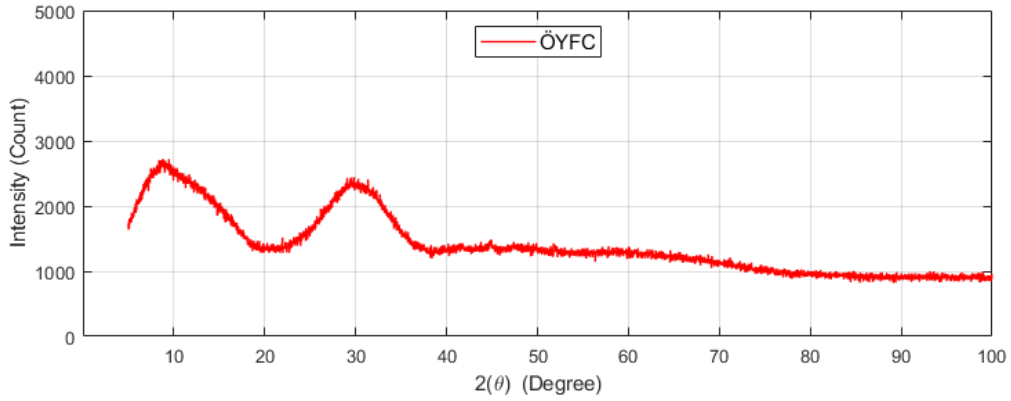
OPC, ÖYFC ve aktivatörler kullanılarak gerçekleştirilen zemin stabilizasyonu sonucunda oluşan mineral fazlar ve yeni oluşan ya da dönüşen fazların belirlenmesi amacıyla XRD analizi yapılmıştır. Şekil 3.19’da çalışmada kullanılan killi zeminin XRD kırınım paterni görülmektedir.

İşlem görmemiş killi zeminin XRD kırınım paterninde tekrarlayan keskin piklerin olduğu görülmektedir. Bu durum yapının düzenli ve tanımlanabilir olduğunun bir göstergesidir. En baskın pik 26,6° civarında gözlenmiş olup, bu pik sıklıkla kuvars (SiO_2) varlığına işaret etmektedir. Baskın faz kuvars olup ikincil faz ise kaoliniti göstermektedir. XRD kırınım paterninde dar ve keskin pikler, kilin yüksek kristallığe ve düşük amorf içeriğe sahip olduğunu göstermektedir.



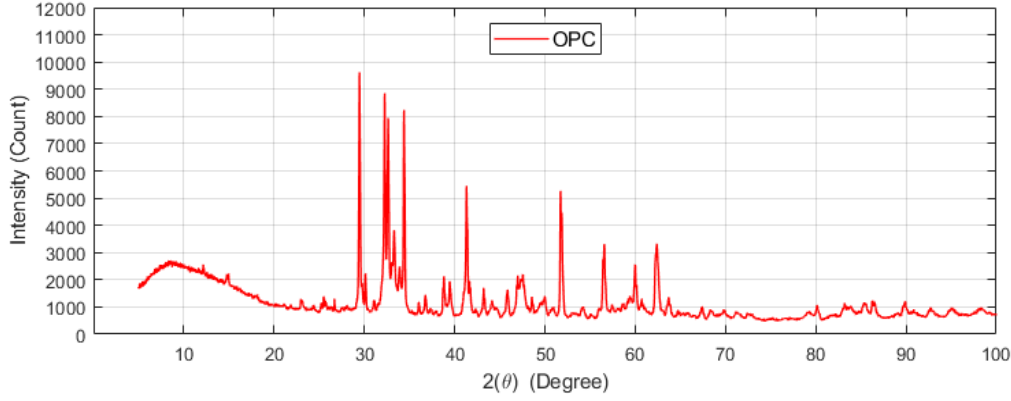
Şekil 3.19. Çalışmada kullanılan killi zeminin XRD kırınım deseni.

Şekil 3.20’de ÖYFC’nin XRD kırınım paterni görülmektedir. Şekilde belirgin bir şekilde pik veren bir kristale rastlanmamıştır. Bu durum cürufun amorf yapıda olduğunun bir göstergesidir. XRD testi amorf malzemelerden ziyade kristalli malzemeler için daha uygun bir testtir. Amorf yapılar daha kolay çözünmektedir. Çalışmada kullanılan ÖYFC’nin XRD kırınım paterninde görülen amorf yapısı ve kristal fazların çok düşük olması, alkali aktivasyon potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.20. Çalışmada kullanılan ÖYFC’nin XRD kırınım deseni.

Şekil 3.21’de ise OPC’nin XRD kırınım paterni görülmektedir. Kırınım paterninde yüksek oranda kristal fazları içerdiğinden dolayı çok sayıda keskin ve belirgin pikler gözlenmiştir. Amorf tepeler gözlenmemiş olması ÖYFC’ye göre kristal yapının çok güçlü olduğunu ve ayrıca piklerin yoğunluğunun yüksek olması, kristal fazların baskın olduğunu göstermektedir. 29-34° aralığında belirgin bir şekilde gözlenen pikler alit (C_3S) ve belit (C_2S) fazlarını göstermektedir. OPC’nin tipik bir göstergesi olan bu fazlar hidrasyon potansiyelinin yüksek olduğunun göstergesidir.



Şekil 3.21. OPC'nin XRD kırınım deseni.

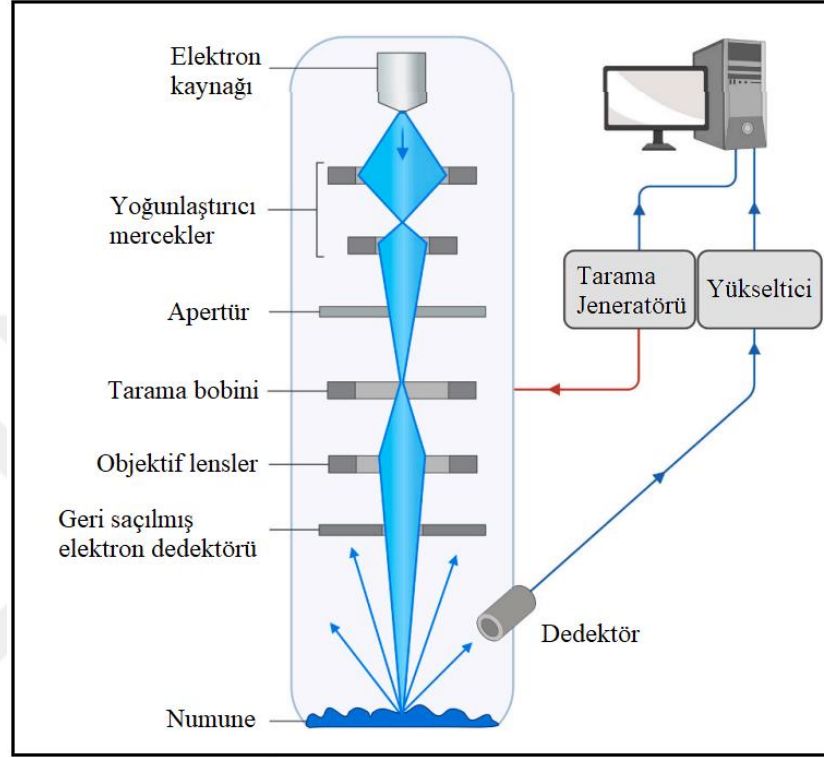
Killi zemin, ÖYFC, OPC ve karışımlar kullanarak stabilize edilmiş killi zeminlere ait XRD analizlerine ilişkin ayrıntılar ve karşılaştırmalı bulguları Bölüm 4'te ayrıntılı şekilde sunulmuştur.

3.5.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-Işını spektroskopisi (EDS) analizi

Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope, SEM), odaklanmış elektron demeti kullanarak numunelerin yüzey topografisi, mikro yapısını, kompozisyonu gibi özellikleri hakkında bilgi sağlayan ve nanometre ölçeğinde oldukça yüksek çözünürlükte görüntü sağlayan bir mikroskop olarak tanımlanabilir. SEM yönteminde elektron kaynağından çıkan yüksek enerjili elektronlar numune ile etkileşime girerek başlıca ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar ve karakteristik x ışınlarını oluşturur. Bu sinyaller dedektörler tarafından toplanmakta ve sinyaller işlenerek yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmektedir. Şekil 3.22'de SEM ölçüm sisteminin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir. SEM çalışma prensibinde, elektron demeti yüksek hızla numuneye çarpmakta, çarpmanın etkisi ile atomlarından ayrılan düşük enerjili dış yörünge elektronları oluşmaktadır. Oluşan bu elektronlar, ikincil elektron olarak tanımlanmaktadır. SEM analizinde kullanılan geri saçılan elektronlar ise yüksek enerjili birincil elektronların numunedeki atomlarla etkileşerek geri yansıyan elektronlarıdır (Yorucu ve ark., 1986).

Bu çalışmada numuneler için SEM analizleri yapılırken aynı zaman enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS veya EDX) analizleri de gerçekleştirilmiştir. SEM analizinde kullanılan elektron demetinin numune ile etkileşimi sonucu farklı sinyaller üretmesinin yanı sıra karakteristik X-ışınları da meydana gelmektedir. EDS analizinde bu X-ışınları kullanılarak elementel analiz yapılmaktadır. Bu analiz malzemelerin

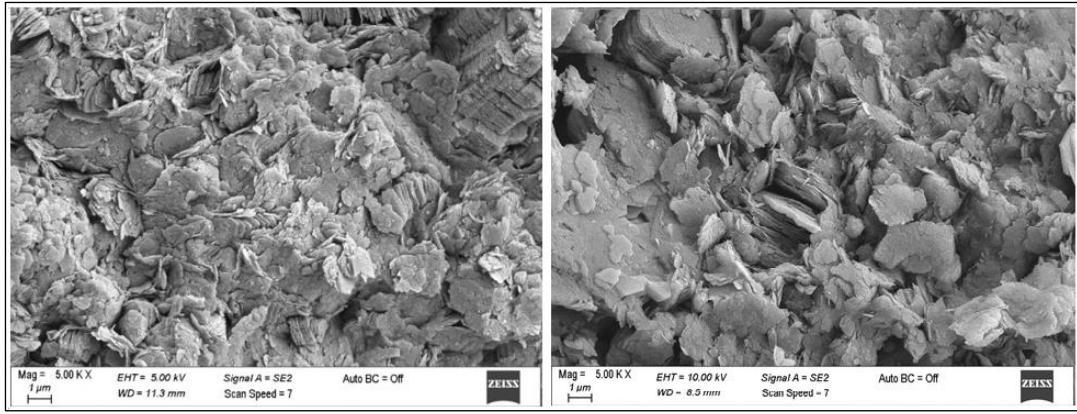
elementel birleşimini belirlemek amacıyla kullanılan oldukça etkili bir yöntemdir. Bu analizler sayesinde numunenin yüzey morfolojisinin ve kimyasal bileşiminin bir arada incelenmesi sağlanmaktadır. Killi zemin ve stabilize edilmiş zeminler için EDS analizleri yapılmış ve bu analizler neticesinde kilde ve stabilize edilmiş zeminlerdeki elementel değişimler gözlenmiştir.



Şekil 3.22. SEM ölçüm sisteminin şematik gösterimi (Nour ve ark, 2024).

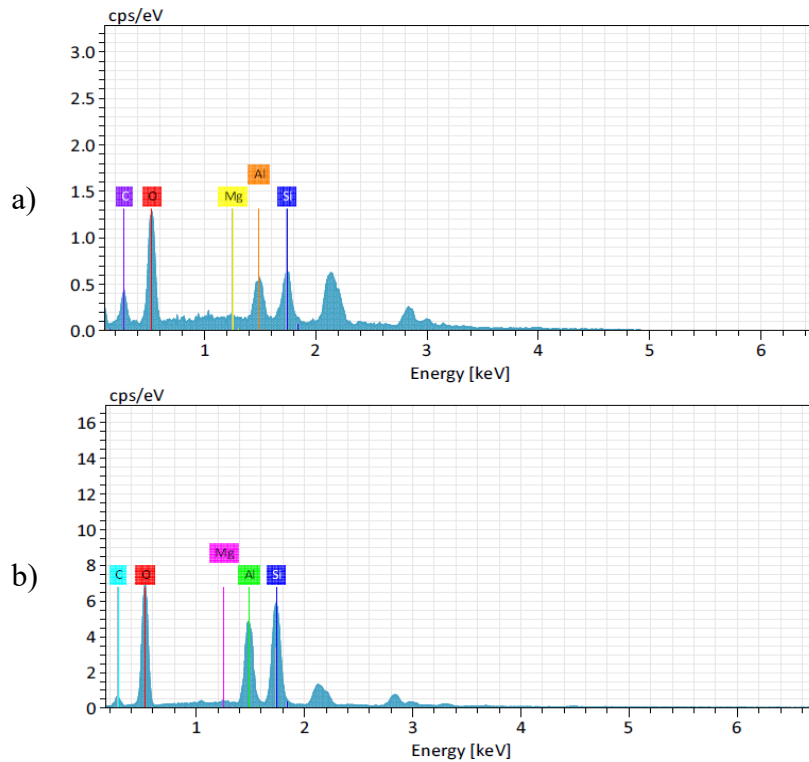
3.5.3.1. Kil, ÖYFC ve OPC'nin SEM-EDS analizleri

Çalışmanın ana malzemeleri olan killi zemin ve ÖYFC için SEM-EDS analizleri yapılmıştır. Killi zemin ve ÖYFC'nin SEM görüntülerinden yola çıkarak iyileştirme sonrası zeminin yüzey morfolojisinde meydana gelen değişiklikler, mikroyapısal değişimler, elementel analiz ve dağılımı ile ilgili değerlendirme, karşılaştırma ve yorumlama yapılabilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.23'te çalışmada kullanılan killi zemine ait SEM görüntüleri görülmektedir. SEM görüntüsünde killi zeminin tabakalı, pulsu ve plak şeklinde bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu yapılar arasında boşluk olup herhangi bir madde veya jelimsi bir yapı yoktur. Kil daneleri küçük boyutta olup büyük yüzey alanına sahiptir. SEM görüntülerine göre kil parçalanmış ve düzensiz bir yapı sergilemektedir. Partiküller arası boşluklu olduğundan dolayı gözenekli bir yapı sergilemektedir. Pulsu veya plak şeklinde yapılar, kilin su tutma kapasitesinin bir göstergesidir.



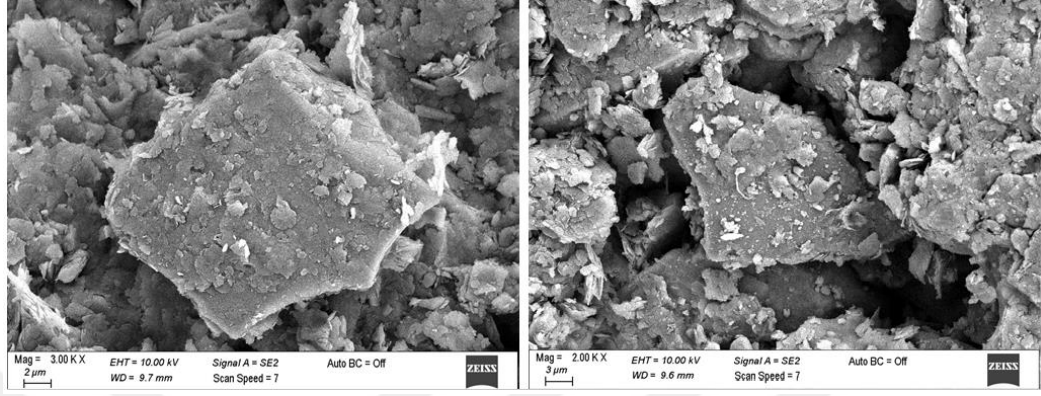
Şekil 3.23. Çalışmada kullanılan killi zemine ait SEM görüntüleri.

Şekil 3.24'te ise killi zemin numunesine ait EDS analiz grafikleri görülmektedir. EDS analiz grafiklerine göre killi zeminde ağırlıklı olarak silisyum, alüminyum, oksijen ve magnezyum elementlerinin bulunduğu görülmektedir. Özellikle silisyum ve alüminyum pikleri belirgin bir biçimde gözlenmektedir. Analizlerde görülen oksijen pikleri kil içeriğindeki oksit bileşikleri göstermektedir. Bazı killer içeriğindeki demir elementinden dolayı kırmızı görünüm kazanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan killi zemin gri renkli olup demir içeriği oldukça az miktarda bulunmaktadır (Tablo 3.1). EDS analizinde demir içeriğinin belirgin bir şekilde tespit edilmemesi kil renginin gri olmasını açıklamaktadır.



Şekil 3.24. Çalışmada kullanılan killi zeminin EDS analizleri.

Şekil 3.25'te killi zemin ile karıştırılmış ÖYFC'nin SEM görüntüleri görülmektedir. ÖYFC partikülleri kil partiküllerine göre daha büyük boyuttadır. Kil partikülleri pulsu bir görünüm serilerken ÖYFC partikülerinin üç boyutlu bileşenlerinin uzunlukları pulsu görünümünden oldukça uzak olup dane şekli köşelidir.



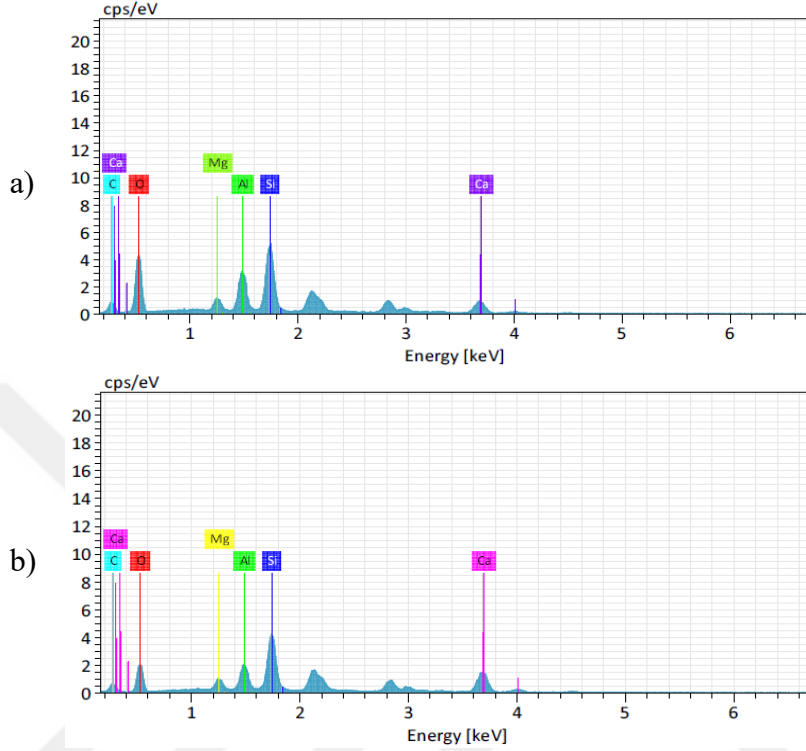
Şekil 3.25. Çalışmada kullanılan ÖYFC'ye ait SEM görüntüleri.

Şekil 3.26'da ÖYFC üzerinde gerçekleştirilen EDS analizi grafikleri görülmektedir. ÖYFC'nin EDS bulguları ile Tablo 3.6'da görülen ÖYFC'nin kimyasal bileşenlerinin uyumlu olduğu görülmektedir. ÖYFC'nin ağırlıklı olarak silisyum, kalsiyum, alüminyum, oksijen ve magnezyum içerdiği görülmektedir. EDS sonuçlarına göre ÖYFC'deki kalsiyum içeriği belirgin bir şekilde görülmüştür. ÖYFC'nin EDS analizinde de görülen yüksek silisyum içeriği alkali ile aktivasyon potansiyelinin olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca kalsiyum mevcudiyeti ÖYFC'nin çimento ile reaksiyona girebileceğini göstermektedir. Kalsiyum ve silisyum C-S-H oluşumu için, alüminyumun varlığı ise kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) oluşumu için önem arz etmektedir. EDS analizinde görülen oksijen ise ÖYFC'de oksit bileşiklerin olduğunu göstermektedir.

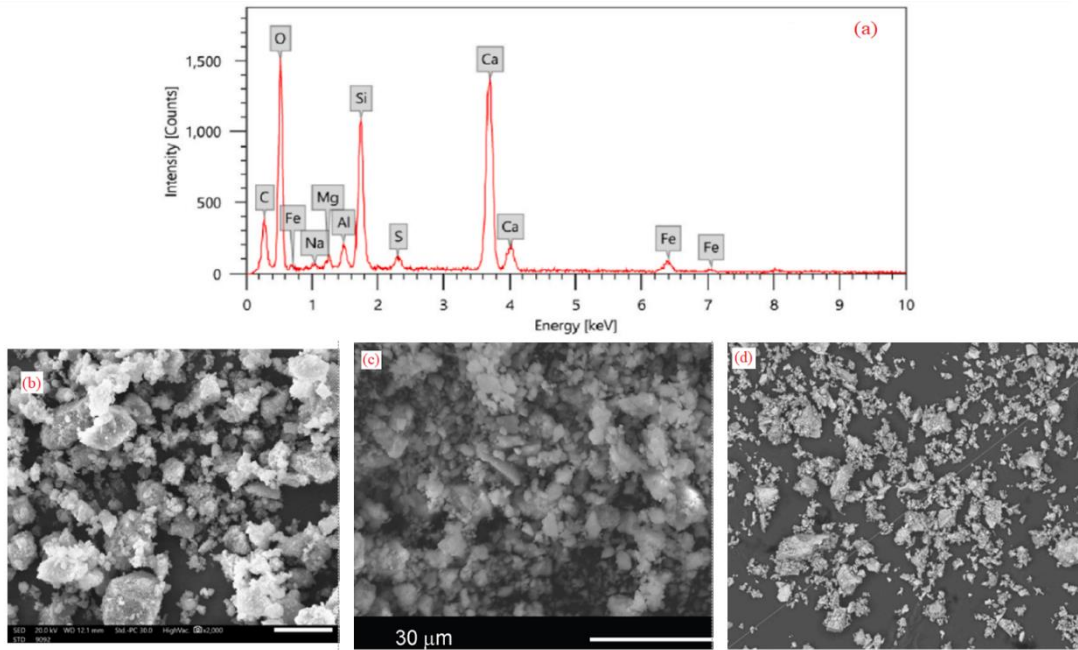
Bu bölümde, killi zemin ve ÖYFC'ye ait SEM-EDS analizlerinden elde edilen temel bulgulara, bu malzemeleri tanıtmak ve genel özelliklerini belirtmek amacıyla değinilmiş olup bu malzemelerin ayrıntılı değerlendirmeleri, karşılaştırmaları ve detaylı analizleri ise Bölüm 4'te kapsamlı biçimde sunulmuştur.

Şekil 3.27 a'da Sayyed ve ark. (2024) OPC için yaptığı EDS analizi Şekil 3.27 b'de yine aynı araştırmacıların OPC için SEM görüntüsü, Şekil 3.27 c ve d'de ise sırasıyla Vargas (2010) ve Sinkhonde'nin (2023) OPC için gerçekleştirmiş olduğu SEM görüntüleri görülmektedir. OPC partiküllerinin düzensiz ve köşeli olduğu görülmektedir. Büyük partiküllerin yanı sıra küçük boyutta partiküllerin varlığı da

mevcuttur. Şekil 3.27.a’da sunulan EDS analizine göre OPC’de başlıca kalsiyum, silisyum, oksijen (oksit bileşikler), alüminyum, demir, kükürt, demir elementlerinin bulunduğu görülmektedir. Bu bulgular Tablo 3.8’de görülen OPC’nin kimyasal özellikleriyle uyumludur.



Şekil 3.26. Çalışmada kullanılan ÖYFC’nin EDS analizi.



Şekil 3.27. a) OPC’nin EDS analizi Sayyed ve ark. (2024) b-d) OPC’nin SEM görüntüleri sırasıyla Sayyed ve ark, 2024; Vargas, 2010; Sinkhonde, 2023.

3.6. METODOLOJİ

Bu çalışmada yüksek plastisiteli killi zeminin stabilizasyonuna yönelik ÖYFC, ÖYFC + OPC, SS+SH, ÖYFC + SS + SH, ÖYFC + OPC + SS + SH ve OPC'den oluşan farklı oranlarda toplam 27 karışım kullanılmıştır. Çalışmada ilk olarak killi zeminin temel fiziksel ve geoteknik özellikleri belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra stabilizasyon süreçlerinde kullanılmak üzere karışımlar ile işlenmiş killi zeminlerin OWC ve MDD değerlerini belirlemek için standart Proktor testi yapılmıştır. Standart Proktor testinden elde edilen bulgular kullanılarak hem havada kurutma hem de ıslak kürleme koşulları altında 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde tek eksenli basınç dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminler için UPV ölçümleri yapılmıştır. UPV değerleri ile SBD değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Son olarak belirlenmiş bazı numunelerin malzeme karakterizasyonuna ve yapısal analizine yönelik FTIR, XRD ve SEM-EDS yöntemleri uygulanmıştır.

3.6.1. Stabilizasyonda kullanılan malzemelerin karışım oranları

Killi zeminin stabilizasyonuna yönelik hazırlanan karışımlarda kullanılan malzeme oranları Tablo 3.10'da verilmiştir. İlk olarak killi zeminin stabilizasyonunda alkali aktivatörlerin etkisini görmek amacıyla sadece alkali aktivatörler kullanılmıştır. SS ve SH killi zeminin ağırlıkça %10 oranında ilave edilmiştir (Katkı No:25, 26, 27 ve 28). ÖYFC'nin kilin stabilizasyonunda etkisini görmek amacıyla tek başına %20 oranında kullanılmıştır (Katkı No: 2). ÖYFC'nin alkali aktivatörler ile killi zeminin iyileştirmede etkisini görmek için karışımlar hazırlanmıştır (Katkı No: 3, 4, 5 ve 6). ÖYFC ve OPC karışımının hem tek başına hem de alkali aktivatör kullanılarak iyileştirmede etkinliği incelenmiştir. ÖYFC ve OPC toplam karışımında kilin ağırlıkça %20'si kadar kullanılmıştır. Buna göre ÖYFC katkı miktarı %18 ise %2 OPC, ÖYFC %16 ise %4 OPC ve ÖYFC %12 ise %8 OPC kullanılmıştır. Bu karışımlara SS + SH karışımı %10 ilave edilmiştir. SS/SH oranı ise 1, 3, 5 ve 7 olarak kullanılmıştır. Ayrıca, bu karışımların stabilizasyon performansını karşılaştırmak amacıyla killi zemine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında OPC ilave edilerek stabilizasyon uygulanmıştır (Katkı No: 22, 23 ve 24).

Tablo 3.10. Kullanılan karışımın oranları ve notasyonları (Yıldırım ve ark., 2024).

Katkı No	Karışım sembolü	Kil (wt%)	ÖYFC (wt%)	OPC (wt%)	Sodyum Silikat (SS) (wt%)	Sodyum Hidroksit (SH) (wt%)	Oran (R:SS/SH)
1	S00_C0_GP00_R0	100	0	0	0	0	-
2	S20_C0_GP00_R0	100	20	0	0	0	-
3	S20_C0_GP10_R1	100	20	0	5	5	1
4	S20_C0_GP10_R3	100	20	0	7,5	2,5	3
5	S20_C0_GP10_R5	100	20	0	8,333	1,667	5
6	S20_C0_GP10_R7	100	20	0	8,75	1,25	7
7	S18_C2_GP00_R0	100	18	2	0	0	-
8	S18_C2_GP10_R1	100	18	2	5	5	1
9	S18_C2_GP10_R3	100	18	2	7,5	2,5	3
10	S18_C2_GP10_R5	100	18	2	8,333	1,667	5
11	S18_C2_GP10_R7	100	18	2	8,75	1,25	7
12	S16_C4_GP00_R0	100	16	4	0	0	-
13	S16_C4_GP10_R1	100	16	4	5	5	1
14	S16_C4_GP10_R3	100	16	4	7,5	2,5	3
15	S16_C4_GP10_R5	100	16	4	8,333	1,667	5
16	S16_C4_GP10_R7	100	16	4	8,75	1,25	7
17	S12_C8_GP00_R0	100	12	8	0	0	-
18	S12_C8_GP10_R1	100	12	8	5	5	1
19	S12_C8_GP10_R3	100	12	8	7,5	2,5	3
20	S12_C8_GP10_R5	100	12	8	8,333	1,667	5
21	S12_C8_GP10_R7	100	12	8	8,75	1,25	7
22	S00_C5_GP00_R0	100	0	5	0	0	-
23	S00_C10_GP00_R0	100	0	10	0	0	-
24	S00_C15_GP00_R0	100	0	15	0	0	-
25	S00_C0_GP10_R1	100	0	0	5	5	1
26	S00_C0_GP10_R5	100	0	0	7,5	2,5	3
27	S00_C0_GP10_R3	100	0	0	8,333	1,667	5
28	S00_C0_GP10_R7	100	0	0	8,75	1,25	7

3.6.2. Alkali aktivatörlerin hazırlanması

Alkali aktivatörler tüm karışımlar için ayrı ayrı ve numuneye katılmadan 24 saat önce hazırlanmıştır. SH hidroskopik ve kendi kendine sıvılaşma yeteneği olan bir malzeme olduğundan dolayı kapalı kaplarda saklanmıştır. Alkali aktivatörler hazırlanırken bir miktar suyun içerisine ilk olarak belirlenen ölçüde SH konarak karıştırılmıştır. SH yüksek derecede ısı yaymaktadır. Isı etkisinin ortadan kalkmasından sonra karışıma

SS yavaşça eklenmiştir. Çözeltiler kullanılmadan önce hava geçirmez bir kapta en az 24 saat tutulmuştur. Hazırlanan alkali aktivatör çözeltileri Tablo 3.10'da görülen 20 karışımda kullanılmıştır.

3.6.3. Alkali aktivatör kullanılan numunelerin hazırlanması

Killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla her bir deney sistemine uygun olabilecek şekilde numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan yüksek plastisiteli kil önce 105 °C'de 24 saat fırında kurutulmuştur. Kurutulan kil homojen hale getirilmiştir. Karışımlar için gerekli katkı miktarları Tablo 3.10'daki ağırlık yüzdeleri dikkate alınarak hazırlanmıştır (denklem 3.8). Killi zeminde olduğu gibi ÖYFC ve OPC'de kuru halde kullanılmıştır.

$$Katkı (g) = Kurukilin ağırlığı \times \left(\frac{Katkı yüzdesi}{100} \right) \quad (3.8)$$

Alkali aktivatörlerin kullanılacağı karışımlarda, en az 24 saat önce alkali aktivatörler hazırlanmıştır. Zemin ilk olarak katkı malzemeleri ile homojen olacak şekilde karıştırılmıştır. Hazırlanan alkali aktivatör ve su zemine yavaş yavaş eklenmiş ve homojen dağılımını sağlamak için sürekli karıştırılmıştır. Tüm deneylerde karışımlar aynı prosedür izlenerek hazırlanmış ve zemine uygulanmıştır. Testin amacına bağlı olarak numuneler, farklı boyut ve özelliklerde kalıplar kullanılarak ya da doğrudan kalıpsız şekilde hazırlanmıştır. Ayrıca uygulanacak testin amacına göre farklı kür süreleri ve kür koşulları uygulanmıştır.



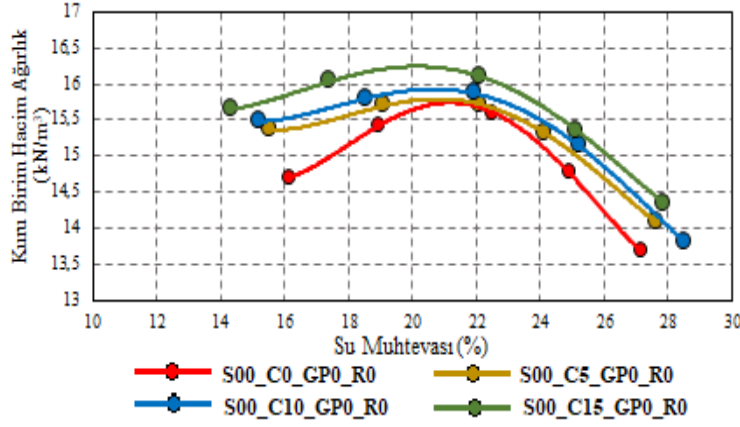
4. AKTİVE EDİLMİŞ ÇİMENTO/CÜRUF KATKISININ STABİLİZASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yüksek plastisite özelliğine sahip killi zemine, Tablo 3.10’da verilen farklı içeriklere sahip 27 karışım ilave edilerek stabilizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Stabilizasyon öncesi ve sonrasında laboratuvar testleri gerçekleştirilmiştir. Karışımların ilave edilmesiyle hazırlanan killi zeminin optimum su muhtevası (OWC) ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) değerleri standart Proktor testleri ile belirlenmiştir. Standart Proktor testlerinden elde edilen parametreler kullanılarak özel olarak tasarlanmış kalıplarda numuneler hazırlanmış ve bu numunelere serbest basınç dayanımı (SBD) ve ultrasonik darbe hızı (UPV) testleri gerçekleştirilmiştir. SBD testi sonrasında killi zemin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), Portland çimentosu (OPC) ve stabilize edilmiş zemin numunelerinin bir kısmından örnekler alınarak Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskopu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan tüm testlerden elde edilen bulgular detaylı biçimde incelenerek yorumlanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

4.1. Kompaksiyon Deneyleri

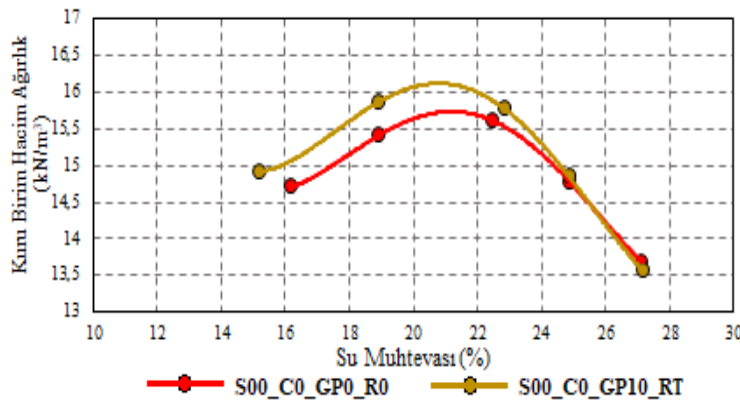
Killi zeminin stabilizasyonunda kullanılacak OWC ve MDD değerlerinin belirlenmesi amacıyla karışımlar için kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak killi zemin hiçbir katkı kullanılmaksızın standart Proktor testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’deki grafiklerde görülen parabolik kırmızı eğri killi zemine ait kompaksiyon eğrisidir. Bu eğrinin en tepe noktasının x eksenini kestiği yer OWC değerini, y eksenini kestiği yer ise MDD değerini göstermektedir. Şekil 4.1’den görüleceği üzere killi zeminin OWC değeri 21,6, MDD ise 15,7 kN/m³ olarak bulunmuştur. Killi zeminde kullanılan katılardan birisi de OPC olup zemine %5, %10 ve %15 oranlarında katılmıştır. Bu oranlar içinde standart Proktor testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’deki turuncu çizgi %5 OPC, mavi çizgi %10 OPC ve yeşil çizgi %15 OPC içeren killi zemin numunelerinin Proktor eğrilerini göstermektedir. OPC içeriği arttıkça numunelerin MDD değerleri artmış, buna karşın OWC değerleri azalmıştır.

%5 OPC içeren zemin numunesinde OWC değeri %21 ve MDD değeri 15,8 kN/m³, %10 OPC içeren numunede OWC %20,6 ve MDD 15,9 kN/m³, %15 OPC içeren numunede ise OWC %20,3 ve MDD 16,2 kN/m³ olarak bulunmuştur.



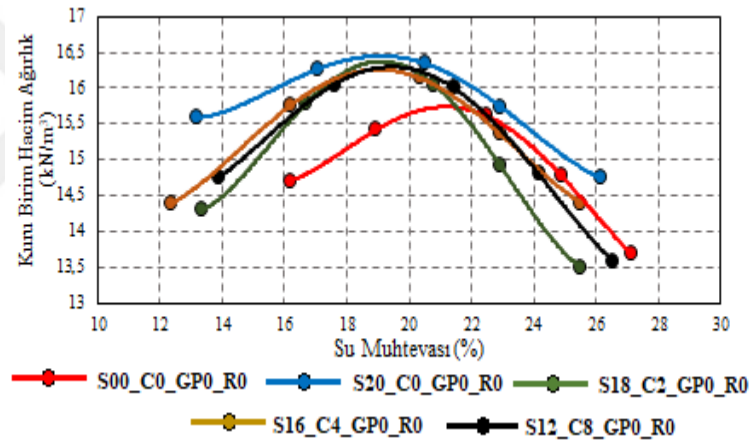
Şekil 4.1. Killi zemin ve %5, %10 ve %15 OPC katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.

Tablo 3.10'da görülen 27 karışımın 20'sinde alkali aktivatör kullanılmıştır. Bu karışımlarda alkali aktivatör killi zemine ağırlıkça %10 miktarında ilave edilmiştir. Şekil 4.2'de alkali aktivatörün tek başına killi zeminin kompaksiyonuna etkisi görülmektedir. Killi zemine sodyum silikat/sodyum hidroksit (SS/SH) 1, 3, 5 ve 7 oranlarında katılarak standart Proktor testleri yapılmıştır. Bu testlerde elde edilen kompaksiyon eğrileri, OWC ve MDD değerleri birbirine benzer çıktığından dolayı tek bir kompaksiyon eğrisi ile gösterilmiştir. Şekil 4.2'deki bu eğri S00_C0_GP10_RT notasyonu ile ifade edilmiştir. Sadece alkali aktivatör ile yapılan standart Proktor test sonuçlarına göre OWC değeri %20,7 ve MDD değeri ise 16,1 kN/m³ olarak tespit edilmiştir. Killi zemine aktivatör ilave edilince OWC değerinde azalma buna karşın MDD değerinde ise artma gözlenmiştir.



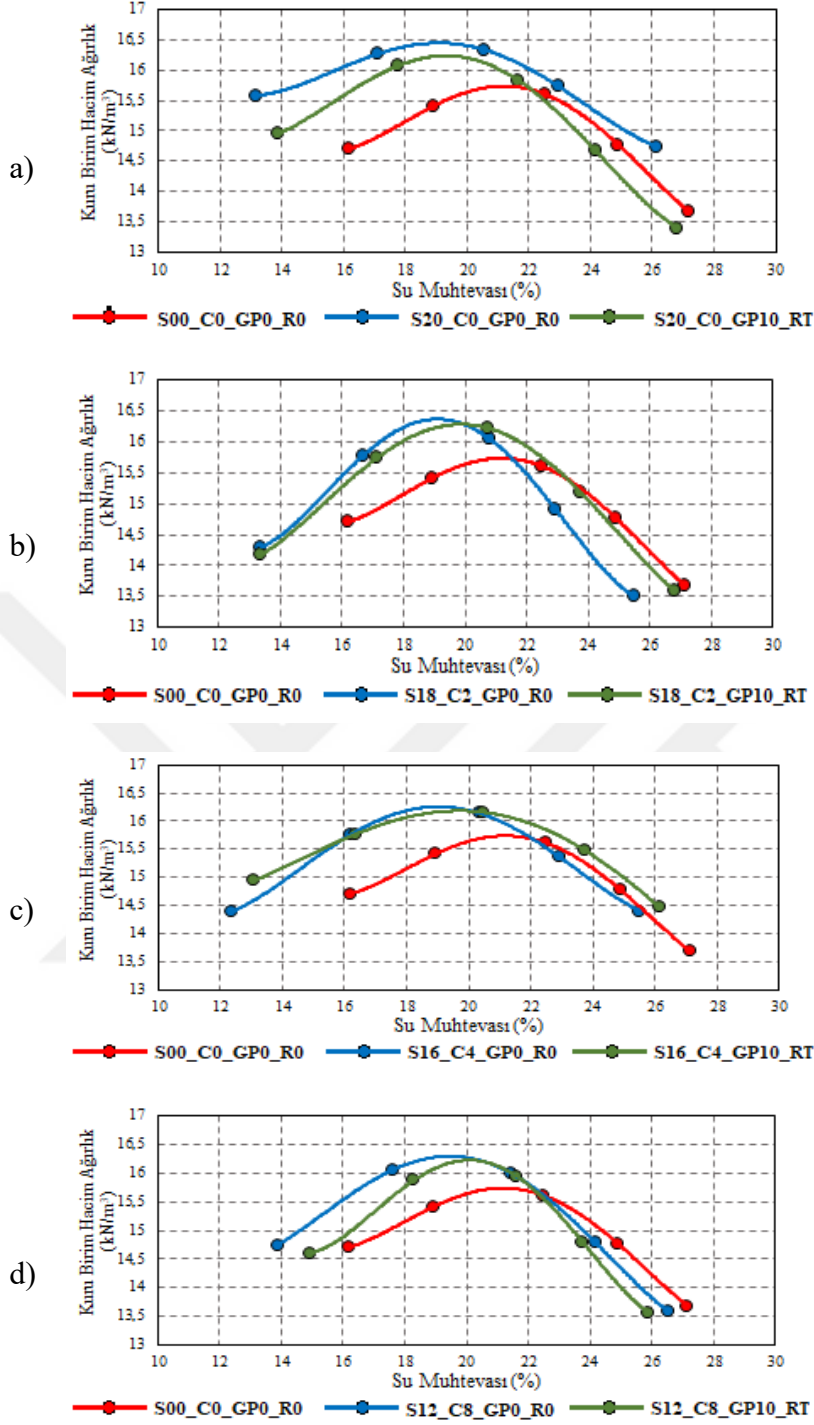
Şekil 4.2. Killi zemin ve alkali aktivatör katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.

Çalışmada katkı olarak kullanılan ÖYFC, ÖYFC ve OPC farklı oranlarda kullanılmıştır. Bu karışımların kilin stabilizasyonuna etkisi hem tek başına hem de alkali aktivatör ile incelenmiştir. Şekil 4.3'te ÖYFC, ÖYFC ve OPC katkılarının ilave edildiği killi zeminin kompaksiyon eğrileri görülmektedir. Bu karışımların hiçbirinde alkali aktivatör kullanılmamıştır. Şekil 4.3'teki kırmızı eğri killi zeminin, mavi eğri %20 ÖYFC, yeşil eğri %18 ÖYFC + %2 OPC, turuncu eğri %16 ÖYFC + %4 OPC ve siyah eğri ise %12 ÖYFC + %8 OPC katkılı killi zeminin kompaksiyon eğrisini göstermektedir. Bu numunelerin OWC değerleri sırasıyla %21,6, %19,2, %19,3, %19,3 ve %19,6 MDD değerleri ise 15,7 kN/m³, 16,5 kN/m³, 16,4 kN/m³, 16,4 kN/m³ ve 16,3 kN/m³ olarak bulunmuştur. ÖYFC katkısı killi zeminin OWC değerini azaltmış, MDD değerinde ise artma meydana getirmiştir. ÖYFC ve OPC karışımlarında da benzer şekilde OWC değerinde azalma, MDD değerinde artma gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Killi zemin, %20 ÖYFC katkılı killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC ve OPC katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.

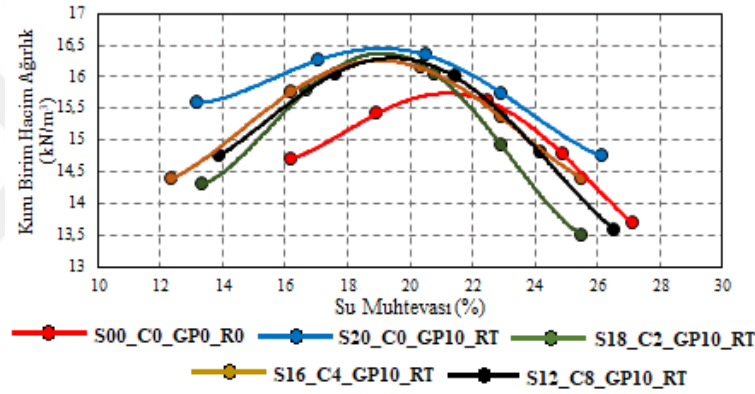
Şekil 4.4'te, farklı oranlarda ÖYFC, OPC ve alkali aktivatör içeren karışımlarla hazırlanmış killi zemin numunelerine ait standart Proktor deneyinden elde edilen kompaksiyon eğrileri sunulmuştur. Şekil 4.4 a'da %20 ÖYFC, Şekil 4.4 b'de %18 ÖYFC + %2 OPC, Şekil 4.4 c'de %16 ÖYFC + %4 OPC, Şekil 4.4 d'de ise %12 ÖYFC + %8 OPC içeren katkılar ile bu katkılara alkali aktivatör ilavesi ile elde edilen karışımların kompaksiyon eğrileri görülmektedir. Alkali aktivatörlerin SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7 olarak alınmıştır. Alkali oranlarındaki değişimler kompaksiyon eğrilerini değiştirmedikinden dolayı tek bir eğri ile ifade edilmiştir. Buna göre S20_C0_GP10_RT, S18_C2_GP10_RT, S16_C4_GP10_RT ve S12_C8_GP10_RT kendi grubu içerisindeki tüm alkali oranlarını ifade etmektedir.



Şekil 4.4. Killi zemin, a) $\%20$ ÖYFC, b) $\%18$ ÖYFC + $\%2$ OPC, c) $\%16$ ÖYFC + $\%4$ OPC ve d) $\%12$ ÖYFC + $\%8$ OPC oranlarında katkıları ile yapılan ve ayrıca her bir katkı kombinasyonu için alkali aktivatör ilavesiyle elde edilen killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.

Şekil 4.4'te sunulan kompaksiyon eğrilerinin hepsinde karışım eklenen killi zeminin, doğal killi zemine göre OWC değerlerinin azaldığı ve MDD değerlerinin arttığı görülmektedir. Alkali aktivatör içermeyen karışımların OWC değerlerinin, aktivatör

içeren karışımlara kıyasla bir miktar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. MDD değerlerinin ise aktivatör kullanılmadan hazırlanan numunelerde bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. %20 ÖYFC + alkali aktivatör, %18 ÖYFC + %2 OPC + alkali aktivatör, %16 ÖYFC + %4 OPC + alkali aktivatör ve %12 ÖYFC + %8 OPC + alkali aktivatör karışımı killi zeminin OWC değerleri sırasıyla %19,7, %19,8, %19,9 ve %20,2 ve MDD değerleri ise sırasıyla 16,3 kN/m³, 16,3 kN/m³, 16,2 kN/m³ ve 16,2 kN/m³ olarak belirlenmiştir. ÖYFC oranındaki azalma ve buna bağlı olarak OPC oranındaki artış, OWC değerinde bir miktar artışa neden olmuştur. MDD değerinde ise dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 4.5'te, farklı oranlardaki ÖYFC ve OPC karışımlarına alkali aktivatör ilavesinin, killi zeminin kompaksiyon özellikleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Bu karışımlarda alkali aktivatör kullanımı, killi zeminin MDD değerini azaltırken, OWC değerini ise artırmıştır.



Şekil 4.5. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC + alkali aktivatör katkılı killi zeminlerin kompaksiyon eğrileri.

Çalışmada Tablo 3.10'da görülen tüm karışımlar için standart Proktor testi gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1'de standart Proktor testi sonucunda karışımlar için elde edilen OWC ve MDD değerleri görülmektedir. Kil, ÖYFC ve ÖYFC + OPC karışım grupları için farklı oranlarda alkali aktivatör kullanılmıştır. Her bir grup içerisinde farklı oranlarda kullanılan alkali aktivatörler OWC ve MDD değerleri benzer sonuçlar vermiştir. Tablo 4.1'de benzer sonuçlar veren gruplar için tek bir değer tanımlanmıştır. Standart Proktor deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, numunelerin OWC değerlerinin %19,2 ile %21,6 aralığında, MDD değerlerinin ise 15,7 kN/m³ ile 16,5 kN/m³ aralığında değiştiği görülmektedir. Karışımlarda su içeriği az olduğunda daneler tam yerleşmemekte, fazla olması durumunda ise gevşek bir yapı oluşmaktadır. Her iki durumda da kuru yoğunluk düşmektedir. Kompaksiyon testlerinde belirlenen OWC değerinde zemin daneleri sıkı bir şekilde düzenlenmekte,

kuru yoğunluğu en yüksek seviyeye çıkmakta ve mühendislik özellikleri iyileşmektedir. Tablo 4.1’de RT olarak ifade edilen notasyon, SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7 olan tüm oranları ifade etmektedir. Örneğin S20_C0_GP10_RT, S20_C0_GP10_R1, S20_C0_GP10_R3, S20_C0_GP10_R5 ve S20_C0_GP10_R7’de elde edilen sonuçların ortak ifadesidir. Diğer tüm karışımlar için de aynı notasyon yaklaşımı uygulanmıştır.

Tablo 4.1. Killi zemin ve karışımların ilave edilmesiyle hazırlanan killi zeminlerin standart Proktor testleri sonucunda elde edilen kompaksiyon parametreleri.

Karışım sembolü	Optimum su muhtevası (OWC) (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (MDD) (kN/m ³)
S00_C0_GP00_R0	21,6	15,7
S00_C5_GP00_R0	21	15,8
S00_C10_GP00_R0	20,6	15,9
S00_C15_GP00_R0	20,3	16,2
S20_C0_GP00_R0	19,2	16,5
S20_C0_GP10_RT	19,7	16,3
S18_C2_GP00_R0	19,3	16,4
S18_C2_GP10_RT	19,8	16,3
S16_C4_GP00_R0	19,3	16,4
S16_C4_GP10_RT	19,9	16,2
S12_C8_GP00_R0	19,6	16,3
S12_C8_GP10_RT	20,2	16,2
S00_C0_GP10_RT	20,7	16,1

4.2. Serbest Basınç Dayanımı Deneyleri

SBD deneyleri, killi zeminde stabilizasyon sonrası oluşan dayanım artışını değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Standart Proktor deneyleri neticesinde elde edilen OWC ve MDD değerleri kullanılarak silindirik numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında 50 mm iç çapında ve 100 mm yüksekliğinde özel bir kalıp kullanılmıştır. Tüm numuneler kalıp içerisinde elle üç katmanda sıkıştırılmıştır. Kalıplarda hazırlanan numuneler, numune çıkarma krikosu yardımıyla kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler, havada kurutma ve ıslak kürlenmiş olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Islak kürlenmiş numuneler, SBD test gününe kadar su içeriklerini koruması için plastik filme sarılmıştır. Havada kurutma için ayrılmış numuneler için

herhangi bir işlem yapılmamış ve SBD test gününe kadar açıkta bekletilmiştir. Açıkta bekletilen ve plastik filme sarılı numunelerin bir kısmı Şekil 4.6’da görülmektedir.



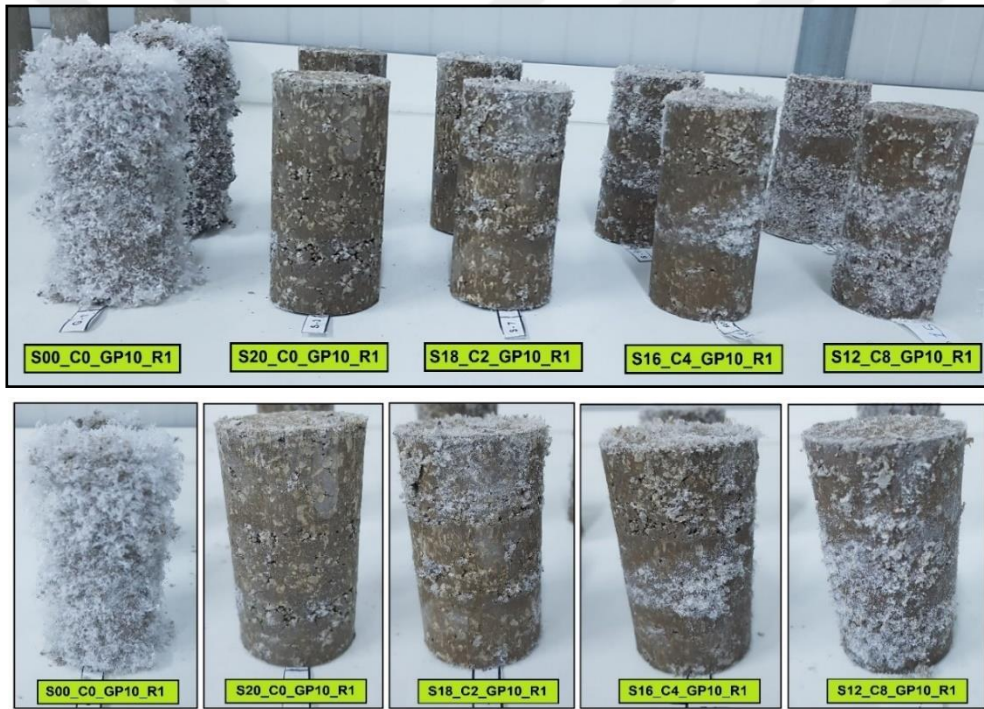
Şekil 4.6. SBD testi için hazırlanan numuneler a) Havada kurutulan numuneler b) Plastik filme sarılmış numuneler.

Havada kurutulan ve ıslak kürlenmiş numunelerin güneş ışıklarından etkilenmemesi ve özellikle sıcaklık farkı oluşmaması için dolaplarda bekletilmiştir (Şekil 4.7). Ayrıca klimalar vasıtasıyla oda sıcaklığı sabit tutulmuştur. Numunelerin zaman bağımlı SBD değerlerindeki değişimi incelemek amacıyla Tablo 3.10’da listelenen tüm numuneler 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde bekletilmiş ve süre sonunda SBD testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. SBD deneyi için dolapta bekletilen numuneler.

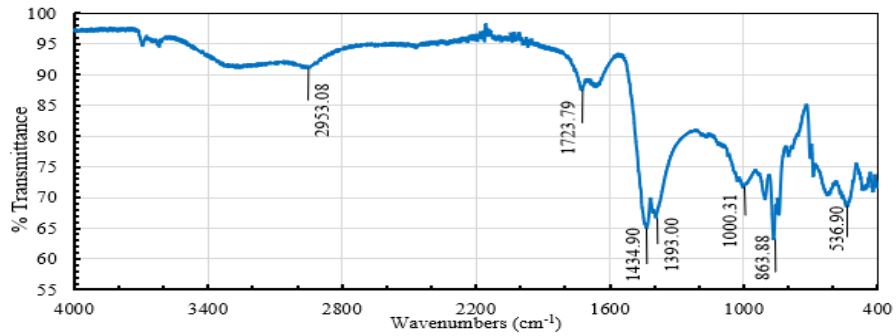
Hazırlanan numunelerden SS/SH oranı 1 olan ve havada kurutulan S00_C0_GP10_R1, S20_C0_GP10_R1, S18_C2_GP10_R1, S16_C4_GP10_R1 ve S12_C8_GP10_R1 sembolü numunelerde diğer karışımlardan farklı olarak kristallenmeler gözlenmiştir (Şekil 4.8). Bu numuneler diğer numuneler gibi tamamen aynı şartlar altında hazırlanmıştır. Numunelerin fotoğrafları hazırlanma tarihinden 90 gün sonrasında (SBD testlerinin yapılacağı gün) çekilmiştir. Bu numuneler hazırlandıktan sonra ilk 28 gün boyunca bünyelerine su çekmiş ve etrafında nemlenmeler gözlenmiştir. Gözlenen bu nemlenme zaman ile azalmış ve kristallenmeler oluşmuştur. Bu oluşum sadece açıkta kürlenene SS/SH oranı 1 olan numunelerde gözlemlenmiş olup aynı oranda ıslak kürlenmiş numunelerde gözlenmemiştir.



Şekil 4.8. SS/SH oranı 1 olan numunelerde kristallenme (Yıldırım ve ark, 2024).

Numunelerde meydana gelen kristal oluşumunu tanımlamak amacıyla FTIR analizi yapılmıştır. Şekil 4.9’da kristallenmenin gözlemlendiği numunelerin FTIR spektrumu görülmektedir. FTIR spektrumu mevcut literatür ile karşılaştırması yapıldığında, numuneler üzerinde oluşan kristallerin sodyum karbon monohidrat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ile uyumlu olduğu görülmektedir (Nickolov ve ark, 2003). SS/SH oranı 1 olan numunelerin SH miktarı diğer karışımlara göre daha yüksektir. Bu karışımlardaki fazla miktarda bulunan SH geopolimer oluşumu için reaksiyona girememiş ve ortamda kalmıştır. Tepkimeye girmeyen SH, erken aşamalarda havadan nemi emmiş ve daha

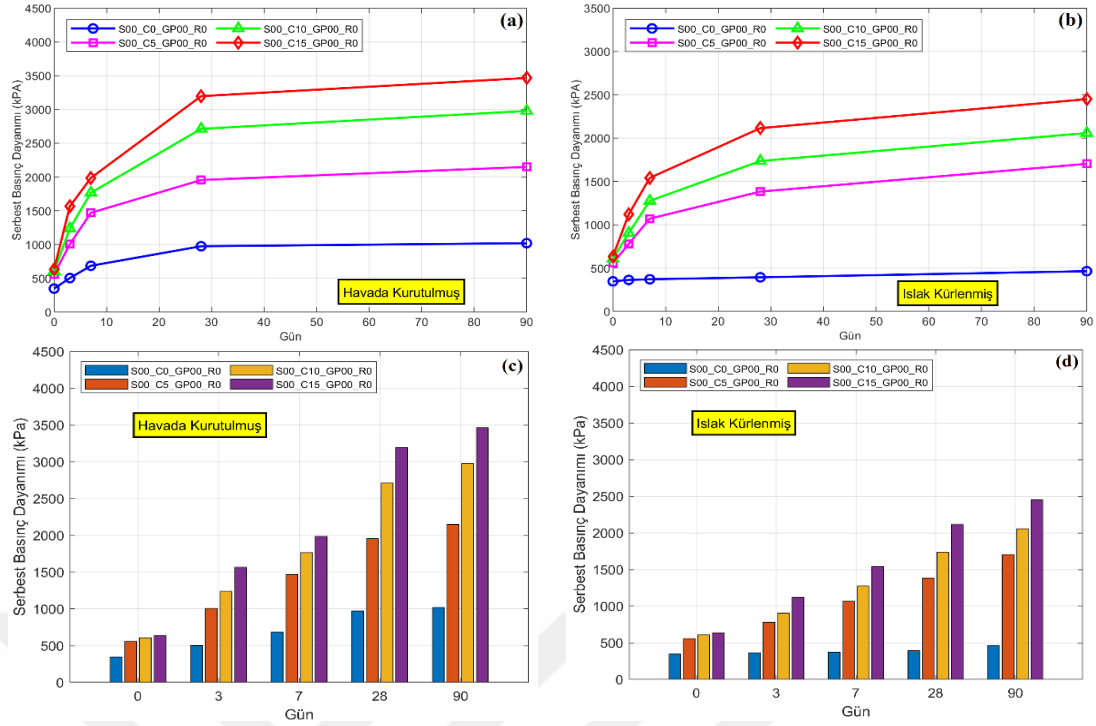
sonra havadaki karbon dioksit (CO_2) ile reaksiyona girerek $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ kristalleri oluşturmuştur. Kristalleşmenin hava ile temas yüzeyinde gerçekleştiği göz önüne alındığında, kristalleşme yalnızca numunelerin yüzeyinde meydana gelmiş, numune iç kısımlarında ise kristallenme oluşmamıştır. Havayla teması önleyen plastik filmle sarılmış numunelerde kristalleşme gözlemlenmemiştir. Bu durum kristallenmenin SH'nin ortamdaki CO_2 ile reaksiyonu yoluyla meydana geldiğinin bir başka göstergesidir. Sodyum karbonat, toprağın pH seviyesini artırır. pH seviyesindeki artışla birlikte, toprak alkali özellikler gösterir. Ayrıca katı halde bulunan yüksek miktardaki sodyum karbonat kristallerinin sağlık ve çevre açısından potansiyel olarak zararlı ve nispeten toksik özellikleri bulunmaktadır. Numunelerdeki kristalleşme özellikle dış kısımlarda olup (dış yüzeyde) iç kısımlarda kristalleşme gözlenmemiştir. Buda dış kısımdan nem alan SH'nin zamanla nemi kaybedip kristalleşmenin sebebini açıklamaktadır. Şekil 4.8'deki numuneler arasında en yüksek kristalleşme, killi zemin + alkali aktivatör içeren, yani alüminosilikat kaynağı olmayan stabilize edilmiş numunelerde gözlenmiştir. ÖYFC oranının yüksek olduğu malzemelerde kristalleşme daha düşüktür. ÖYFC miktarının artmasıyla SH geopolimer oluşumunda daha fazla kullanıldığı cüruf miktarının azalmasıyla SH'nin daha az kullanıldığı ve kullanılmayan SH'nin ise sodyum karbonat monohidrat kristallerine dönüştüğü görülmüştür.



Şekil 4.9. SS/SH oranı 1 olan numunelerde gözlemlenen kristallerin FTIR spektrumları (Yıldırım ve ark, 2024).

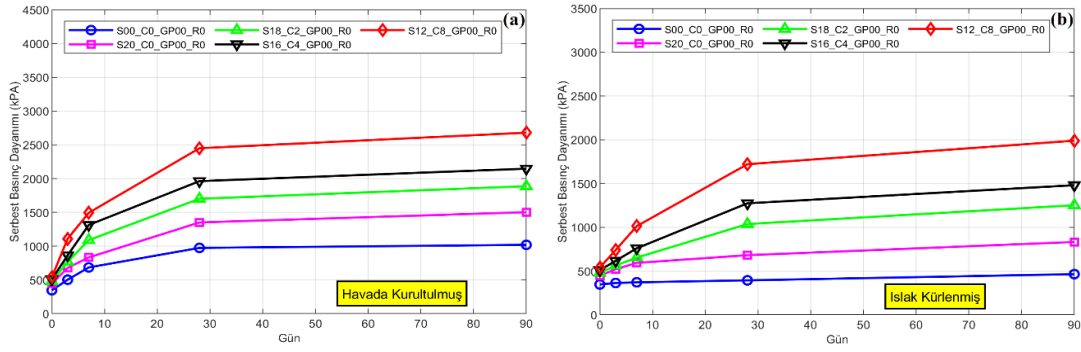
0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin her birinde hem havada kurutma hem de ıslak kürleme koşullarında üçer adet numune hazırlanmıştır. Buna göre SBD deneyi için toplam 756 silindirik numune elde edilmiştir. 0 günlük numuneler hazırlandıktan hemen sonra SBD deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin kür şartları ve kür zamanlarına göre ölçülen SBD değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 4.10'da hem havada kurutulmuş hem de ıslak kürlenmiş killi zemin ve %5, %10 ve %15 çimento ile stabilize edilmiş kil numunelerine ait SBD değerleri ve zaman içerisindeki

değişimleri görülmektedir. Killi zeminin anlık SBD değeri 346,61 kPa olarak bulunmuştur. Havada kurutulmuş killi zemin 3, 7, 28 ve 90. günlerde SBD değeri sırasıyla 502,69 kPa, 684,72 kPa, 974,18 kPa ve 1019,18 kPa, ıslak kürlenmiş killi zemin ise aynı kür sürelerinde 363,1 kPa, 371 kPa, 393,6 kPa ve 464,2 kPa olarak bulunmuştur. Doğal killi zeminin dayanım değerinin zaman içinde arttığı görülmektedir. Havada kurutulmuş kil özellikle 28. günden sonra dayanım değerinde artış hızı yavaşlamıştır. Bu seviyede artış oranı %4,63'tür. Killi zemin herhangi bir bağlayıcı içermediği için dayanım değerleri oldukça düşük kalmıştır. %5 OPC katkılı killi zeminin anlık SBD testinde dayanım değeri 558,7 kPa olarak hesaplanmıştır. Havada kurutulmuş %5 OPC katkılı kilin 90. gün küresinde SBD değeri 2149,2 kPa, ıslak kürlenmiş kilin ise 1703 kPa değerinde ulaşmıştır. %5 OPC katkısı ile stabilize edilmiş killi zemin 90 gün sonunda SBD değeri havada kurutulmuş doğal killi zemine kıyasla %110,88, ıslak kürlenmiş kile kıyasla %266,87 oranında artış gözlenmiştir. %10 OPC ile stabilize edilmiş killi zeminin anlık yapılan SBD testlerine göre 607,38 kPa dayanım göstermiştir. 90 günlük kür süresi sonrasında havada kurutulmuş %10 OPC katkılı killi zeminin SBD değeri 2978,3 kPa, ıslak kürlenmiş killi zeminin ise 2058,79 kPa olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre %10 OPC katkısı havada kurutulma şartları altında killi zeminde %192,2, ıslak kütleme şartları altında ise %343,52 oranında artış meydana getirmiştir. Şekil 4.10'da görülen katkılar içerisinde en büyük artış %15 OPC katkısında gözlenmiştir. Bu katkı değerinde 90. günlük kür süresi sonunda havada kurutulmuş numunede SBD değeri 3466,3 kPa, ıslak kürlenmiş numunede ise 2449,7 kPa olmuştur. Killi zemine göre dayanım artışı ise aynı sırayla %240,1 ve %427,7'dir. OPC miktarı arttıkça hem havada kurutulan hem de ıslak kürlenmiş numunelerin SBD değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Islak kürlenen numunelerde SBD değerlerindeki artış oranı havada kurutulmuş numunelere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, ıslak kütlemede OPC'nin su ile daha verimli şekilde reaksiyona girmesi, buna karşılık havada kurutulan numunelerde suyun hızla buharlaşması nedeniyle bu reaksiyonun yeterince gerçekleşmemesidir. Islak kürlenmiş numunelerde reaksiyona girmeyen fazla su miktarının bulunması dayanım değerini düşürmektedir. Şekil 4.10'daki numunelerin SBD değerleri grafiklerine göre 0, 3, 7 ve 28 günlerdeki dayanım değerlerinde hızla bir artış yüzdesi görülürken 28 ve 90 gün arasında daha düşük bir artış yüzdesi göstermektedir. Özellikle OPC katkısının kullanıldığı numuneler için ilk 28 günde dayanımlarının büyük bir kısmının tamamlandığı söylenebilir.



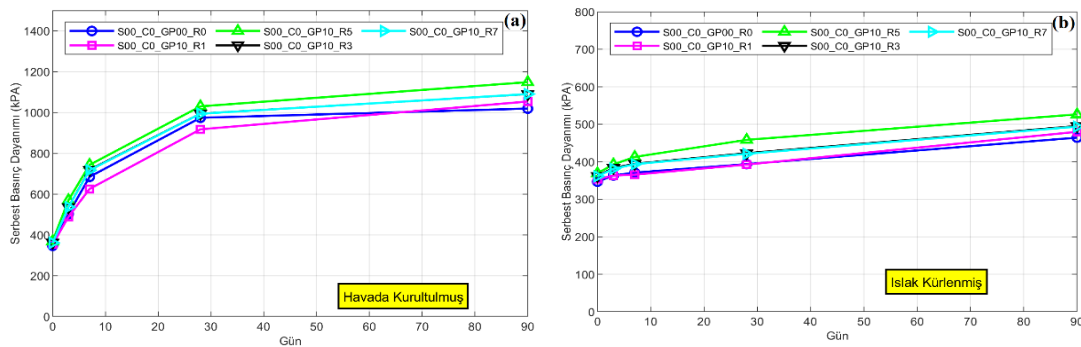
Şekil 4.10. Killi zemin ve %5, %10 ve %15 OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin SBD değerlerinin zamana bağlı değişimi a) Havada kurutma çizgi grafik b) Islak kürlenmiş çizgi grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).

Şekil 4.11 killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC ve OPC içeren katkıları ile stabilize edilen killi zeminin zamana bağlı dayanım değerlerindeki değişim görülmektedir. Havada kurutulan numunelerde, 90 günlük kür sonunda SBD değerleri sırasıyla, killi zemin + %20 ÖYFC için 1502,7 kPa, %18 ÖYFC + %2 OPC için 1887,5 kPa, %16 ÖYFC + %4 OPC için 2147 kPa ve %12 ÖYFC + %8 OPC için 2680 kPa olarak ölçülmüştür. Aynı karışımların ıslak kürleme koşullarında elde edilen 90 günlük SBD değerleri ise sırasıyla 831,8 kPa, 1251,7 kPa, 1480,4 kPa ve 1989,3 kPa'dır. OPC katkı oranı arttıkça dayanım değerlerinde belirgin bir artışın olduğu gözlenmektedir. %20 ÖYFC katkısı ile stabilize edilen numunelerin 90 günlük kür sonunda dayanım değerlerindeki artış miktarı killi zemine oranla havada kurutulmuş numuneler için %47,7, ıslak kürlenmiş numuneler için ise %79,2'dir. Hem havada kurutulmuş hem de ıslak kürlenmiş numunelerde killi zeminin dayanımında en yüksek artış miktarı %12 OPC + %8 ÖYFC katkısı ile stabilize edilen numunelerde görülmüştür. %8 OPC içeren numuneler, %2 OPC içeren numunelere göre yaklaşık %42 daha fazla dayanım sergilemiştir. Havada kurutulmuş numunedeki artış miktarı %162,9 iken ıslak kürlenmiş numunelerde %328,6'dır. Islak kürlenmiş numunelerdeki artış yüzdesinin fazla olması OPC'nin su ile reaksiyonundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.11. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin SBD değerlerinin zamana bağlı değişimi a) Havada kurutma b) Islak kürlenmiş (Yıldırım ve ark, 2024).

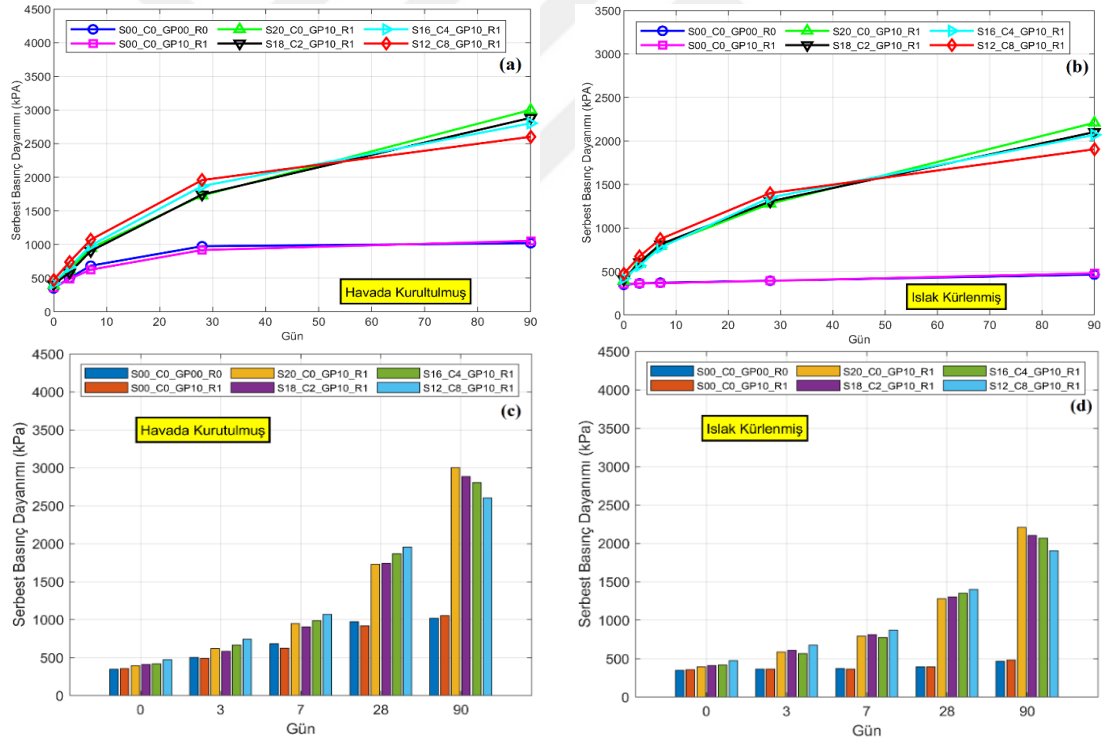
Alkali aktivatörlerin killi zemin stabilizasyonuna etkisini bağımsız olarak değerlendirmek amacıyla, yalnızca alkali aktivatör kullanılarak stabilizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, SS/SH oranları 1, 3, 5 ve 7 olarak uygulanmıştır. Şekil 4.12’de, alkali aktivatörlerin tek başına uygulandığı stabilizasyonun zamana bağlı dayanım değişimi etkisi görülmektedir. Havada kurutulmuş SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7 için 90 günlük kür için SBD değerleri sırasıyla 1053,9 kPa, 1090,2 kPa, 1148,9 kPa ve 1090,5 kPa, ıslak kürlenmiş numunelerin ise aynı sıra ile 479,7 kPa, 494,8 kPa, 526,1 kPa ve 493,4 kPa olarak ölçülmüştür. Killi zeminin dayanımında artış yüzdesi SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7 için havada kurutulmuş numunelerde sırasıyla %3,4, 7, 12,7 ve 7, ıslak numunelerde ise aynı sıra ile %3,3, %6,6, %13,3 ve %6,3’tür. Hesaplanan artış yüzdelere göre tek başına alkali aktivatörlerin killi zeminin dayanımının artışında anlamlı derece de bir etki gözlenmemiştir. Bunun temel nedeni kilin mineralojik yapısı ve alkali aktivasyon için gerekli alümina ve silika içeriğinin sağlanamaması olduğu söylenebilir.



Şekil 4.12. Killi zemin ve alkali aktivatörler ile stabilize edilen killi zeminlerin SBD değerlerinin zamana bağlı değişimi a) Havada kurutma b) Islak kürlenmiş (Yıldırım ve ark, 2024).

Şekil 4.13’te, SS/SH oranı 1 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC içeren stabilize numunelerin SBD değerlerindeki zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Bu karışım

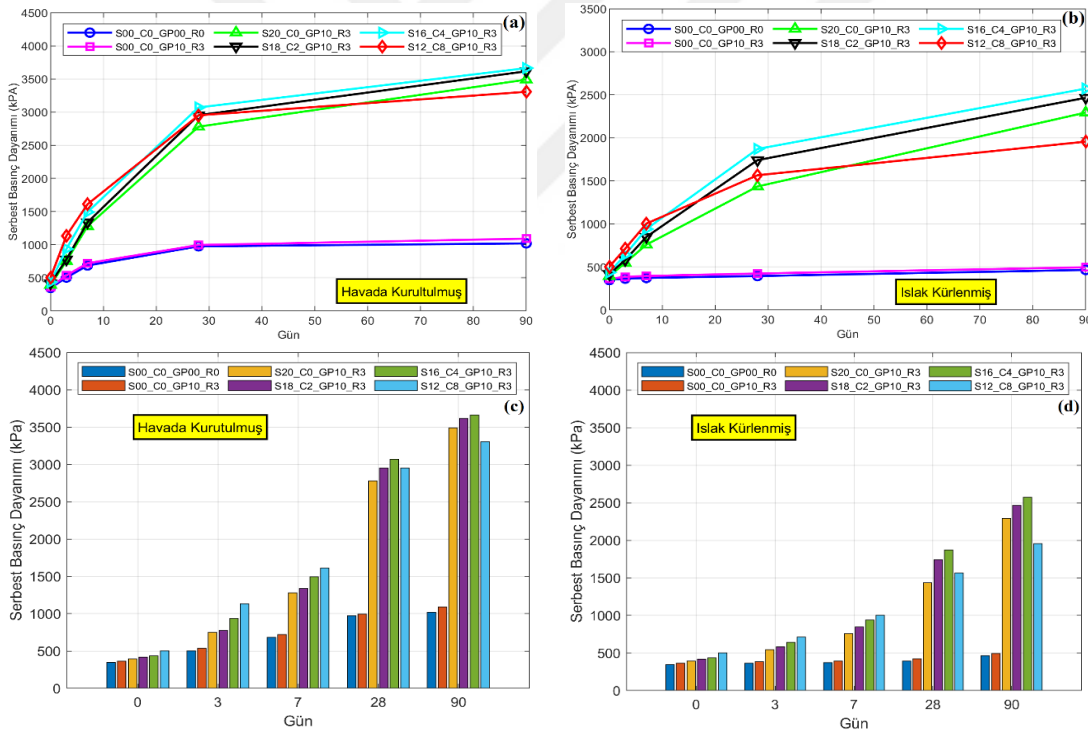
grubunda en yüksek dayanımı, %20 ÖYFC ve SS/SH=1 oranında karışım içeren numune sağlamıştır ve 90 günlük kür süresi sonunda, havada kurutulmuş koşullarda 3000,4 kPa, ıslak kürlenmiş koşullarda ise 2208,8 kPa SBD değeri elde edilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH=1, %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=1 ve %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH=1 karışımları ile stabilize edilmiş numuneler izlemektedir. Özellikle SS ve SH, yüksek oranda ÖYFC'nin bulunduğu karışımlarda daha fazla reaksiyon gerçekleştirmiş ve daha yüksek dayanım sağlamıştır. Buna göre SS ve SH, OPC'yi aktive etmek yerine, daha çok ÖYFC ile reaksiyona girmiştir. %20 ÖYFC + SS/SH=1 ile stabilize edilmiş zeminin SBD değeri killi zemine göre 90 günlük kür süresi sonunda havada kurutulmuş şartlar altında %194,4, ıslak kürlenmiş şartlar altında ise %375,8 oranında artış sağlamıştır. Islak kür şartlarında daha fazla dayanım artışı gözlenmesinin temel nedenlerinden biri, başlangıçta yüksek su içeriğine sahip killi zeminin oldukça düşük bir başlangıç dayanımına sahip olmasıdır.



Şekil 4.13. Killi zemin ve SS/SH oranı 1 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize edilmiş killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgi grafik b) Islak kürlenmiş çizgi grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).

Şekil 4.14'te, SS/SH oranı 3 olan ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ile stabilize edilen killi zemin numunelerin 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda ölçülen SBD

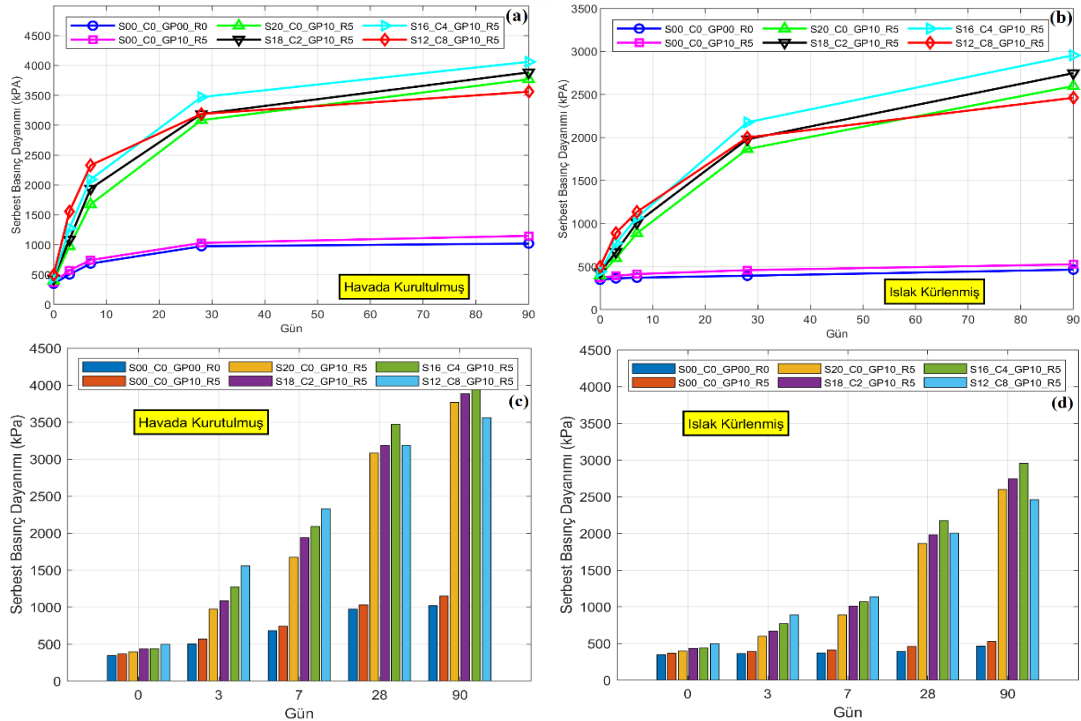
değerleri görülmektedir. Bu numune grubu içerisinde hem havada kurutma hem de ıslak kürlenme şartları altında en yüksek dayanımı %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=3 karışımı ile stabilize edilen numuneler göstermiştir. Bu numunelerin 90 günlük kür süresi sonunda, SBD değerleri havada kurutma koşullarında 3,663,8 kPa, ıslak kürlenme koşullarında ise 2,571,8 kPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, söz konusu karışım kilin dayanımında havada kurutma koşullarında %259,5, ıslak kürlenme koşullarında ise %454 oranında bir artış sağlamıştır. En düşük dayanım değerleri ise sadece aktivatörün kullanıldığı numunelerde olmuştur. OPC'nin kullanıldığı numuneler arasında %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH=3 karışımlı numuneler diğerlerinden daha düşük dayanım göstermiştir. OPC'nin belli bir orandan sonra dayanıma katkısı azalmıştır. Zemin stabilizasyonunda hem OPC hem de alkali aktivasyon katkı sağlamıştır. Özellikle bazı karışımlarda alkali aktivasyonun dayanım artışını destekleyici etkisi dikkat çekmiştir.



Şekil 4.14. Killi zemin ve SS/SH oranı 3 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgi grafik b) Islak kürlenmiş çizgi grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).

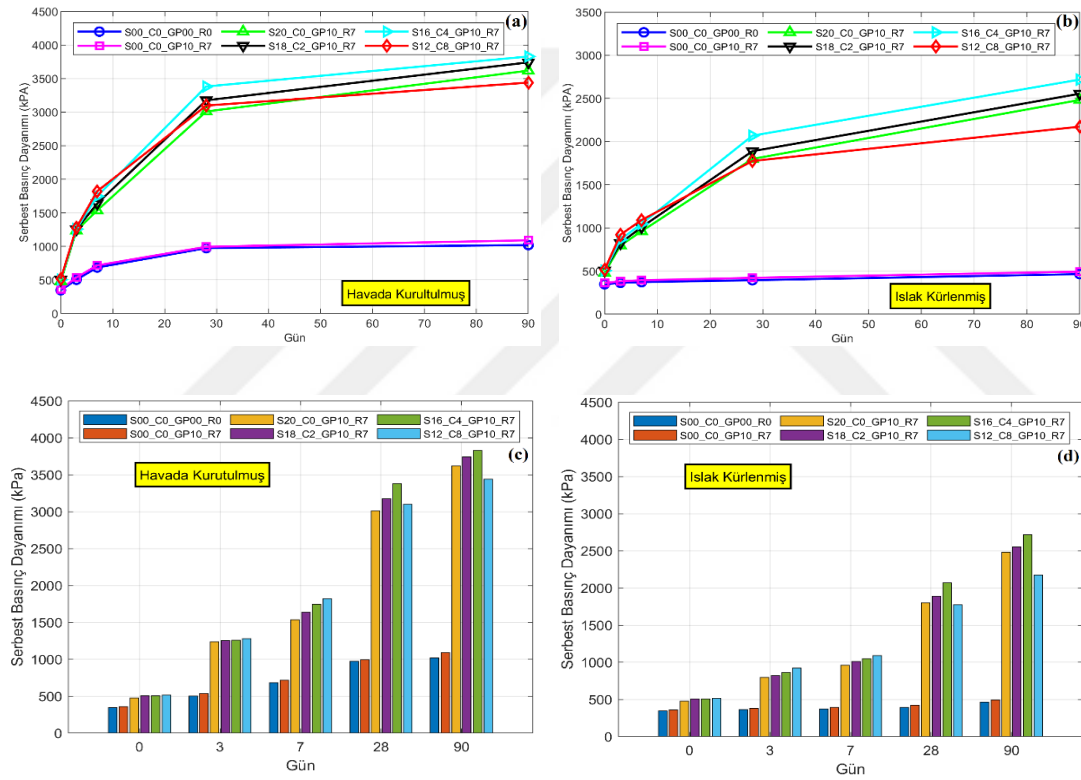
Alkali aktivatörlerde kullanılan bir diğer SS/SH oranı 5'tir. Diğer alkali aktivatör oranlarında olduğu gibi, bu oranda da aynı ÖYFC ve OPC yüzdeleri kullanılmıştır. Bu oran kullanılarak beş farklı karışım hazırlanmıştır. Şekil 4.15'te killi zeminin ve SS/SH=5 oranı kullanılarak stabilize edilen numunelerin kür şartları ve zamana bağlı

SBD değerlerinin değişimleri görülmektedir. SS/SH oranının 5 olarak kullanıldığı %20 ÖYFC, %18 ÖYFC + %2 OPC, %16 ÖYFC + %4 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC için 90 günlük havada kurutulmuş numunelerin SBD değerleri sırasıyla 3768,2 kPa, 3884 kPa, 4060,9 kPa, 3560,3 kPa ve ıslak kürlenmiş numunelerin ise aynı sırayla 2598,2 kPa, 2747,4 kPa, 2955,5 kPa, 2461,4 kPa'dır. Bu karışım oranları killi zeminin SBD değerini havada kurutulma şartları altında sırasıyla %269,7, %281,1, %298,4, %249,3 kat, ıslak kürlenmiş koşullar altında ise %459,7, %491,9, %536,7 ve %430,3 kat arttırmıştır. En yüksek dayanım artışı %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH = 5 karışımı ile stabilize edilmiş numunede, en düşük dayanım artışı ise %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH = 5 karışımı ile stabilize edilmiş numunede gözlenmiştir. %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH = 5 karışımı ile stabilize edilmiş numunelerin SBD değerleri ilk 28 günde yüksek bir artış gösterirken 28 gün ile 90 gün arasında artış yüzdesi diğer numunelere göre daha düşüktür. SS/SH oranı 3 iken, en yüksek dayanım %16 ÖYFC + %4 OPC içeren numunede elde edilmiştir. SS/SH oranı 5'e yükseldiğinde, yine aynı karışım en yüksek dayanımı göstermiş, ancak bu kez SBD değerinde artışı daha belirgin olmuştur. SS/SH oranının 5 olması, diğer oranlara kıyasla numunelerin SBD değerini artırmıştır.



Şekil 4.15. Killi zemin ve SS/SH oranı 5 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgisel grafik b) Islak kürlenmiş çizgisel grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).

Çalışmada en yüksek SS/SH oranı olarak 7 kullanılmıştır. Diğer oranlarda olduğu gibi bu oran değerinde de aynı karışımlar kullanılmıştır. Şekil 4.16'da SS/SH =7 oranının kullanılarak stabilize edilen numunelerin SBD grafikleri görülmektedir. Bu grup içerisinde en düşük dayanım değeri sadece alkali aktivatörlerin kullanıldığı karışımda elde edilmiştir. ÖYFC ve OPC içeren karışımlarda hem havada kurutulmuş hem de ıslak kürlenmiş şartlar altında en yüksek dayanım değerini %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=7 içeren numuneler göstermektedir. Bu numuneler havada kurutulmuş şartlar altında 3828,9 kPa, ıslak kürlenmiş şartlar altında ise 2718,3 kPa SBD değeri göstermiştir. Bu karışım killi zeminin dayanım değerini havada kurutma şartları altında %254,8, ıslak kürlenme şartları altında ise %434,8 oranında arttırmıştır.

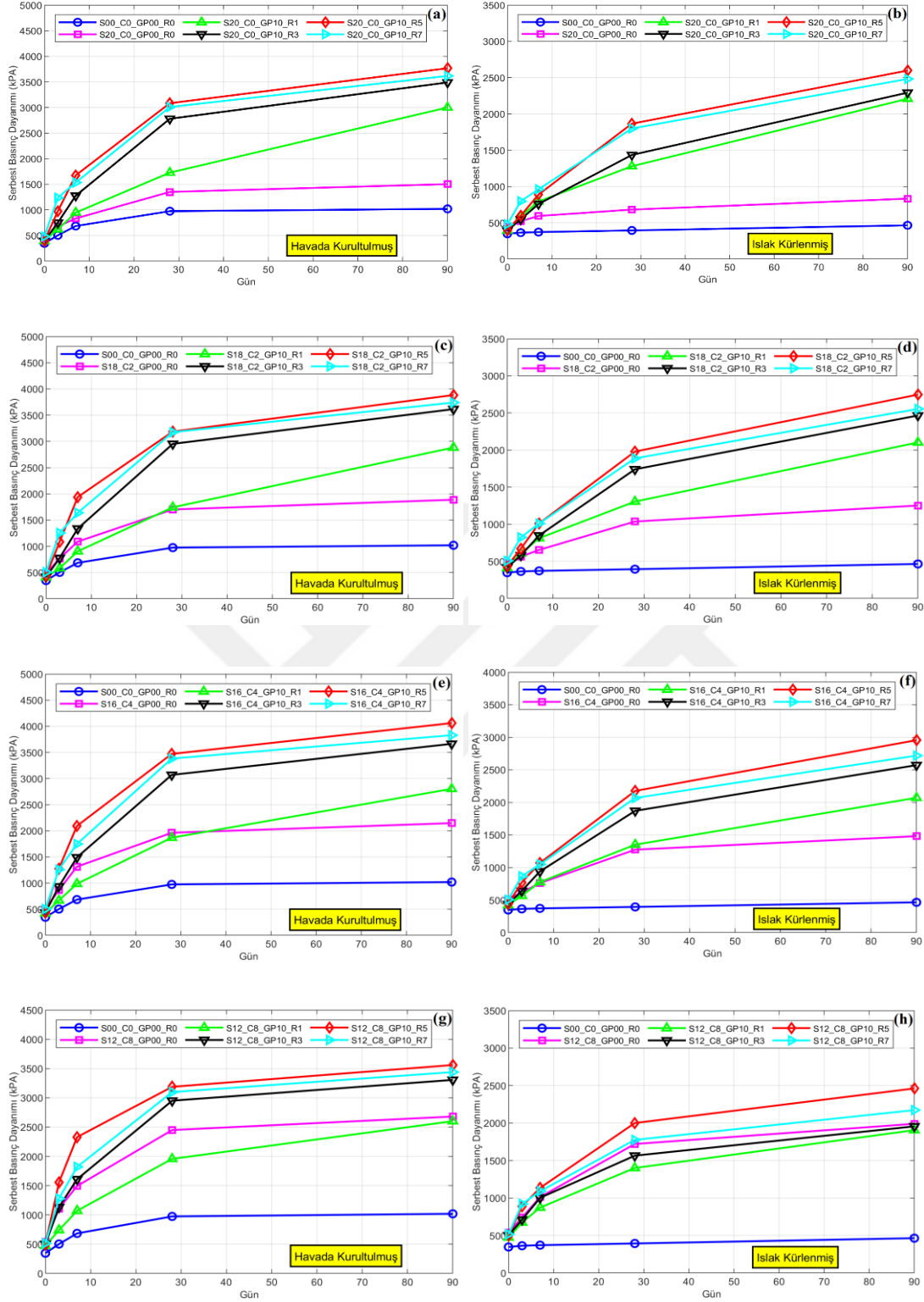


Şekil 4.16. Killi zemin ve SS/SH oranı 7 olan ve farklı oranlarda ÖYFC ile OPC katkıları ile stabilize killi zeminlerin SBD değerlerinin zamanla değişimi a) Havada kurutma çizgisel grafik b) Islak kürlenmiş çizgisel grafik c) Havada kurutma sütun grafik d) Islak kürlenmiş sütun grafik (Yıldırım ve ark, 2024).

Şekil 4.17'de, ÖYFC ve OPC oranları sabit tutulmuş ve SS/SH oranındaki değişimlere bağlı olarak SBD değerlerinin, havada kurutma ve ıslak kürlenme koşullarında zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.17 a ve b'de %20 ÖYFC, c ve d'de %18 ÖYFC + %2 OPC, e ve f'de %16 ÖYFC + %4 OPC ve g ve h'de %12 ÖYFC + %8 OPC karışımları sabit olup SS/SH oranları değişmiştir. Alkali aktivatör içeren karışımlarla

stabilize edilmiş numuneler, aktivatör içermeyenlere göre daha yüksek dayanım göstermiştir. SS/SH oranı 1 olan numuneler dışında kalan numunelerde, SBD değerleri 3, 7 ve 28 günlük kür süreleri boyunca hızlı bir artış göstermiştir. Ancak 28 ile 90 gün arasında dayanım artış hızı daha düşük kalmıştır. Özellikle %8 OPC içeren numunelerin ilk 28 günlük dayanım kazanım hızı diğer numunelere oranla daha hızlı olduğu görülmektedir. Buna karşın bu numunelerin 28 günden sonraki dayanım kazanma hızı diğer numunelere oranla daha düşüktür. Bunun temel nedeni, bu karışımın diğerlerine kıyasla daha yüksek OPC içermesi ve bu sayede reaksiyonlar sonucunda daha hızlı dayanım kazanmasıdır. Islak kürlenmiş numuneler, havada kurutulmuş numunelere göre 28 günden sonra dayanım kazanma oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Islak kürlenmede suyun numune bünyesinde tutulması karışımların reaksiyonunun 28 günden sonra da kısmen devam etmesine neden olmaktadır. SS/SH oranı 1 olan numunelerde fazla SH, reaksiyona girmeden kalarak nem çekmiş ve $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ kristalleri oluşturmuştur. Oluşan nem, numunelerin dayanımının düşük olmasına neden olmuştur. Bu durum, ilk etapta düşük dayanıma yol açmış, ancak zamanla nemin azalması numunelerin dayanımlarını olumlu yönde etkilemiştir. Şekil 4.17'deki SS/SH=1 olan numunelerin zamana bağlı dayanım kazanma hızlarının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Özellikle 28 günlük kür süresi sonunda dayanımlar diğer alkali aktivatör kullanılan numunelere göre belirgin bir şekilde düşük olduğu görülmektedir. Alkali aktivatörlerin kullanıldığı numuneler arasında en yüksek dayanım SS/SH=5 oranının kullanıldığı numunelerde elde edilmiştir. Bu oranı sırasıyla 7, 3 ve 1 takip etmektedir.

Tablo 4.2'de tüm numuneler için ölçülen SBD değerleri görülmektedir. Tabloda SBD değerlerine göre renk ölçeği verilmiştir. Havada kurutulmuş numunelerde en yüksek SBD değerini gösteren 5 karışım sırasıyla %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=5, %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH=5, %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=7, %20 ÖYFC + SS/SH=5 ve %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH=7'dir. Bu numunelerin SBD değerleri sırasıyla 4061 kPa, 3884 kPa, 3829 kPa, 3768 kPa ve 3741 kPa'dır. Islak kürlenmiş numunelerde ise en yüksek SBD değerini gösteren 5 karışım sırasıyla %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=5, %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH=5, %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=7, %20 ÖYFC + SS/SH=5 ve %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=3'tür. Bu numunelerin SBD değerleri sırasıyla 2956 kPa, 2747 kPa, 2718 kPa, 2598 kPa ve 2572 kPa'dır.



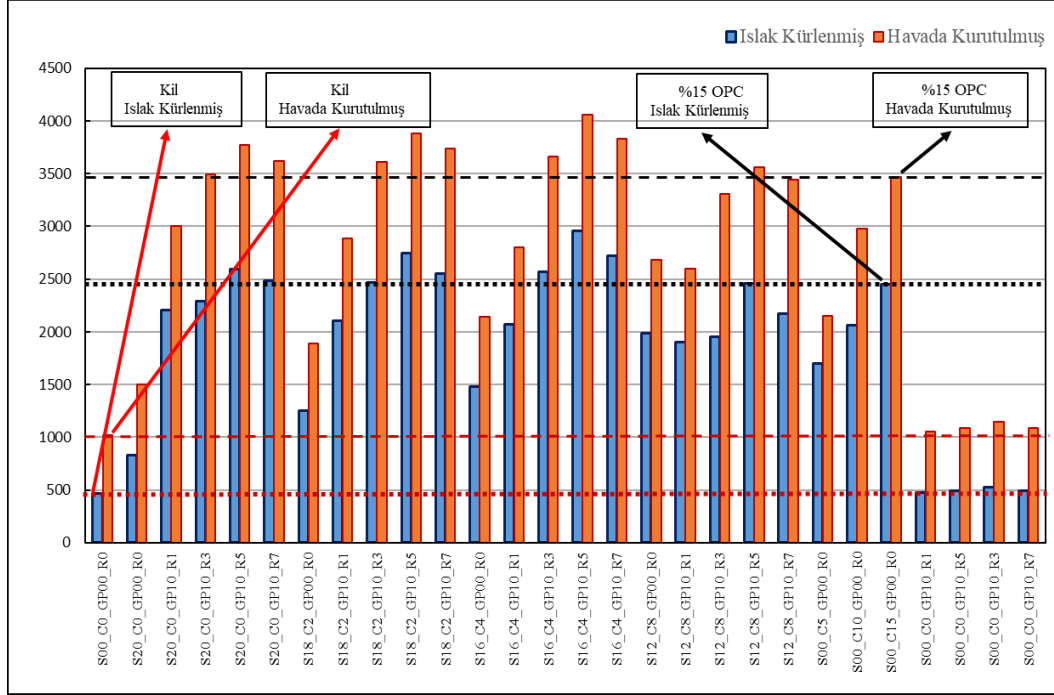
Şekil 4.17. Killi zemin ve farklı karışımlarla stabilize edilen killi zeminlerin zamana bağlı SBD değerleri. (a, b): %20 ÖYFC, (c, d): %18 ÖYFC + %2 OPC, (e, f): %16 ÖYFC + %4 OPC, (g, h): %12 ÖYFC + %8 OPC, a, c, e, g: havada kurutma, b, d, f, h: ıslak kürlenmiş koşulları (Yıldırım ve ark, 2024).

Tablo 4.2. Killi zemin ve 27 farklı karışım ile stabilize edilen killi zeminlerin kür şartları ve kür sürelerine göre SBD değerleri.

Karışım Sembolleri	Serbest Basınç Dayanımı (kPa)										kPa
	Havada kurutulmuş (günler)					Islak kürlenmiş (günler)					
	0	3	7	28	90	3	7	28	90		
1 - S00-C0-GP00-R0	346.6	502.7	684.7	974.2	1019	363.1	371	393.6	464.2	4000	
2 - S20-C0-GP00-R0	446.1	677	832.9	1351	1503	520.5	593	680.8	831.8	3500	
3 - S20-C0-GP10-R1	392.1	620.8	946.4	1727	3000	588	792.6	1279	2209	3000	
4 - S20-C0-GP10-R3	392.8	750.6	1278	2780	3490	545.8	758	1434	2293	2500	
5 - S20-C0-GP10-R5	397.8	972.1	1675	3084	3768	597	887.9	1866	2598	2000	
6 - S20-C0-GP10-R7	478.5	1235	1535	3010	3618	795.7	960.8	1799	2482	1500	
7 - S18-C2-GP00-R0	478.5	767.1	1089	1702	1887	562.2	653.8	1037	1252	1000	
8 - S18-C2-GP10-R1	408.7	582.2	903.4	1743	2883	605.4	811.6	1305	2102	500	
9 - S18-C2-GP10-R3	416.4	776.1	1337	2953	3615	580.4	848.4	1741	2465	0	
10 - S18-C2-GP10-R5	434.1	1086	1939	3188	3884	670.4	1011	1980	2747		
11 - S18-C2-GP10-R7	506	1254	1638	3176	3741	822.6	1009	1888	2554		
12 - S16-C4-GP00-R0	509.5	864.9	1313	1962	2147	616.6	759.6	1274	1480		
13 - S16-C4-GP10-R1	419.7	667.3	986.3	1868	2803	566	775.1	1350	2070		
14 - S16-C4-GP10-R3	434.3	934.4	1492	3070	3664	640.8	939.2	1870	2572		
15 - S16-C4-GP10-R5	440.4	1275	2092	3471	4061	771.2	1070	2176	2956		
16 - S16-C4-GP10-R7	504.6	1258	1747	3382	3829	864	1047	2068	2718		
17 - S12-C8-GP00-R0	540.6	1110	1494	2450	2680	739.4	1013	1721	1989		
18 - S12-C8-GP10-R1	472.9	740.7	1071	1957	2601	673.1	872.4	1400	1905		
19 - S12-C8-GP10-R3	502.1	1133	1610	2951	3306	711.3	1003	1565	1956		
20 - S12-C8-GP10-R5	498.8	1556	2329	3188	3560	890.4	1135	2000	2461		
21 - S12-C8-GP10-R7	516	1278	1821	3098	3440	921	1091	1775	2172		
22 - S00-C5-GP00-R0	558.8	1004	1469	1955	2149	778.8	1070	1383	1703		
23 - S00-C10-GP00-R0	607.4	1237	1766	2713	2978	904.5	1277	1736	2059		
24 - S00-C15-GP00-R0	635.1	1565	1985	3197	3466	1120	1541	2115	2450		
25 - S00-C0-GP10-R1	353.2	488.6	625.5	917.6	1054	363.1	365.5	392.4	479.7		
26 - S00-C0-GP10-R3	362	536.3	719.1	994.4	1090	383.5	394.4	422.7	494.8		
27 - S00-C0-GP10-R5	369.1	570.1	743.4	1030	1149	392.9	412.8	458.3	526.1		
28 - S00-C0-GP10-R7	361.1	536.1	716.9	994.1	1090	381.1	393.3	421	493.4		

Şekil 4.18’de tüm numunelerin 90 günlük SBD değerleri bar grafik olarak gösterilmiştir. Şekildeki kırmızı noktalı çizgi killi zeminin ıslak kürlenmiş numunesinin SBD değerini, kırmızı kesikli çizgi ise yine killi zeminin hava kurutulmuş SBD değerini göstermektedir. Sadece alkali aktivatörler kullanılarak stabilize edilen numuneler hariç diğer tüm stabilize edilmiş numuneler daha yüksek SBD değerleri göstermiştir. Killi zeminin stabilizasyonu için önerilen karışımların performansı çimento katkısı ile karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.18’de siyah noktalı çizgi %15 OPC ile stabilize edilen killi zeminin ıslak kürlenmiş SBD değerini, siyah kesikli çizgi ise havada kurutulmuş numunenin SBD dayanım değerini

göstermektedir. Islak kürlenmiş koşullar altında 9 numunenin SBD değeri, havada kurutulmuş koşullar altında ise 10 numunenin SBD değerleri %15 OPC ile stabilize edilen numunelerden yüksek çıkmıştır. Özellikle SS/SH=5 oranının kullanıldığı tüm numunelerde %15 OPC ile stabilize edilen numunelerden daha yüksek SBD değeri elde edilmiştir.

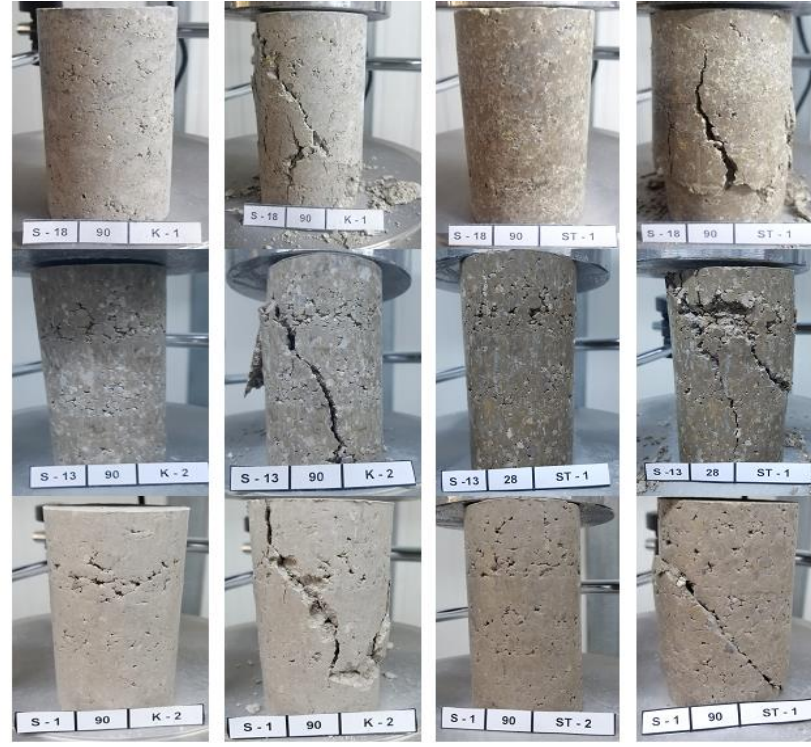


Şekil 4.18. Killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin 90 günlük havada kurutulmuş ve ıslak kürlenmiş numunelerin SBD değerleri.

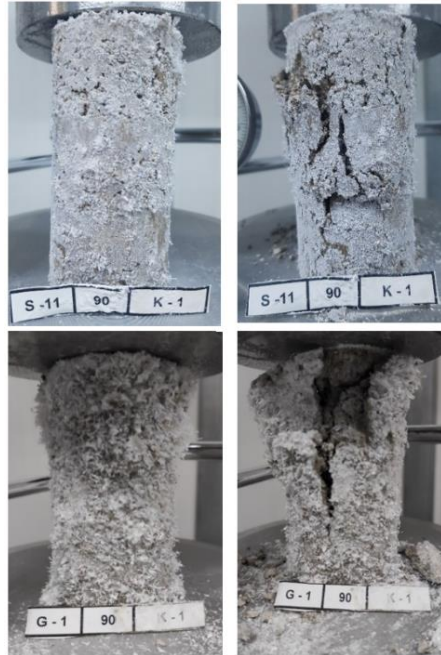
Şekil 4.19’da SBD deneyi yapılan numunelerin bir kısmının kırım öncesi ve sonrasına ait fotoğrafları görülmektedir. Numunelerin altında yazan ilk sütun (Örn; S-13) numune kodunu (numarasını), ikinci sütun ise (28 veya 90) kür süresini ve üçüncü sütunda belirtilen K simgesi havada kurutma, ST simgesi ise ıslak kürlenme şartlarını ifade etmektedir. Örnek olarak K-1; havada kurutulmuş 1. numuneyi, K-2; havada kurutulmuş 2. numuneyi, ST-1 ıslak kürlenmiş 1. numuneyi, ST-2 ıslak kürlenmiş 2. numuneyi tanımlamaktadır. Islak kürlenmiş numuneler içeriğinde su muhtevası olduğundan dolayı daha koyu renkte gözükmektedir.

Şekil 4.20’de SS/SH oranı 1 olan numunelerin SBD deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları görülmektedir. Fotoğrafta görülen numuneler 90 günlük havada kurutulmuştur. S00_C0_GP10_R1 (G1) sembolü numune 1053,9 kPa SBD dayanım değeri, S16_C4_GP10_R1 (S11) sembolü numune ise 2802,8 kPa SBD değeri göstermiştir. S16_C4_GP10_R1 numunede kristallenmeler daha çok yüzeyde kalmış,

zemin yapısında belirgin bozulmalar gözlenmemiştir. Buna karşın S00_C0_GP10_R1 numunesinde dayanım değerinde fazla bir değişiklik olmasa da gerek deney öncesi gerek deney sonrası parçalanmaların olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.19. SBD deneyi yapılan bazı numunelerin kırım öncesi ve sonrasına ilişkin fotoğrafları.



Şekil 4.20. SS/SH=1 oranının kullanıldığı S00_C0_GP10_R1 ve S16_C4_GP10_R1 karışımlarının kullanıldığı numunelerin SBD öncesi ve sonrası kırılma şekilleri.

4.2.1. Serbest basınç dayanım numunelerinin, kütle ve hacimsel değişimleri

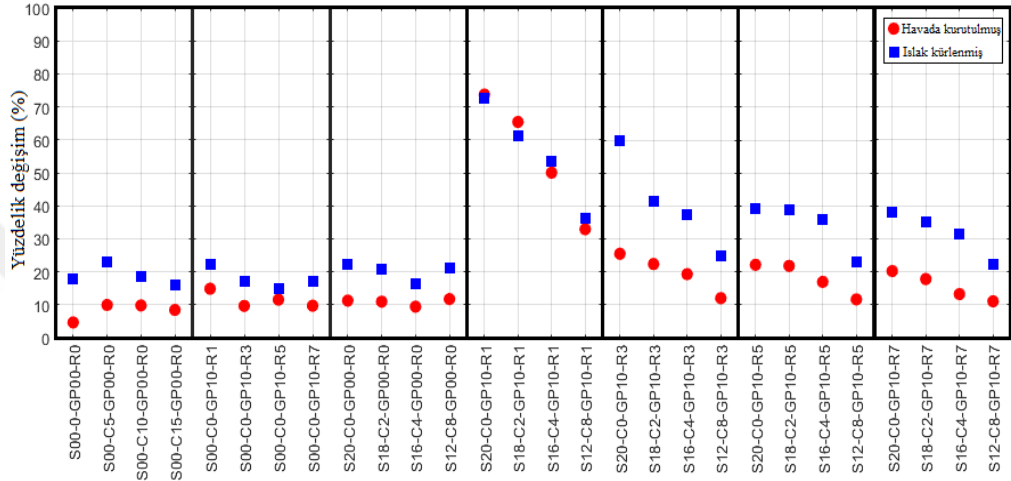
Hem havada kurutulmuş hem de ıslak kürlenmiş numunelerin 28 günlük kür süresindeki SBD değeri ile 90 günlük kür süresindeki SBD değerleri arasındaki değişim yüzdesi denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanan killi zemin ve stabilize edilmiş numunelerin yüzdelik değişimi Şekil 4.21’de görülmektedir.

$$\text{Yüzdelik Değişim} = \left(\frac{90 \text{ gündeki değer} - 28 \text{ gündeki değer}}{28 \text{ gündeki değer}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

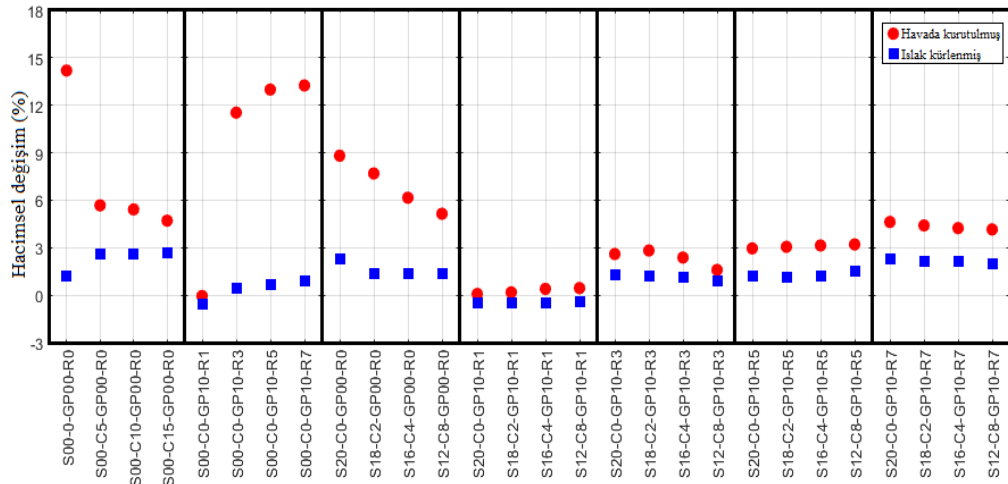
Havada kurutma koşulları altında 28-90 günler arasında stabilize killi zeminin SBD değerinin yüzdelik değişimi diğer tüm karışımlardan daha düşük olmuştur. OPC ve ÖYFC + OPC ile stabilize edilmiş numunelerin SBD değerlerindeki artış miktarı birbirine yakındır. OPC ile yapılan stabilizasyonlarda, OPC miktarı arttıkça SBD değerindeki yüzdelik değişim kısmen azalmıştır. Sadece alkali aktivatörler ile yapılan stabilizasyondaki 28-90 günler arasındaki SBD değerlerinde artış killi zemin ile yaklaşık aynıdır. ÖYFC + OPC + alkali aktivatör ile stabilize edilmiş numune gruplarının 28-90 günlük kür süreleri arasındaki SBD değerlerindeki yüzdelik değişim diğer gruplardan daha yüksek olmuştur. 28-90 günlük kür süreleri arasındaki SBD değerindeki yüzdelik değişim, SS/SH oranı arttıkça azalmıştır. Alkali aktivatör ile stabilize edilmiş numune gruplarında, SBD değerlerindeki en yüksek yüzdelik değişimler SS/SH oranı 1 olan stabilize edilmiş numunelerde gözlemlendi. Bunun nedeni, alkali aktivatördeki SH miktarının yüksek olması nedeniyle hazırlanan numunenin nemi emmesi ve su içeriğinin kısmen artmasıdır. SBD değişim yüzdesi 28 ile 90 gün arasında ıslak kürlenmiş numunelerde hava kurutulmuş numunelere göre daha yüksektir.

Şekil 4.22’de killi zeminin ve stabilize edilmiş numunelerin 90 günlük kütleme periyodu süresince hacimlerinde meydana gelen yüzdesel değişim görülmektedir. Havada kurutulmuş numunelerin hacimsel değişimleri ıslak kürlenmiş numunelere göre genel olarak daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek değişim miktarı stabilize edilmemiş killi zeminde olduğu görülmektedir. Sadece SS/SH oranı 3, 5 ve 7 olan alkali aktivatörler ile stabilize edilmiş havada kurutma şartlarındaki numunelerin hacim değişimleri yüksek olup işlem görmemiş killi zemine yakın değişimler göstermiştir. ÖYFC + OPC ile stabilize edilmiş numune gruplarında, hava kurutma koşullarında hacim değişim yüzdesi yüksek olmuştur. Bu grupta, ıslak kür koşulları

altındaki stabilize edilmiş numunelerdeki hacim değişimleri, işlem görmemiş kile yakın olmuştur. Bu grup içerisinde stabilize edilmiş numunelerdeki hacim değişim yüzdesi, OPC miktarı arttıkça azalmıştır. ÖYFC + OPC + alkali aktivatörlerle stabilize edilmiş numune gruplarının hacim değişimleri, OPC ile stabilize edilmiş numunelerden daha düşük olmuştur. SS/SH oranı arttıkça, stabilize numunelerin hacimsel değişimi artmıştır. SS/SH oranı 1 olan stabilize numunelerin hacimsel değişimi en düşük yüzdeye sahip olduğu görülmüştür.



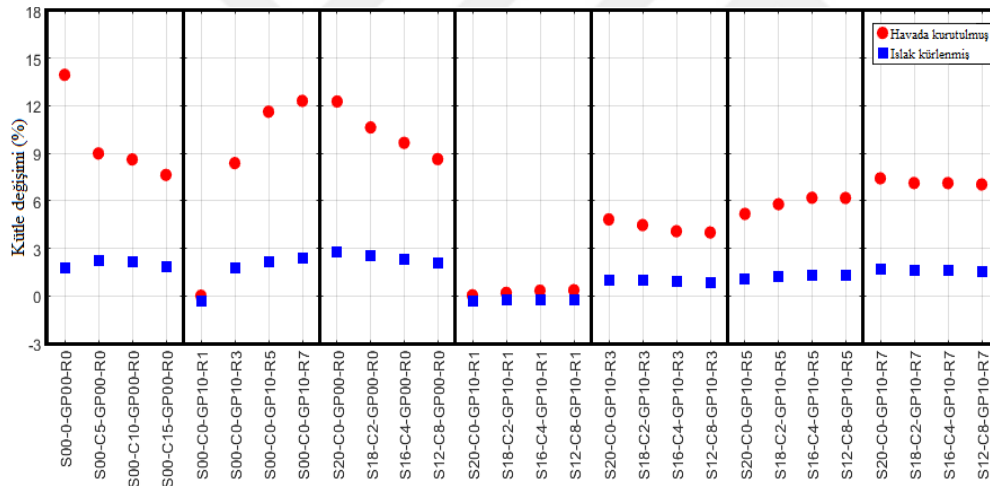
Şekil 4.21. 28 ile 90 günlük kürlenme sürelerinde killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin SBD değerlerinin yüzdesel değişimi (Yıldırım ve ark, 2024).



Şekil 4.22. Havada kurutulmuş ve ıslak kürlenmiş koşullarda, killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin 90 günlük hacimsel değişimi (Yıldırım ve ark, 2024).

SBD testi için hazırlanan numuneler ilk hazırlandıklarında boy, çap ve ağırlıkları ölçülerek karneye işlenmiştir. Kür süresi dolan numuneler SBD testi yapılmadan önce tekrar boy, çap ve ağırlık değerleri ölçülmüştür. Boy ve çap verilerinden hacimsel

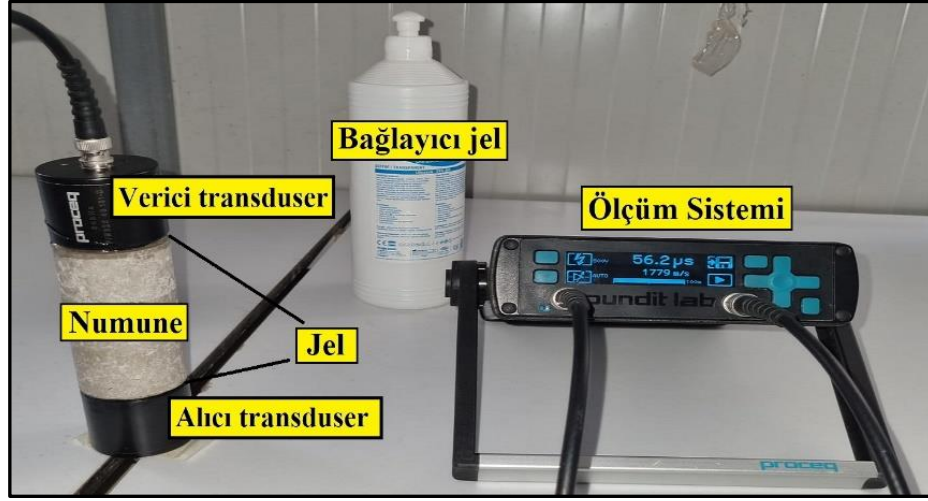
değişim miktarına ulaşılırken, ağırlık değişiminden kütle değişimine ulaşılmıştır. Bütün karışımlar için 90 günlük kütle farkı yüzdesel olarak hesaplanarak Şekil 4.23 oluşturulmuştur. Kütle değişim sonuçları hacimsel değişim sonuçları benzer bir eğilim göstermiştir. En fazla kütle değişimi havada kurutulan numunelerde görülmüştür. Bu numunelerin özellikle bünyelerindeki su buharlaşınca ağırlığında azalmalar meydana gelmiştir. OPC ile stabilize edilen numunelerde özellikle havada kurutulmuş numunelerde OPC miktarı arttıkça kütle değişiminin azaldığı görülmektedir. SS/SH =1 oranının kullanıldığı numunelerde en düşük kütle değişimi görülmektedir. ÖYFC + OPC ile stabilize edilmiş numuneler hem havada kurutma hem de ıslak kürlenmiş koşullar altında kütle değişim miktarı diğer numunelere göre nispeten yüksek çıkmıştır. Bu grup içerisinde OPC miktarı arttıkça kütle değişiminin azaldığı görülmektedir. ÖYFC + OPC + alkali aktivatör içeren numunelerde kütle değişiminde SS/SH oranının etkisi görülmektedir. SS/SH oranı arttıkça kütle değişim miktarının arttığı gözlenmiştir.



Şekil 4.23. Havada kurutulmuş ve ıslak kürlenmiş koşullarda, killi zemin ve stabilize edilmiş killi zeminlerin 90 günlük kütle değişimi (Yıldırım ve ark, 2024).

4.3. Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) Deneyleri

90 günlük kür süresi tamamlandıktan sonra hem hava kurutulmuş hem de ıslak kürlenmiş doğal killi zemin ve stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin tamamına UPV testleri uygulanmıştır. UPV testlerinde Proceq marka pundit lab ultrasonik alet kullanılmıştır (Şekil 4.24). UPV testi öncesi numune boyu ölçülmüş ve transdüserlerin numuneye iyi temas etmesi için bağlayıcı jel kullanılmıştır. Ölçüm sistemine frekans değeri, darbe genişliği, uyarı gerilim değerini, sinyal kazanç miktarı ve ölçüm birimi tanımlanmıştır. Toplamda 56 ölçüm gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.24. Çalışmada kullanılan UPV test düzeneği

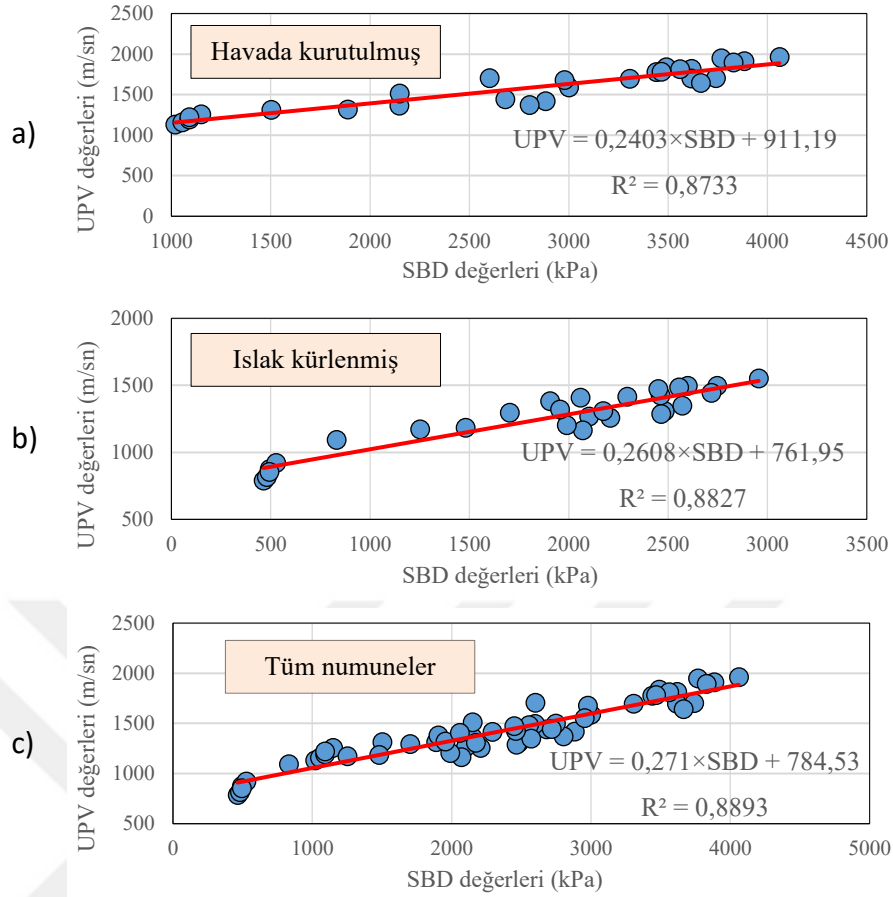
Tablo 4.3'te UPV test sonuçları görülmektedir. Havada kurutulmuş numunelerin UPV değerleri ıslak kürlenmiş numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun temel nedeni, su muhtevasının düşük olması, boşlukların azalması, yoğunluğun artması ve malzemenin dayanım kazanmasıdır. OPC ile stabilize edilen numunelerde OPC miktarı arttıkça UPV değeri artmıştır. Her iki kür şartlarında en yüksek UPV değeri %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=5 olan numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca %20 ÖYFC + SS/SH=5, %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH=5, %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH=7, %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH=5, %20 ÖYFC + SS/SH=5 ve %15 OPC karışımları ile stabilize edilen numunelerde yüksek UPV değerleri ölçülmüştür. En düşük UPV değerleri ise doğal killi zeminde ve sadece alkali aktivatörler ile stabilize edilen numunelerde görülmüştür.

Numunelerin UPV ve SBD değerleri arasındaki ilişki doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Şekil 4.25'te havada kurutulmuş, ıslak kürlenmiş ve her iki kür yöntemiyle hazırlanmış numunelere ait SBD ve UPV verileri kullanılarak dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Dağılım grafik verilerini kullanarak doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde UPV verileri bağımlı değişken (y eksen) ve SBD verileri ise bağımsız değişken (x eksen) olarak kullanılmıştır. Şekildeki kırmızı çizgi en küçük kareler yaklaşımı kullanılarak elde edilmiş en uygun regresyon eğrisini göstermektedir. Dağılım verilerinin regresyon doğrusuna yakın olduğu görülmektedir. Regresyon eğiminin pozitif yönlü olduğu görülmektedir. Buna göre SBD değeri arttıkça UPV değeri de artmaktadır. Belirlilik katsayıları (R^2) 0,87-0,89 arasında hesaplanmıştır. R^2 değerinin 1'e yakın olması veriler arasında çok iyi bir

uyum olduğunu göstermektedir. Havada kurutulmuş, ıslak kürlenmiş ve tüm numuneler için SBD ve UPV verileri için ampirik denklemler türetilmiştir. Bu ampirik denklemler kullanılarak SBD ve UPV değerleri dolaylı olarak tahmin edilebilir. Bu sayede, başta zaman tasarrufu, düşük maliyet ve hızlı karar alma olmak üzere çeşitli avantajlar sağlanabilir.

Tablo 4.3. Killi zemin ve farklı karışımlar ile stabilize edilen killi zeminlerin UPV değerleri.

Sembol	UPV değerleri (m/s)	
	Havada kurutulmuş	Islak kürlenmiş
S00_C0_GP00_R0	1131	788
S20_C0_GP00_R0	1313	1092
S20_C0_GP10_R1	1588	1256
S20_C0_GP10_R3	1836	1415
S20_C0_GP10_R5	1947	1496
S20_C0_GP10_R7	1815	1307
S18_C2_GP00_R0	1314	1172
S18_C2_GP10_R1	1417	1266
S18_C2_GP10_R3	1697	1287
S18_C2_GP10_R5	1911	1497
S18_C2_GP10_R7	1701	1483
S16_C4_GP00_R0	1362	1184
S16_C4_GP10_R1	1372	1164
S16_C4_GP10_R3	1641	1348
S16_C4_GP10_R5	1961	1551
S16_C4_GP10_R7	1895	1443
S12_C8_GP00_R0	1441	1203
S12_C8_GP10_R1	1704	1381
S12_C8_GP10_R3	1695	1319
S12_C8_GP10_R5	1812	1424
S12_C8_GP10_R7	1777	1308
S00_C5_GP00_R0	1511	1295
S00_C10_GP00_R0	1678	1407
S00_C15_GP00_R0	1783	1473
S00_C0_GP10_R1	1157	816
S00_C0_GP10_R5	1192	876
S00_C0_GP10_R3	1257	921
S00_C0_GP10_R7	1221	853



Şekil 4.25. Doğrusal regresyon analizleri a) Havada kurutulmuş numuneler b) Islak kürlenmiş numuneler ve c) Her iki kür koşulundaki numuneler.

4.4. Killi zemin ve Stabilize Zeminlerin FTIR, XRD ve SEM-EDS ile Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu

ÖYFC ve alkali aktivatörün kullanıldığı karışımlarda alümino-silikat temelli geopolimer jel fazlarının, sadece OPC içeren karışımlarda çimento hidratasyonu sonucu kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazlarının ve ÖYFC, OPC ve alkali aktivatörün birlikte kullanıldığı karışımlarda ise her iki bağlayıcı fazın birlikte olduğu hibrit bir yapının gelişmesi beklenmektedir. Killi zeminin stabilizasyonu için 27 farklı karışım kullanılarak numuneler stabilize edilmiş ve bu numuneler üzerinde çeşitli fiziksel ve dayanım testleri uygulanmıştır. Bu testlerin yanı sıra stabilize zeminlerdeki fonksiyonel grupların belirlenmesi, kimyasal bağların tanımlanması ve bileşiklerin yapısal doğrulanması amacıyla FTIR, kristal yapıların analizi ve faz tanımlaması amacıyla XRD, yüzey morfolojisinin incelenmesi ve mikroyapının gözlemlenmesi amacıyla SEM ve elementel bileşimin belirlenmesi amacıyla EDS testleri yapılmıştır. Tablo 4.4'te FTIR, XRD ve SEM-EDS analizlerinin yapıldığı numuneler görülmektedir.

Tablo 4.4. FTIR, XRD ve SEM-EDS testlerinin yapıldığı numunelerin listesi.

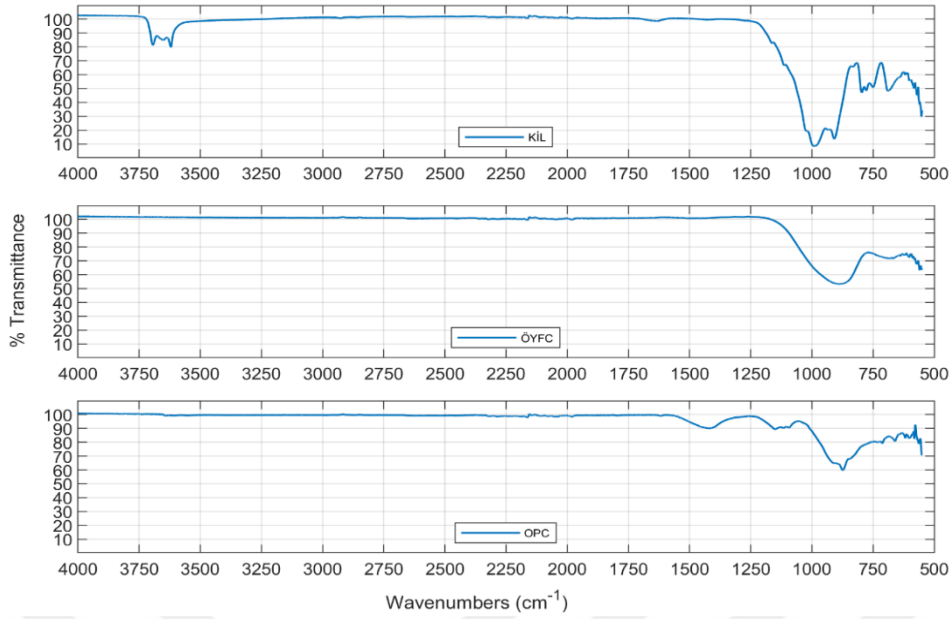
Karışım Sembolü ve Malzemeler	İçerik	FTIR	XRD	SEM- EDS
S00_C0_GP00_R0	Killi Zemin	+	+	+
ÖYFC	ÖYFC	+	+	-
OPC	OPC	+	+	-
S20_C0_GP00_R0	Killi Zemin + %20 ÖYFC	+	+	+
S20_C0_GP10_R1	Killi Zemin + %20 ÖYFC + %5 SS + %5 SH (Oran: 1)	+	+	+
S20_C0_GP10_R3	Killi Zemin + %20 ÖYFC + %7,5 SS + %2,55 SH (Oran: 3)	+	+	+
S20_C0_GP10_R5	Killi Zemin + %20 ÖYFC + %8,333 SS + %1,667 SH (Oran: 5)	+	+	+
S20_C0_GP10_R7	Killi Zemin + %20 ÖYFC + %8,75 SS + %1,25 SH (Oran: 7)	+	+	+
S18_C2_GP00_R0	Killi Zemin + %18 ÖYFC + %2 OPC	+	-	-
S18_C2_GP10_R1	Killi Zemin + %18 ÖYFC + %2 OPC + %5 SS + %5 SH (Oran: 1)	-	-	-
S18_C2_GP10_R3	Killi Zemin + %18 ÖYFC + %2 OPC + %7,5 SS + %2,55 SH (Oran: 3)	+	+	+
S18_C2_GP10_R5	Killi Zemin + %18 ÖYFC + %2 OPC + %8,333 SS + %1,667 SH (Oran: 5)	+	+	+
S18_C2_GP10_R7	Killi Zemin + %18 ÖYFC + %2 OPC + %8,75 SS + %1,25 SH (Oran: 7)	+	+	-
S16_C4_GP00_R0	Killi Zemin + %16 ÖYFC + %4 OPC	+	-	-
S16_C4_GP10_R1	Killi Zemin + %16 ÖYFC + %4 OPC + %5 SS + %5 SH (Oran: 1)	-	-	-
S16_C4_GP10_R3	Killi Zemin + %16 ÖYFC + %4 OPC + %7,5 SS + %2,55 SH (Oran: 3)	+	+	+
S16_C4_GP10_R5	Killi Zemin + %16 ÖYFC + %4 OPC + %8,333 SS + %1,667 SH (Oran: 5)	+	+	+
S16_C4_GP10_R7	Killi Zemin + %16 ÖYFC + %4 OPC + %8,75 SS + %1,25 SH (Oran: 7)	+	+	+
S12_C8_GP00_R0	Killi Zemin + %12 ÖYFC + %8 OPC	+	+	+
S12_C8_GP10_R1	Killi Zemin + %12 ÖYFC + %8 OPC + %5 SS + %5 SH (Oran: 1)	+	+	+
S12_C8_GP10_R3	Killi Zemin + %12 ÖYFC + %8 OPC + %7,5 SS + %2,55 SH (Oran: 3)	+	+	+
S12_C8_GP10_R5	Killi Zemin + %12 ÖYFC + %8 OPC + %8,333 SS + %1,667 SH (Oran: 5)	+	+	+
S12_C8_GP10_R7	Killi Zemin + %12 ÖYFC + %4 OPC + %8,75 SS + %1,25 SH (Oran: 7)	+	+	+
S00_C5_GP00_R0	Killi Zemin + %5 OPC	-	-	-
S00_C10_GP00_R0	Killi Zemin + %10 OPC	-	-	-
S00_C15_GP00_R0	Killi Zemin + %15 OPC	+	+	+
S00_C0_GP10_R1	Killi Zemin + %5 SS + %5 SH (Oran: 1)	-	-	+
S00_C0_GP10_R5	Killi Zemin + %7,5 SS + %2,5 SH (Oran: 3)	-	-	-
S00_C0_GP10_R3	Killi Zemin + %8,333 SS + %1,667 SH (Oran: 5)	-	-	-
S00_C0_GP10_R7	Killi Zemin + %8,5 SS + %1,25 SH (Oran: 7)	-	-	-
TOPLAM		22	20	18

Testlerin bütçesi SAÜ-BAP lisansüstü projesi (Proje No: 2022-7-25-89) tarafından karşılanmıştır. Proje bütçesinden dolayı çalışma kapsamını en iyi yansıtacak şekilde FTIR için 22, XRD için 20 ve SEM-EDS testleri için ise 18 numune kullanılmıştır. Bu analizler BTÜ bünyesinde faaliyet gösteren Merkezi Araştırma Laboratuvarında

gerçekleştirilmiştir. FTIR testlerinde Thermo Scientific marka, Nicolet iS50 model cihaz, XRD testlerinde ise Bruker marka, D8 Advance model cihaz kullanılmıştır. SEM analizlerinde ilk olarak numune kaplama (Altın/Paladyum (Au/Pd) veya Karbon (C) kaplama) gerçekleştirilmiştir. SEM görüntülemeye Zeiss marka, Gemini model ve EDS analizinde Bruker marka ve XFlash61100 model cihazlar kullanılmıştır.

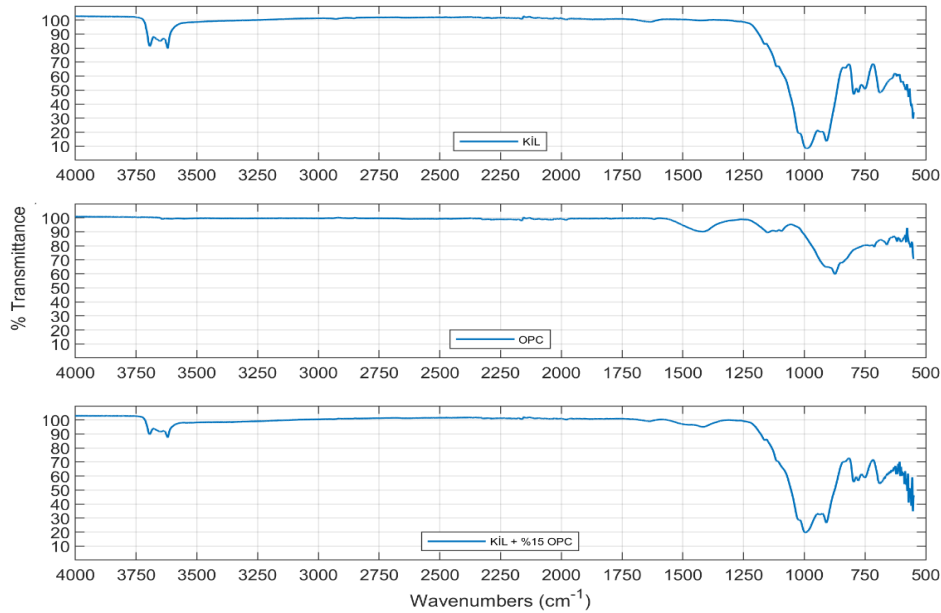
4.4.1. FTIR spektrumlarının analizi

FTIR analizi gerçekleştirilen numuneler içeriklerine göre gruplara ayrılarak yorumlanması gerçekleştirilmiştir. Stabilize zemin numunelerine ait FTIR spektrumları ile doğal killi zeminin spektrumu karşılaştırılmış, ayrıca stabilize numunelerin spektrumları ile doğal killi zemine ait spektrum arasındaki farklar hesaplanarak fark spektrumları elde edilmiştir. Fark spektrumları sayesinde, stabilizasyon sonrasında killi zeminde meydana gelen değişimler daha ayrıntılı olarak incelenebilmiştir. Şekil 4.26'da kil, ÖYFC ve OPC için FTIR spektrumları görülmektedir. Kilin FTIR spektrumunda $3600-3700\text{ cm}^{-1}$ aralığında yapıdaki $-\text{OH}$ gruplarına (hidroksil grupları) ait piklerin çıktığı görülmektedir. 3693 cm^{-1} 'deki pikin serbest hidroksillere ait gerilme titreşimlerinden, 3654 ve 3648 cm^{-1} 'deki piklerin kil iç yapısındaki hidroksilerin titreşimlerinden ve 3620 cm^{-1} pikin ise yapısal hidroksillerin titreşimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Gan ve ark. (2019) yaptığı çalışmada da görülmektedir. 1630 cm^{-1} küçük yayvan pik nemden ileri gelen suyun hidroksil titreşimine aittir (Gan ve ark, 2019). 1113 cm^{-1} ve 1023 cm^{-1} 'deki pikler ile 988 cm^{-1} 'deki kuvvetli pik, kildeki silikat yapılarındaki Si-O bağının gerilme moduna ait piklerdir (Kgabi ve Ambushe, 2023). 934 ve 908 cm^{-1} 'de görülen pikin Al-OH bağına ait olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Rahier ve ark. (2000) yaptığı çalışmada görülmektedir. Bu piklerdeki küçük kaymalar az miktardaki safsızlıklardan kaynaklanabilir (Rahier ve ark, 2000). 796 cm^{-1} 'deki pikin safsızlık olarak bulunan Quartz'dan kaynaklandığı Si-O bağına (Kumar ve Lingfa, 2020) ve 750 cm^{-1} pikin ise yapıdaki Al-OH bağına atfedilmiştir (Gan ve ark, 2019). ÖYFC spektrumunda ortaya çıkan 888 cm^{-1} ve 680 cm^{-1} 'deki pikler Si-O ve Al-O bağlarının sırasıyla gerilme ve bükülme titreşimlerine aittir (Haq ve ark, 2024). OPC spektrumundaki 1416 , 874 ve 712 cm^{-1} 'deki pikler CO_3^{2-} grubunun sırasıyla ν_3 , ν_2 ve ν_4 gerilme modlarına aittir (Richhariya ve ark, 2020). 1115 ve 845 cm^{-1} 'deki pikler ise C_2S ve C_3S yapısındaki Si-O düzlem içi eğilme bağ titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Mohammed ve ark, 2021).



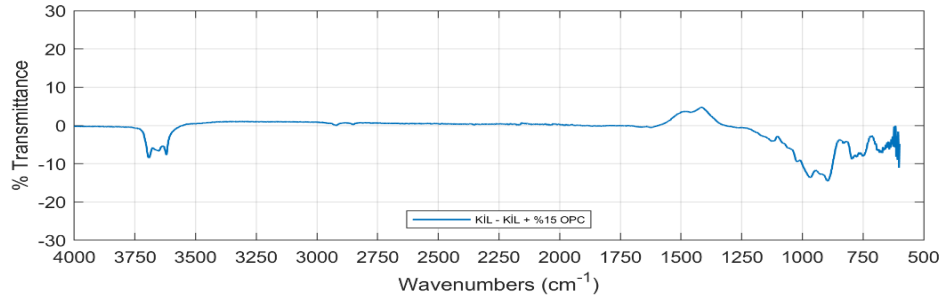
Şekil 4.26. Killi zemin, ÖYFC ve OPC'ye ait FTIR spektrumları.

Şekil 4.27'de killi zemin, OPC ve %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zemine ait FTIR spektrumları, Şekil 4.28'de ise killi zemin ile %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zemine ait FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumu görülmektedir. %15 OPC ile stabilize edilmiş kil numunesinin FTIR spektrumunda kil ve OPC'nin karakteristik bantları görülmüş ayrıca reaksiyon ile oluşan ürüne bağlı olarak pik şiddetlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Kile ait $3650-3700\text{ cm}^{-1}$ bant aralığındaki $-\text{OH}$ piklerinin şiddeti çimento hidrasyonu neticesinde azaldığı görülmüştür.



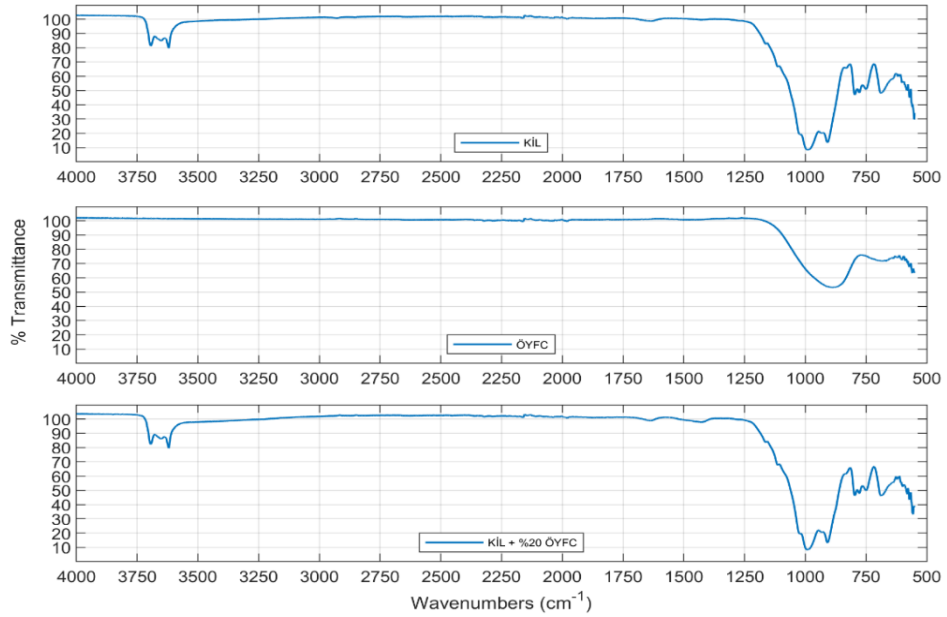
Şekil 4.27. Killi zemin, OPC ve %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu.

OPC spektrumundaki 1416 cm^{-1} bandında gözlenen CO_3^{2-} pikinin stabilize edilmiş numunede azalması, karbonat yapılarında azalmaya işaret etmektedir. Bu değişim, OPC ile kil arasındaki kimyasal etkileşimlerin ve yeni hidratasyon ürünlerinin oluşumuna bağlı olabilir. Kile ait hidroksil pikleri ile OPC ye ait CO_3^{2-} piklerindeki azalma C-S-H ve kalsiyum alüminat hidrat C-A-H yapılarının oluştuğunu göstermektedir (Liew ve ark, 2012).



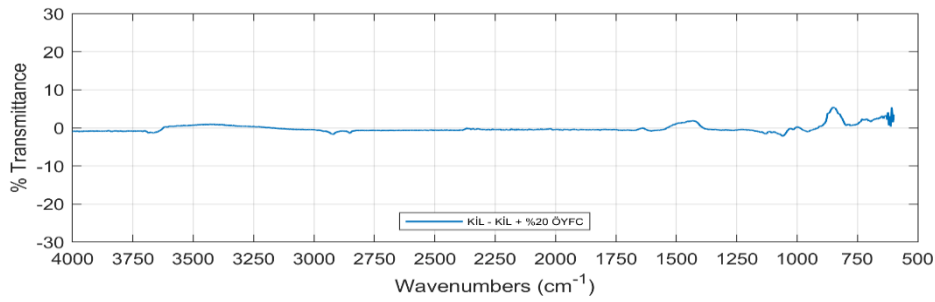
Şekil 4.28. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %15 OPC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu arasındaki fark spektrumu.

Şekil 4.29’da kil, ÖYFC ve %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş zeminlerin FTIR spektrumu ve Şekil 4.30’da ise kile ait FTIR spektrumu ile %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş numunenin FTIR spektrumu arasındaki fark görülmektedir. Kil + %20 ÖYFC ile stabilize edilen zeminin spektrumunun, kil spektrumuna oldukça benzer olduğu görülmektedir. Kile ait karakteristik piklerin yerlerinde ve şiddetlerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.29. Killi zemin, ÖYFC ve %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu.

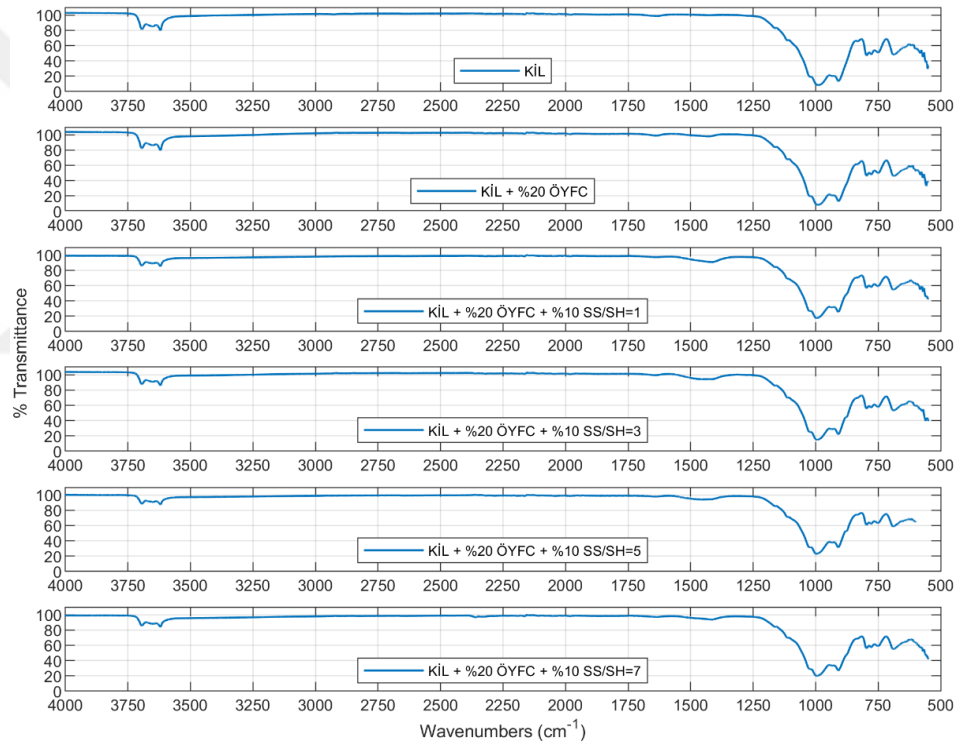
ÖYFC karakteristik pikleri kil pikleri ile çakıştığından ve miktara bağlı olarak düşük şiddetli olduğundan, karışım spektrumunda ÖYFC pikleri belirgin olarak görülmemektedir. Ancak karışım spektrumunda 1428 cm^{-1} 'de yeni bir pik ortaya çıkmıştır. Bu pikin ÖYFC yapısındaki Ca^{2+} iyonlarının karbonatlaşması sonucu CaCO_3 oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. FTIR spektrumları kil ile ÖYFC arasında herhangi bir kimyasal etkileşimin olmadığını veya çok zayıf bir etkileşim olduğunu, ÖYFC yapısında CaCO_3 oluşumunun olduğunu göstermektedir. Bu numunenin SBD dayanımında gözlenen yaklaşık 1,5 katlık artış ÖYFC'nin dane boyutu ve/veya CaCO_3 'ün kısmen katkısı ile açıklanabilir.



Şekil 4.30. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş killi zeminin FTIR spektrumu arasındaki fark spektrumu.

Şekil 4.31'de SS/SH oranının 1, 3, 5 ve 7 olarak kullanıldığı, kil + %20 ÖYFC + SS/SH karışımlarıyla stabilize edilen numunelere ait FTIR spektrumları görülmektedir. Alkali aktivasyonu neticesinde kile ait $3600\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki $-\text{OH}$ pik şiddetlerinde azalma olduğu görülmektedir. 3693 cm^{-1} 'deki %pik soğurması kil spektrumunda %18,6 ve kil + ÖYFC spektrumunda ise %17,6 olduğu görülmektedir. Alkali aktivasyonu sonucu SH/SS oranları 1, 3, 5 ve 7 olduğu durumda sırasıyla %14,1, 12,3, 11,5 ve 14,4 şeklinde tespit edilmiştir. 3620 cm^{-1} 'deki pik soğurmaları ise kil ve kil + ÖYFC de sırasıyla %20,4 ve %20,5 olduğu görülmüştür. Alkali aktivasyonu sonrasında, alkali oranları 1, 3, 5 ve 7 için bu % soğurma değerleri sırasıyla %14,7, 14, 12,6 ve 16 olduğu görülmektedir. Bu piklerdeki azalma kil yapısındaki $-\text{OH}$ 'lerin alkali aktivasyonu ile geopolimer oluşumunda yer aldığını göstermektedir. Ancak alkali oranı 7 olduğunda % soğurma değerinde azalma diğerlerine göre daha düşüktür. Bu bulguya göre, SS/SH oranı 7 olduğunda SH miktarı yetersiz kaldığından dolayı geopolimerleşmenin, SS/SH oranı 5'e göre daha düşük düzeyde gerçekleştiği söylenebilir. Kile ait spektrumda 1416 cm^{-1} 'de herhangi bir pik gözlemlenmezken, kil + ÖYFC spektrumunda yapıdaki Ca^{2+} iyonlarından dolayı karbonatlaşmaya ait pik

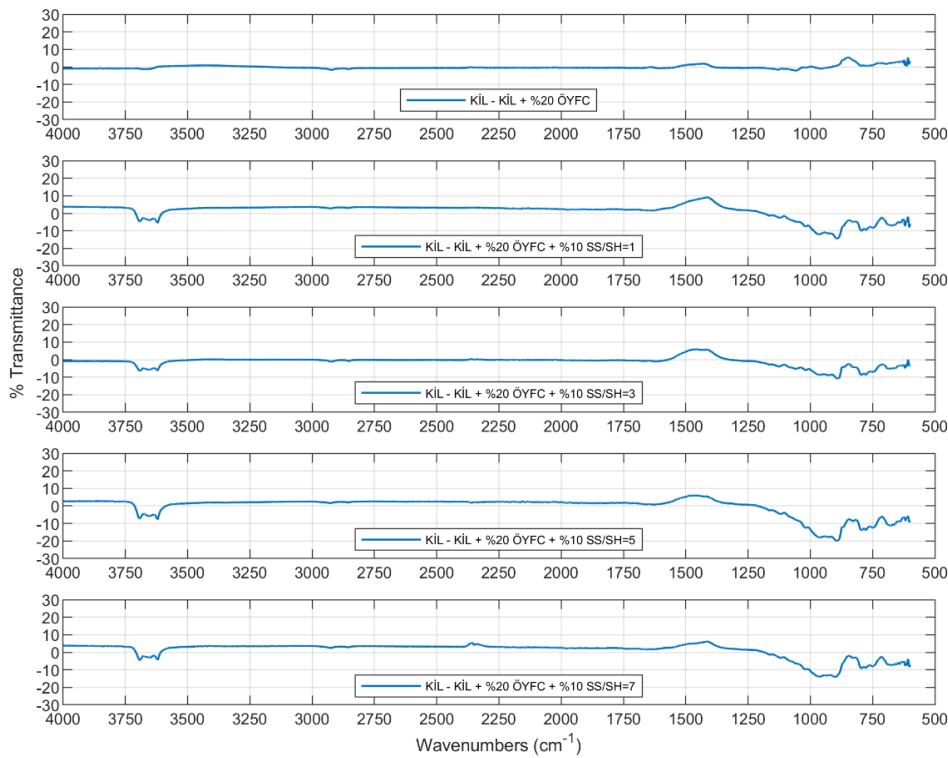
oluştugu görülmüştür. Bu değerdeki karbonat pik şiddetinin alkali aktivasyonu neticesinde arttığı ve yayvanlaştığı, ancak artışın SS/SH oranı arttıkça daha düşük kaldığı görülmektedir. Kil + ÖYFC'deki bu pikin % geçirim değeri 97,9 iken bu değer alkali aktifleşmiş numunelerde 1,3, 5 ve 7 alkali oranları için sırasıyla 90,6, 94,1, 94,3 ve 94,4 olduğu tespit edilmiştir. Alkali aktive edilmiş numunelerdeki pik şiddetinin kil + ÖYFC'ye ait şiddetten daha düşük olmasının nedeni yapıya ilave edilen SH kaynaklı Na^+ iyonlarının karbonatlaşmaya katkı sunmasından kaynaklanmaktadır. Bu pik şiddeti SS/SH oranı 1 olan zeminde görölmesinin nedeni ise SH miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu fazla miktardan dolayı eklenen SH'n tamamı geopolimerleşmede kullanılmadığı, artan kısmın karbonatlaşmaya neden olduğu düşünölmektedir.



Şekil 4.31. Killi zemin ve %20 ÖYFC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) karışımlarıyla stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.

950-1000 cm^{-1} aralığında geopolimerleşme neticesinde yeni oluşan Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarına ait piklerin çıkması beklenmektedir (Thai ve ark, 2025). Ancak bu bölgede kilin kendine ait güçlü silikat pikleri olduğundan dolayı yeni oluşan bağlara ait pikleri örtmektedir. Bu nedenle geopolimerleşme etkisini daha ayrıntılı görebilmek amacıyla MATLAB programı kullanılarak ÖYFC ve alkali aktivatör kullanılarak stabilize edilmiş zeminin FTIR spektrumu, işlem görmemiş killi zeminin FTIR

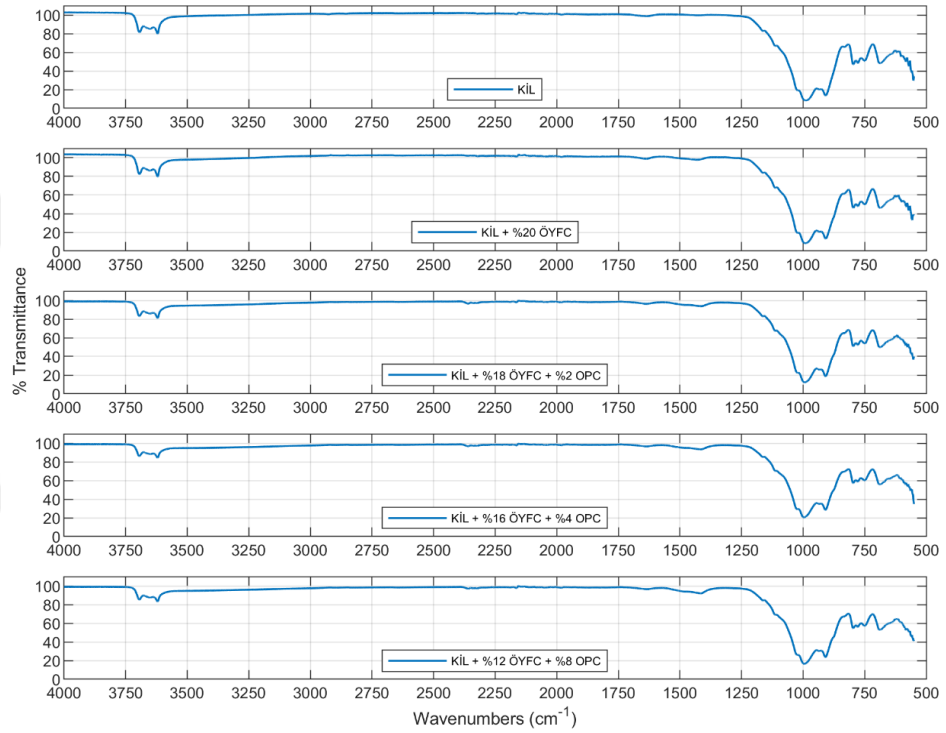
spektrumundan çıkartılmıştır (Şekil 4.32). Sonuçlar incelendiğinde alkali aktivatörlerin kullanıldığı numunelerin fark spektrumlarında 971 cm^{-1} 'de yeni pikin beklenildiği gibi oluştuğu açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra 890 cm^{-1} 'de ortaya çıkan belirgin yeni pikin geopolimerleşme sonucunda oluşan Si-O-Al bağına ait olduğu düşünülmektedir (Barzgar ve ark, 2021). Bu sonuçlardan alkali aktivasyonu ile kilin geopolimerleşmede yer aldığı, alkali oranı 5' kadar geopolimerleşmenin arttığı, alkali oranı 7 olduğunda ise SH yetersizliğinden dolayı geopolimerleşmenin düşük kaldığı anlaşılmıştır. Ayrıca yüksek alkali oranlarında SH fazlalığından dolayı karbonatlaşmanın oluştuğu görülmüştür. Bulgular değerlendirildiğinde yüksek geopolimerleşme ve düşük karbonatlaşma oranı veren en iyi karışımın alkali oranı 5 olan karışım olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.32. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %20 ÖYFC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) karışımıyla stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.

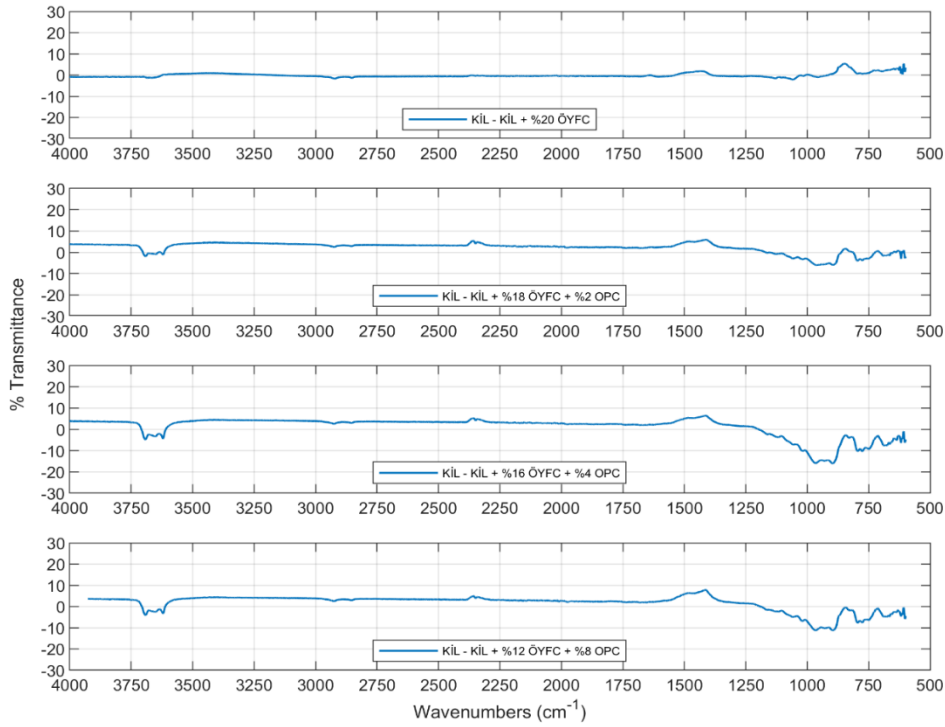
Şekil 4.33'te kil, %20 ÖYFC ile stabilize edilen zemin ve farklı yüzdelerde ÖYFC + OPC ile stabilize edilen zeminlere ait FTIR spektrumları görülmektedir. Farklı oranlarda OPC içeren karışımların spektrumları incelendiğinde $\approx 3600\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$ aralığında kile ait --OH piklerinin şiddetinde azalmalar olduğu görülmektedir. 3693 cm^{-1} 'deki pikin % soğurması, kil spektrumunda %18,6 ve kil + %20 ÖYFC

spektrumunda ise %17,6 olarak belirlenmiştir. %18 ÖYFC + %2 OPC, %16 ÖYFC + %4 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC içeren numunelerde bu pikin % soğurma değerleri sırasıyla %16,9, %13,9 ve %14,7 olarak hesaplanmıştır. Kil ve kil + %20 ÖYFC spektrumlarında, 3620 cm^{-1} 'deki pike karşılık gelen soğurma sırasıyla %20,4 ve %20,5 olarak belirlenmiştir. Aynı pikin, %18 ÖYFC + %2 OPC, %16 ÖYFC + %4 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC numunelerinde ise azalarak sırasıyla %19,0, %15,7 ve %16,8 olduğu tespit edilmiştir. Bu pik değerlerinden kilin –OH gruplarının çözündüğü ve jelleşmeye katıldığı düşünülmektedir (Jamil ve ark, 2020).



Şekil 4.33. Killi zemin ve farklı yüzdelerdeki ÖYFC + OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.

%20 ÖYFC ile stabilize edilen numunede 1424 cm^{-1} de %2,1 soğurma gösteren CO_3^{2-} ye ait pik, %18 ÖYFC + %2 OPC, %16 ÖYFC + %4 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC karışımlarıyla stabilize edilen numunede sırasıyla %6,1, %6,6 ve %8,1 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlardan OPC miktarı arttıkça CO_3^{2-} oluşumunun arttığı sonuca varılmıştır. OPC içeren numunelerde 750-800 cm^{-1} aralığında ortaya çıkan pikler hidrasyon sonucu oluşan Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarına ait olabilir. 966 cm^{-1} 'de oluşan piklerin OPC hidrasyonu sonucu oluşan Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarına ait, 891 cm^{-1} 'de oluşan piklerin ise büyük oranda OPC jelleşmesi sonucu oluşan Ca-O-Si bağlarına ait olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.34).

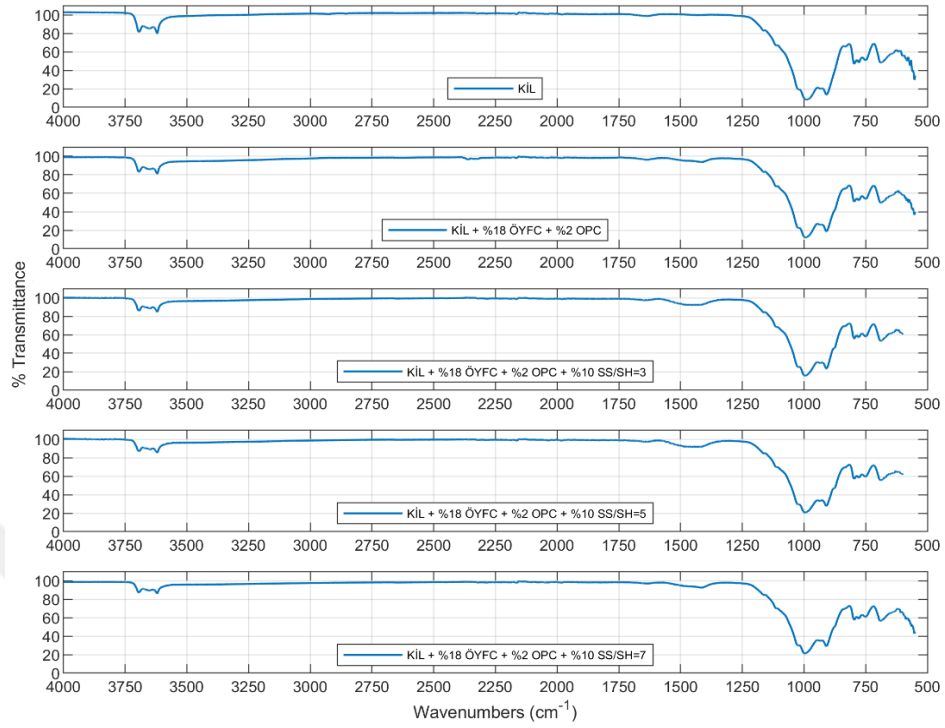


Şekil 4.34. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile farklı oranlardaki ÖYFC + OPC karışımıyla stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.

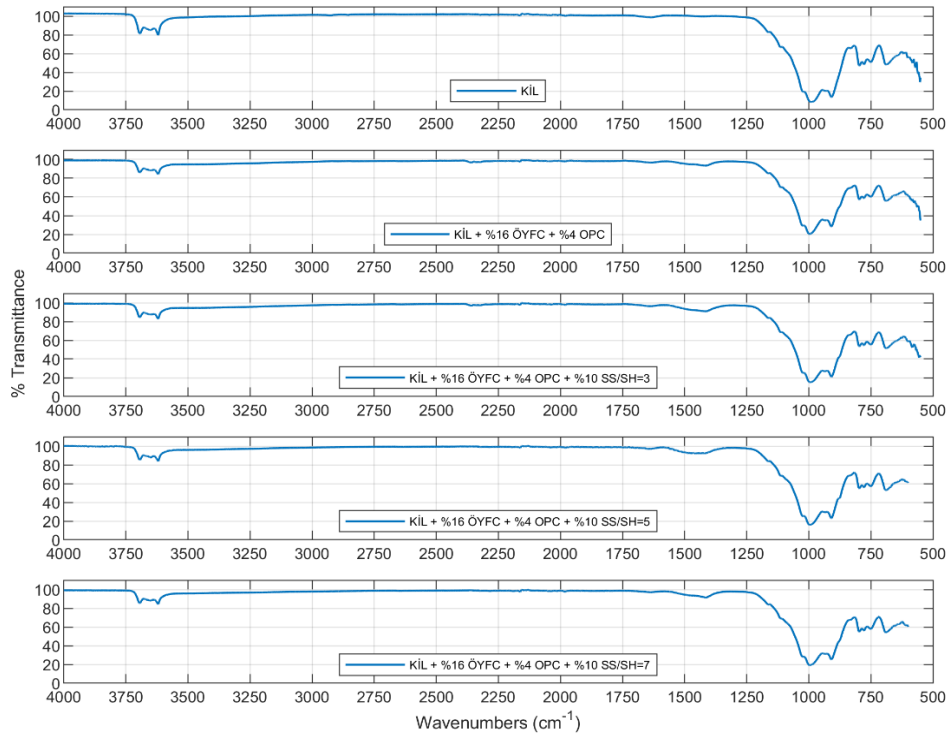
ÖYFC, OPC, SS ve SH karışımları ile stabilize edilen zemin numunelerinin FTIR spektrumları kıyaslamalı olarak incelenmiştir (Şekil 4.35, 4.36 ve 4.37). Bu veri grubunda ÖYFC ve OPC'nin yüzde oranları ile SS/SH oranı değişken olarak ele alınmıştır. Öncelikle ÖYFC ve OPC oranları sabit tutularak SS/SH oranlarının etkisi araştırılmıştır. Spektrumlardaki –OH grubu ile ilişkili değişimler, karbonatlaşma, geopolimerleşme ve çimento hidratasyonuna bağlı jel oluşumlarına işaret etmektedir. Kilin kristal yapısında hidroksil grupları yoğun olarak bulunduğu için kil numunesindeki –OH grupları diğer numunelere göre en yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Numunelerde OPC hidratasyonu sırasında su ve OH gruplarıyla reaksiyona girerek C-S-H ve C-A-H fazları oluşturmuştur. Alkali aktivatör içeren numunelerde –OH pikleri genel olarak daha çok azalmıştır.

Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'ta görülen FTIR fark spektrumları, stabilizasyonun kil üzerindeki etkisinin görülmesinde fayda sağlamıştır. OPC ve alkali aktivatörün birlikte kullanılmasıyla –OH bandında fark edilebilir bir azalma gözlenmiştir. Doğal killi zeminde karbonat olmadığı için 1424 cm^{-1} 'de pik oluşmamıştır. Diğer numunelerde ÖYFC ve OPC yapısındaki Ca^{2+} iyonları ile alkali aktivatördeki Na^+ katyonunun karbonatlaşması neticesinde piklerin oluştuğu görülmüştür. 966-971 cm^{-1}

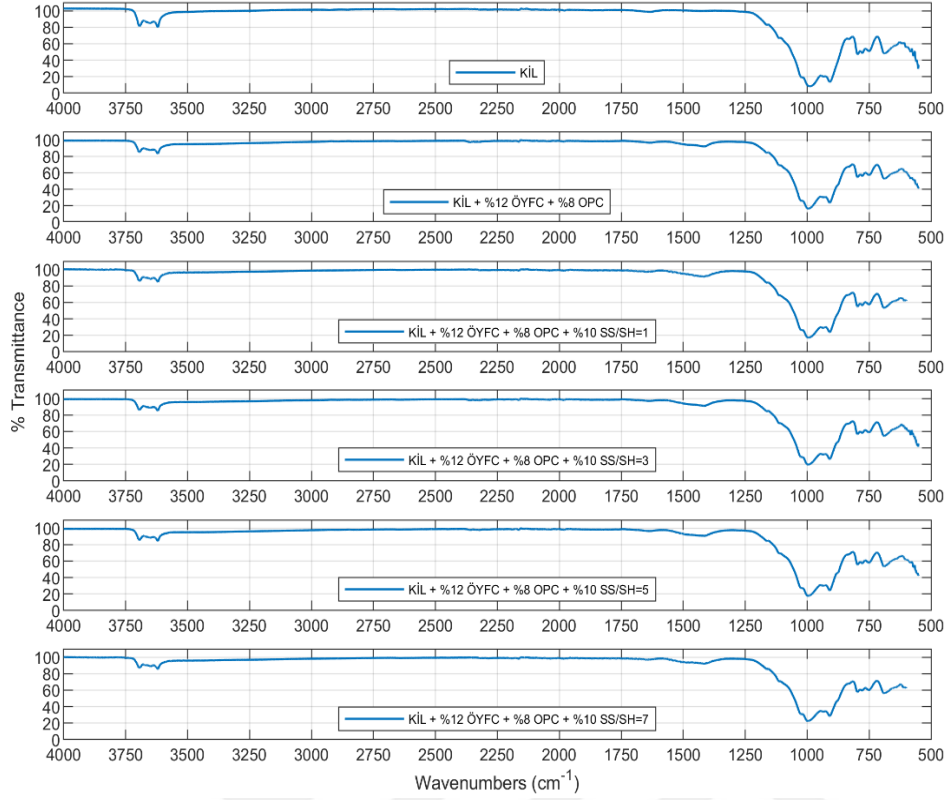
değerlerindeki piklerin alkali aktivatör ilavesi ile belirgin bir şekilde artması geopolimerleşmenin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.



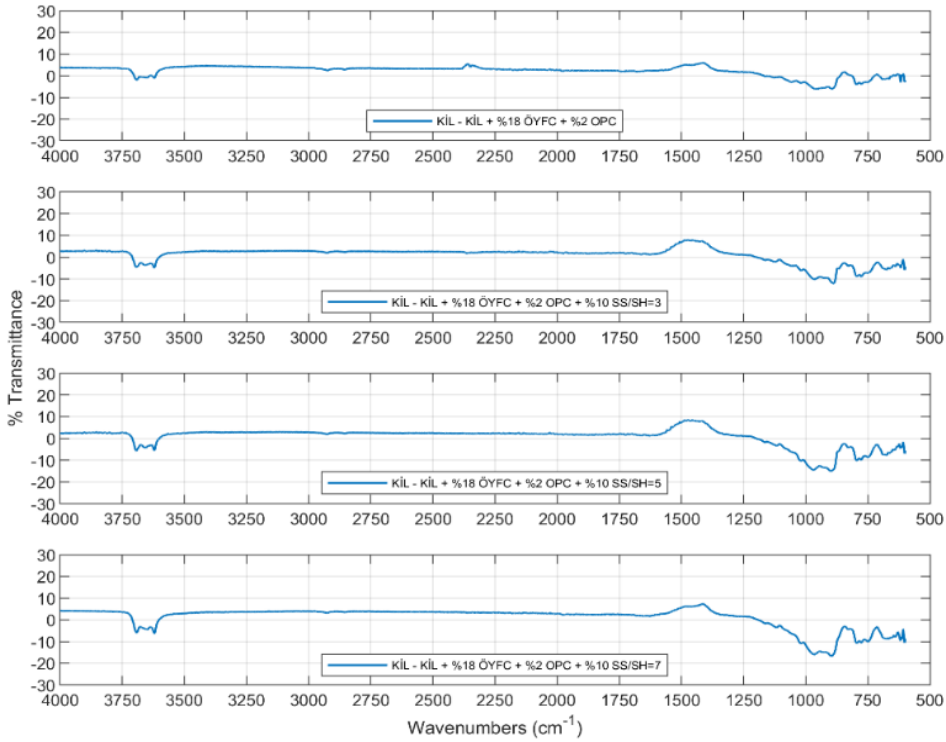
Şekil 4.35. Killi zemin ve %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.



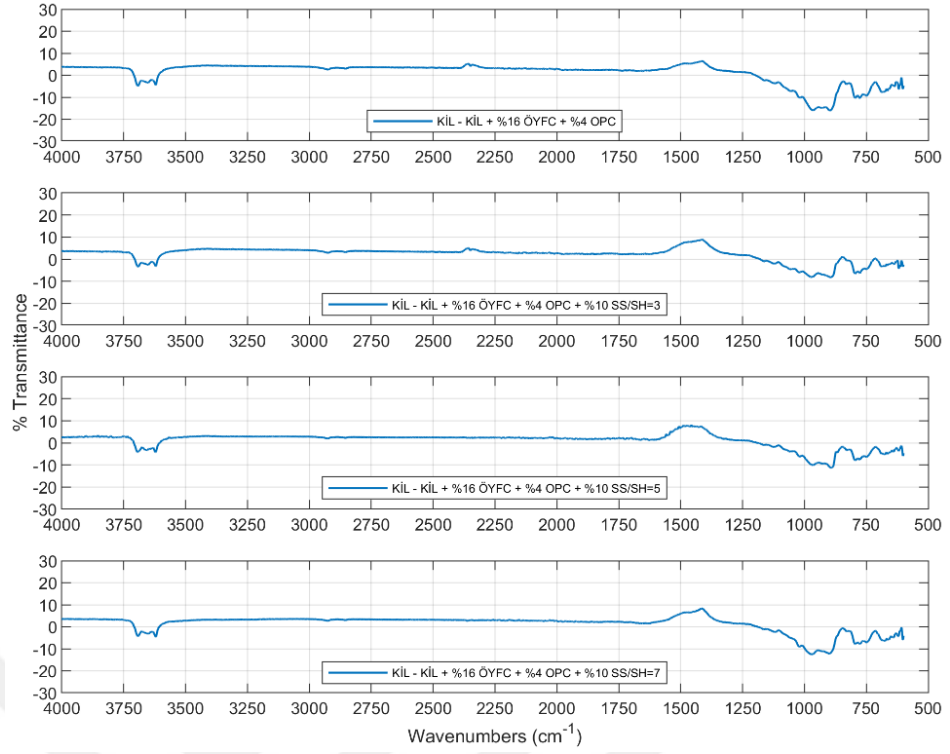
Şekil 4.36. Killi zemin ve %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.



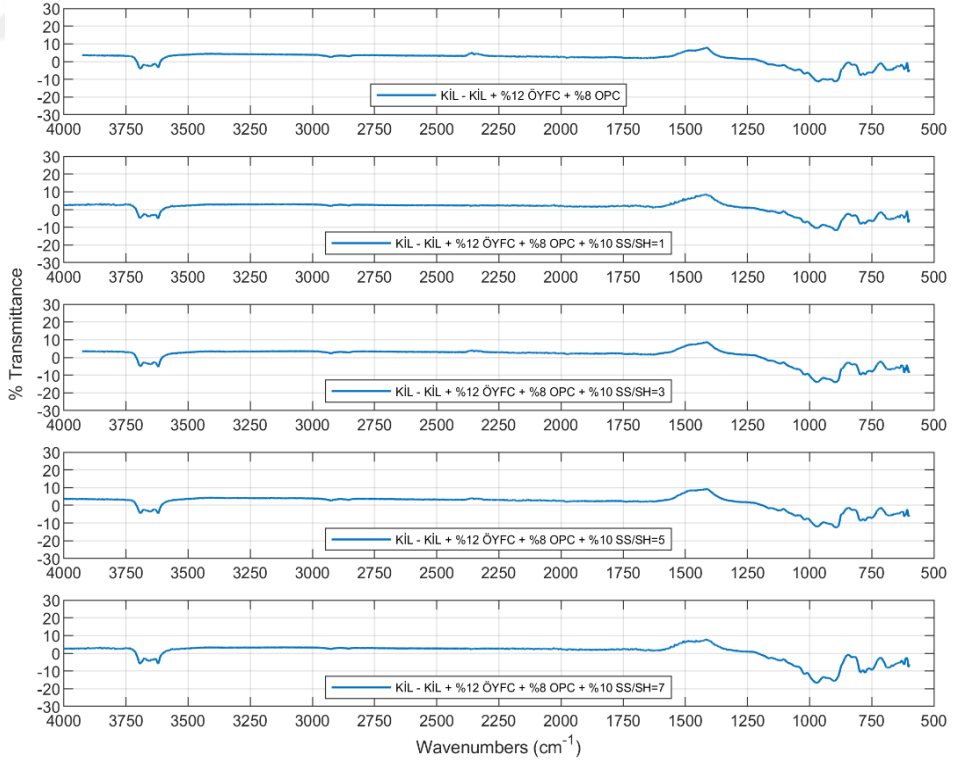
Şekil 4.37. Killi zemin ve %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.



Şekil 4.38. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.

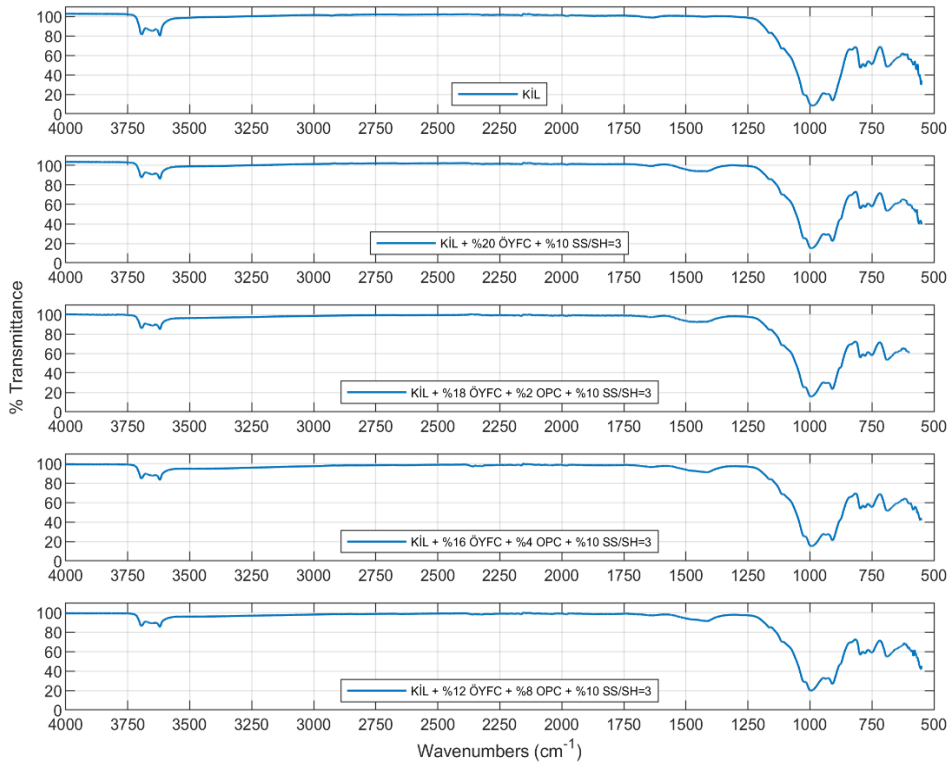


Şekil 4.39. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH (3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.

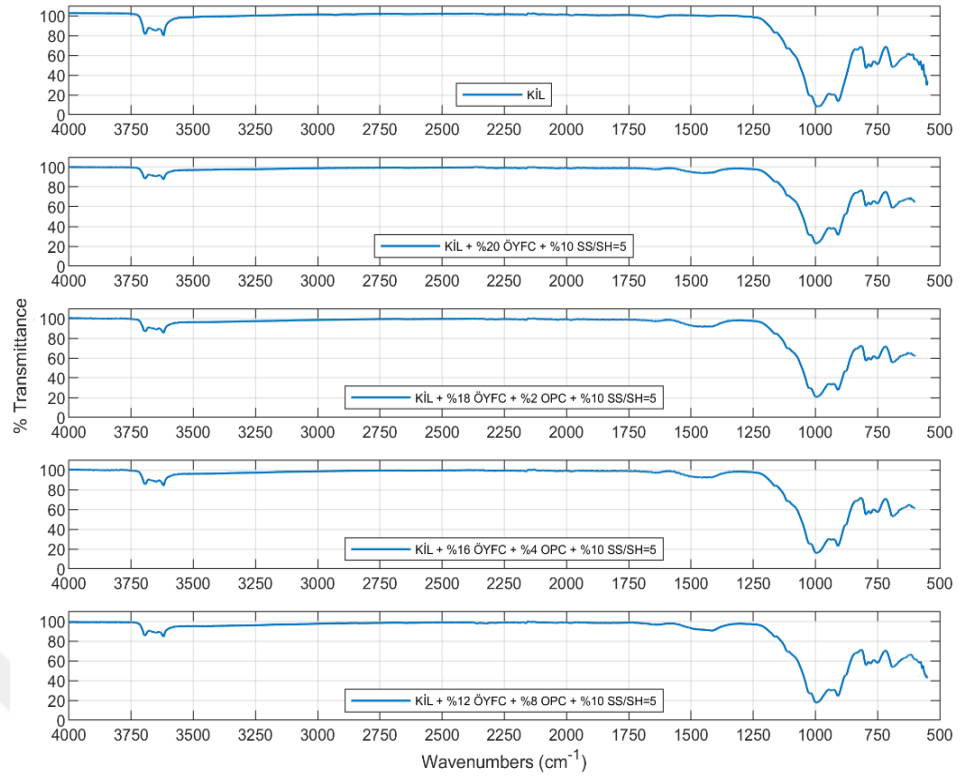


Şekil 4.40. Killi zemine ait FTIR spektrumu ile %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7) ile stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları arasındaki fark spektrumları.

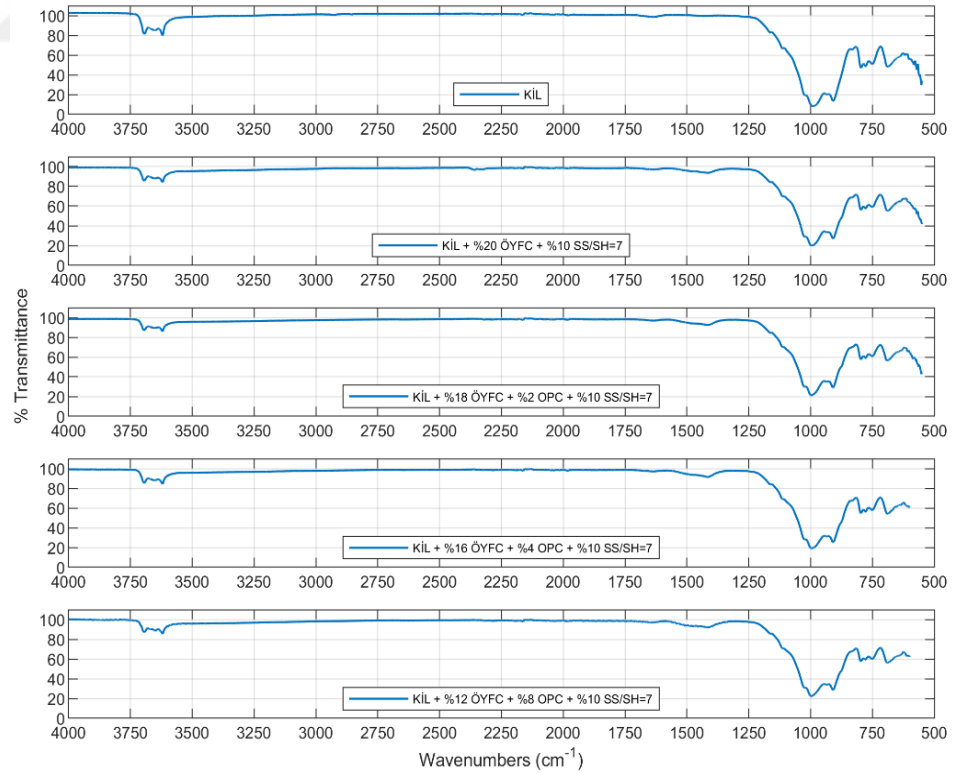
ÖYFC, OPC ve SS/SH karışımları kullanılarak stabilize edilen numunelerde, SS/SH oranının etkisini daha iyi değerlendirebilmek amacıyla FTIR spektrumları ayrı ayrı oluşturulmuştur. Şekil 4.41’de SS/SH oranı 3, Şekil 4.42’te SS/SH oranı 5 ve Şekil 4.44’te SS/SH oranı 7 olan stabilize numunelerin FTIR spektrumu görülmektedir. FTIR spektrumları incelendiğinde, genel olarak SS/SH oranı arttıkça –OH bölgesindeki piklerde azalma gözlenmektedir. Fazla miktarda SH kullanımı, kil ile diğer bileşenler arasındaki etkileşimin zayıflamasına neden olduğu görülmektedir. Karbonat pik şiddetlerinin SS/SH oranı değişimi ile büyük ölçüde değişmediği, ancak artan OPC oranı ile arttığı görülmektedir. Si-O-Si piklerinin ($971-966\text{ cm}^{-1}$) varlığını kilde olmayan yeni bir yapının oluştuğunu göstermektedir. Bu oluşumun geopolimerleşmenin bir etkisi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. 893 cm^{-1} olan bölgedeki değişimlerde OPC’nin etkili olduğu görülmektedir. Bu da OPC jelleşmesinin kanıtıdır. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH karışımlarında SS/SH oranı 5 ve 7 olduğunda geopolimerleşme ve jelleşmenin en iyi gözlemlendiğini söylemek mümkündür. Serbest basınç test sonuçları da bu karışımlarda en yüksek dayanım değerleri vermiştir.



Şekil 4.41. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH=3 olan stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.



Şekil 4.42. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH=5 olan stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.



Şekil 4.43. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH=7 olan stabilize edilen killi zeminlerin FTIR spektrumları.

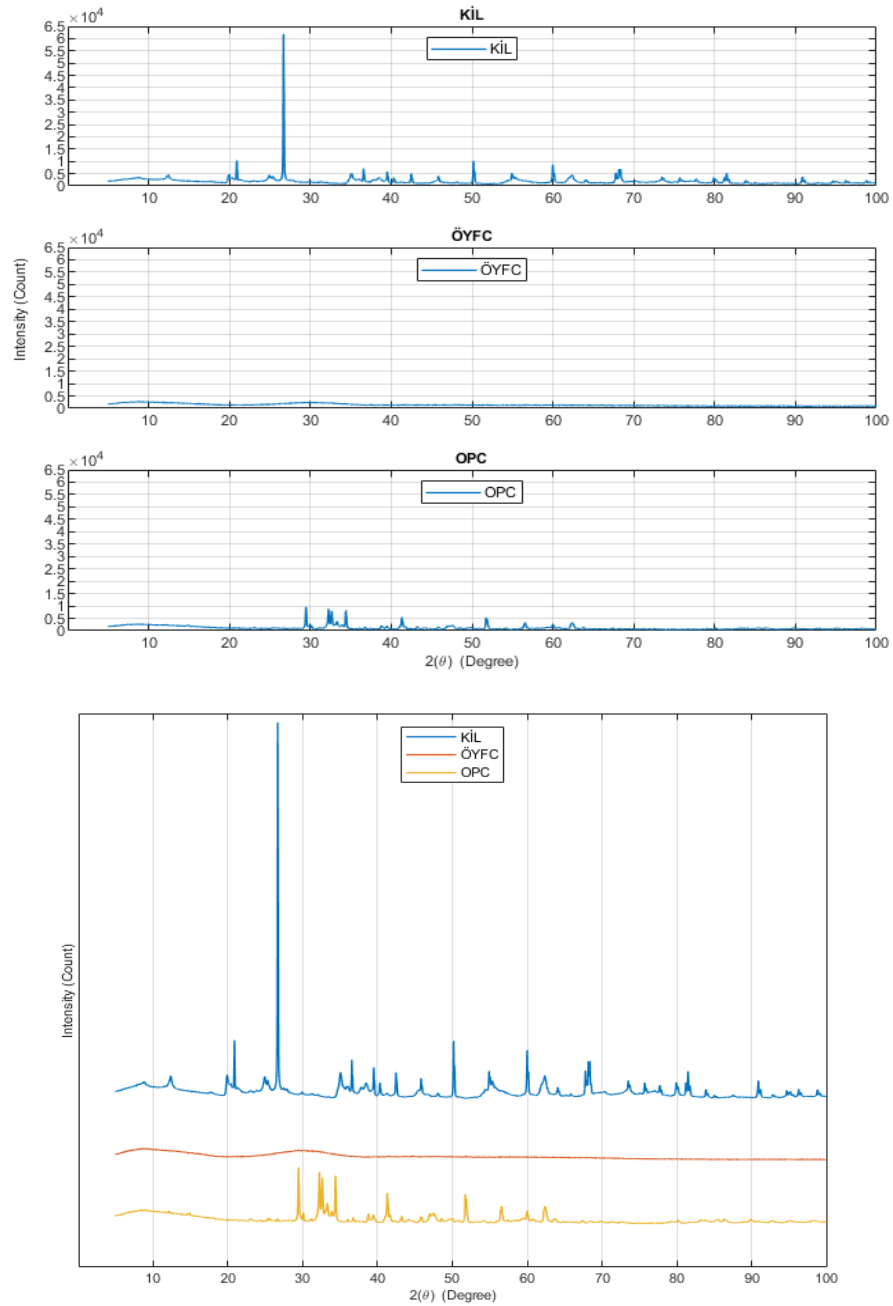
4.4.2. XRD kırınım verilerinin analizi

Çalışmada kil, ÖYFC, OPC ve stabilize numuneler için toplam 20 XRD analizi gerçekleştirilmiştir. XRD analizlerinin daha sağlıklı değerlendirilebilmesi ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla, benzer içerikte stabilize edilmiş numuneler gruplandırılmış ve bu gruplar üzerinden yorumlamalar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan kilin, ÖYFC ve OPC'nin XRD kırınım deseni Şekil 4.44'te görülmektedir. Kilin XRD kırınım deseninde görüleceği üzere ardışık ve keskin pikler yer almaktadır. Bu durum kil yapısının düzenli bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan Ukrayna kil, kaolin tipi kil mineralleri sınıfında yer almaktadır. Kaolin, bileşiminde farklı oranlarda kaolinit, kuvars ve illit mineralleri içeren bir kil olup, bu kristal fazlara ait kırınım piklerinin XRD deseninde görülmesi beklenmektedir. XRD kırınım deseninde kuvarsa ait pikler $2\theta = 20,9^\circ, 26,6^\circ, 36,6^\circ, 39,5^\circ, 50,2^\circ, 54,9^\circ, 60,0^\circ$ ve $68,3^\circ$ değerlerinde oluşmuştur. Kaolinite ait piklerin ise $2\theta = 12,4^\circ, 19,9^\circ, 24,9^\circ, 35,0^\circ$ ve $45,8^\circ$ değerlerinde olduğu görülmektedir. Bu değerler literatür ile uyumludur (Kaya ve ark., 2024). Ayrıca yapıda illit piklerinin de varlığı görülmüş olup, bu pikler $2\theta = 8,8^\circ, 17,8^\circ$ ve $42,5^\circ$ konumlarında gözlemlenmiş ve elde edilen değerler literatür ile uyumlu bulunmuştur (Meroufel ve ark., 2013).

ÖYFC bünyesinde çeşitli metal oksitler bulunmaktadır. XRD kırınım deseni incelendiğinde keskin kristal piklerin oluşmadığı, $2\theta = 30^\circ$ civarında geniş yayvan bir amorf pikinin varlığı görülmektedir. Bu sonuç yapıdaki metal oksitlerin amorf yapıda olduğunu göstermektedir (Nagajothi ve Elavenil, 2021). Çalışmada kullanılan OPC'nin ana bileşenlerinde CaO ve SiO'nun olduğu görülmektedir (Tablo 3.8). Bu bileşenlerin yanı sıra diğer metal oksitlerin varlığı da söz konusudur. OPC'nin bünyesindeki kalsiyum silikatlar kristal yapıda bulunurlar ve XRD kırınım desenindeki bu kristallere ait piklerin gözlemlenmesi beklenir. OPC'nin XRD kırınım deseni incelendiğinde $29,5^\circ, 32,2^\circ, 32,6^\circ, 34,4^\circ, 41,3^\circ, 51,7^\circ, 56,6^\circ$ değerlerinde trikalsiyum silikat (Alit, C_3S) yapısına ait kristalin pikler, $29,5^\circ, 32,2^\circ, 32,6^\circ, 34,4^\circ, 41,3^\circ$ değerlerinde dikalsiyum silikat (Belit, C_2S) yapısına ait kristalin pikler (Oya-Monzón ve ark., 2024), C_3A kristaline ait pik ise $38,8^\circ$ değerinde görünmüş olup bu sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür (Joudah ve Abdul Kareem, 2024; Huseien ve ark., 2021).

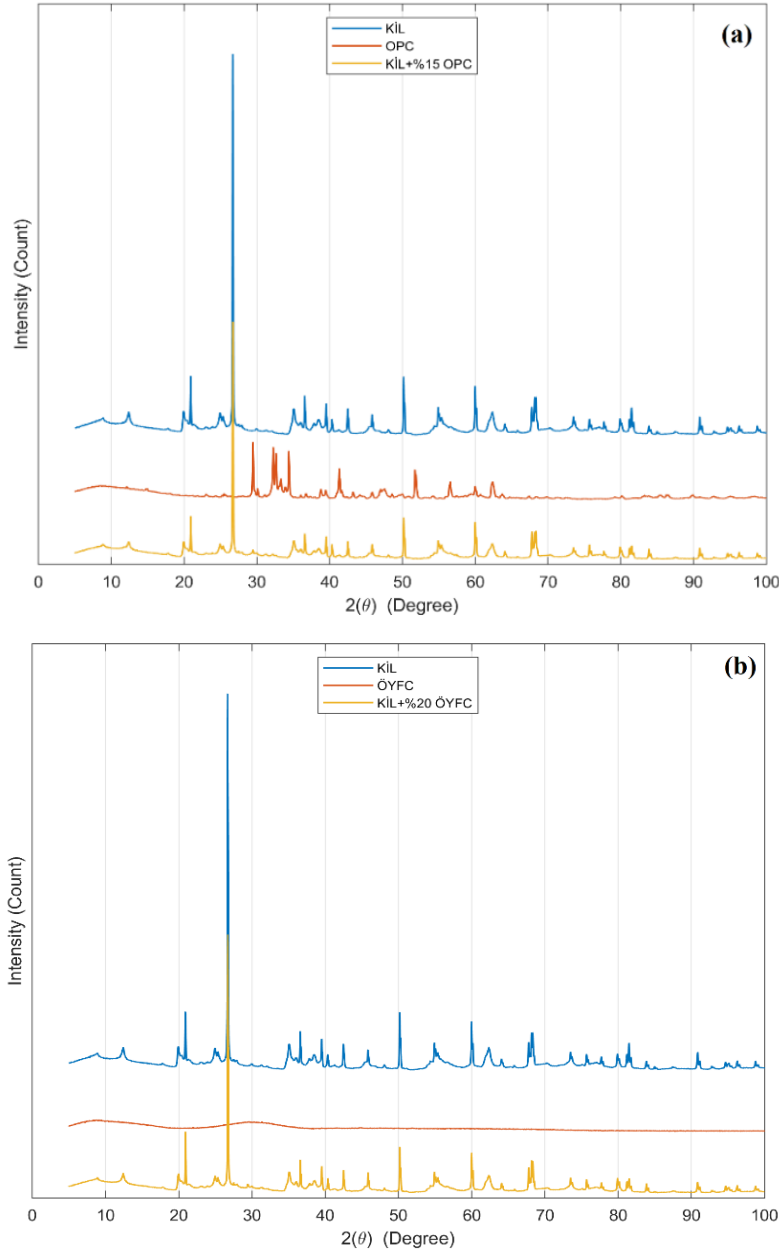
Şekil 4.45.a'da kil, OPC ve kilin %15 OPC ile stabilize edilmiş numunesine ait XRD kırınım deseni görülmektedir. %15 OPC ile stabilize edilen numunede hem kil hem de

OPC'ye ait spesifik piklerin oluşması beklenir. Ayrıca OPC'nin hidratasyonu neticesinde portlandit pikinin oluşması söz konusu olabilir. %15 OPC ile stabilize edilen numunesinin XRD kırınım deseni incelendiğinde kil piklerinin kısmen oluştuğu gözlenirken, OPC'ye ait pikler görülmemektedir. Bu sonuçlardan OPC yapısının hidratasyon neticesinde amorf C-S-H jellerine dönüştüğü anlaşılmaktadır. Şekil 4.45.b'de ise kil + %20 ÖYFC karışımına ait XRD kırınım deseni görülmektedir. XRD kırınım deseni incelendiğinde kile ait karakteristik piklerin oluştuğu ancak şiddetlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum kilin bir karışım içinde olmasına bağlı olarak bağıl miktarının az olmasından kaynaklanmaktadır.



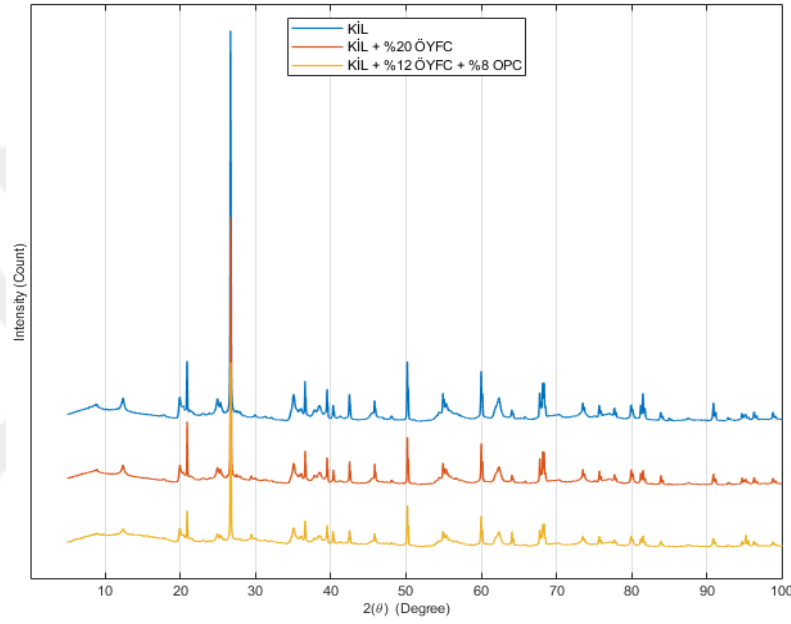
Şekil 4.44. Killi zemin, ÖYFC ve OPC'ye ait XRD kırınım desenleri.

Kil + %20 ÖYFC ve kil + %12 ÖYFC + %8 OPC ile stabilize edilen kile numunelerin XRD kırınım desenleri Şekil 4.46’da görülmektedir. Her iki XRD kırınım deseninde de kile ait karakteristik pikler görülürken, OPC’ye ait pikler oluşmamıştır. Bunun temel nedeni OPC’nin hidrasyonu neticesinde amorf C-S-H fazlarının oluşmasındandır. OPC varlığında kile ait kaolinit ve kuvars pik şiddetlerinin azaldığı görülmektedir. Kaolinit piklerinin azalması, OPC’den gelen Ca(OH)_2 etkisiyle çözünmesinden kaynaklanırken, kuvars piklerindeki azalmanın nedeni ise kuvars yüzeylerinin oluşan jeller ile kaplanmasından ileri geldiği düşünülmektedir.



Şekil 4.45. Killi zemin, %15 OPC ve %20 ÖYFC ile stabilize edilen killi zeminlerin XRD kırınım desenleri a) %15 OPC, b) %20 ÖYFC numunelerine ait XRD kırınım desenleri.

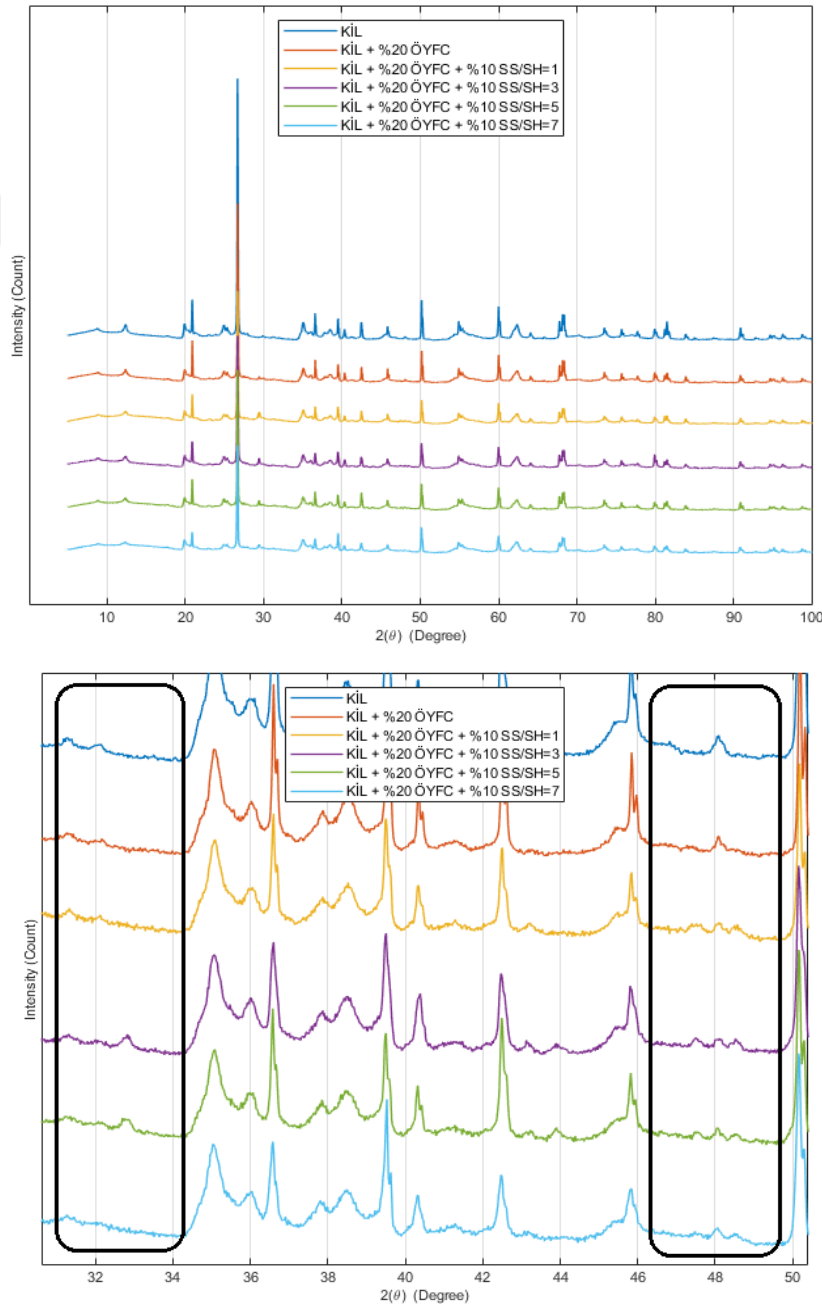
Şekil 4.47’de kilin %20 ÖYFC ve %20 ÖYFC + alkali aktivatörler (SS/SH) ile stabilize edilmiş numunelerin XRD kırınım desenleri görülmektedir. Bu veri grubunda SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7 kullanılmıştır. 12,4° ve 19,9° görülen kaolinit pikleri alkali varlığında çözünmeden dolayı azalmıştır. SS/SH’ın kullanıldığı stabilizasyon numunelerinde 32,8° bölgesinde çıkan yayvan pik geopolimerizasyon sonucu oluşan N/CASH yapısına ait iken (Mishra ve ark., 2022), 47,5°-48,6° aralığında çıkan yayvan amorf piklerin ise kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jeline ait olduğu düşünülmektedir (Wong, 2022).



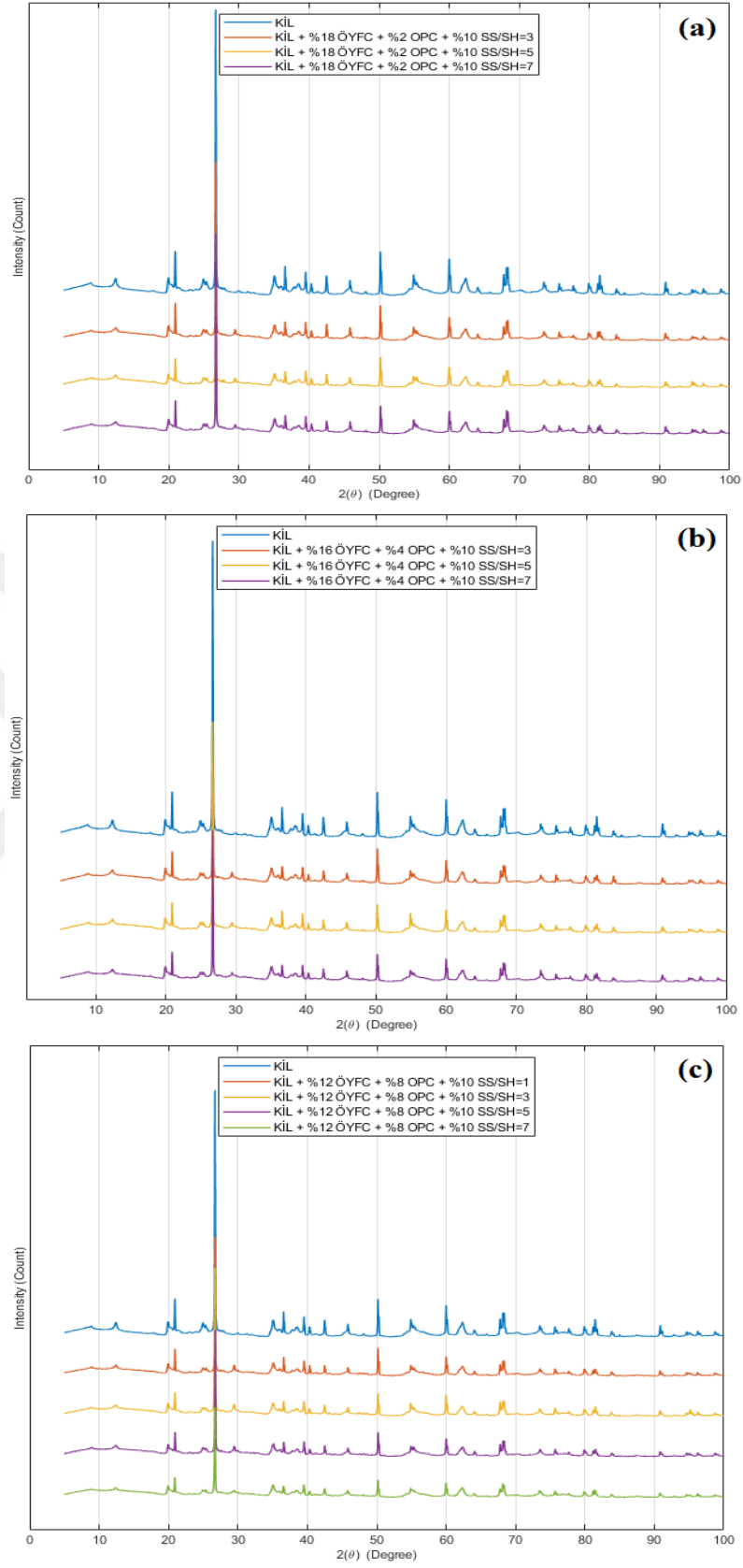
Şekil 4.46. Killi zemin, %20 ÖYFC ve %12 ÖYFC + %8 OPC ile stabilize edilen killi zeminlerin XRD kırınım desenleri a) %20 ÖYFC, b) %12 ÖYFC + %8 OPC numunelerine ait XRD kırınım desenleri.

Şekil 4.48’de kil ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC ve SS/SH ile stabilize edilmiş kilin XRD kırınım desenleri görülmektedir. Elde edilen kırınım desenlerinde kile ait kaolinit ve kuvars pik şiddetlerinde azalma görülmektedir. Stabilize edilen numunelerde 29,4° değerinde yeni bir pik oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu pik, kalsit (CaCO_3) fazının oluşumunu göstermektedir. Geopolimerleşme sonucunda amorf yapıda oluşan N/C-A-S-H jeline ait geniş (yayvan) pik, 32,8° civarında gözlemlenmiştir. Ayrıca 47,5°-48,6° değerlerinde C-A-S-H pikleri görülmektedir. Şekil 4.49’da Şekil 4.48’de görülen stabilize zemin numunelerinin XRD kırınım desenlerindeki önemli değişim alanlarının genişletilmiş görünümü sunulmaktadır. Her üç şekilde de I, II ve III olarak işaretlenmiş bölge aynı değişim bölgelerini göstermektedir. I olarak gösterilen bölgede $2\theta \approx 29,4^\circ$ değerinde pik oluşumu daha

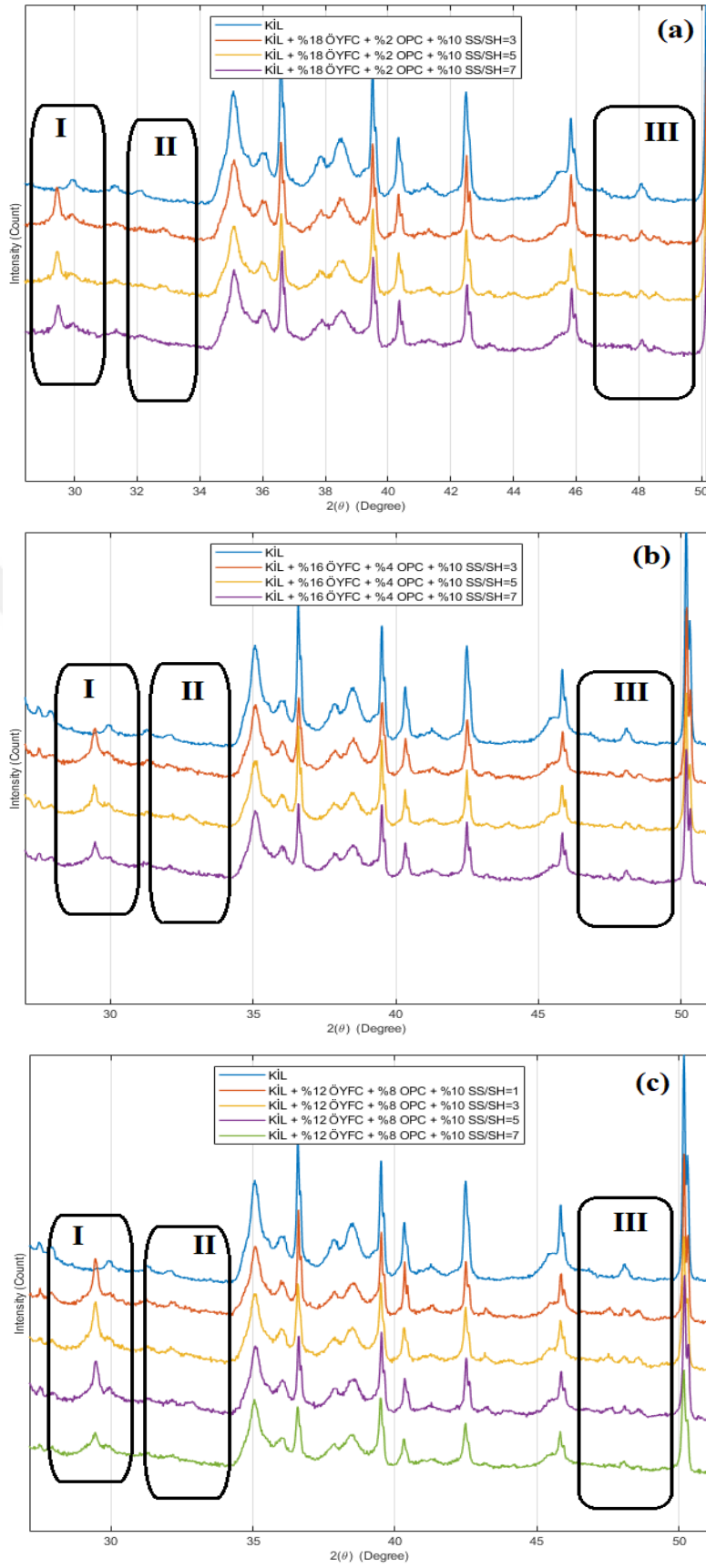
açık bir şekilde görülmektedir. Bu pik kilde gözlenmezken, stabilize numunelerde belirgin bir şekilde görülmektedir. II ve III olarak gösterilen bölgelerde XRD kırınım desenindeki değişim amorf bir yapı oluşumunu göstermektedir. Kırınım deseninde görülen değişim yayvan (geniş) pik şeklindedir. II nolu bölgede N/C-A-S-H, III nolu bölgede ise C-A-S-H oluşumları görülmektedir. XRD kırınım desenleri stabilizasyonda hem OPC'nin hidrasyonu sonucu bağlayıcı jellerin hem de geopolimerizasyonun başarılı bir şekilde oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.47. Killi zemin, %20 ÖYFC ve %20 ÖYFC + SS/SH (1, 3, 5 ve 7 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminlerin XRD kırınım desenleri.



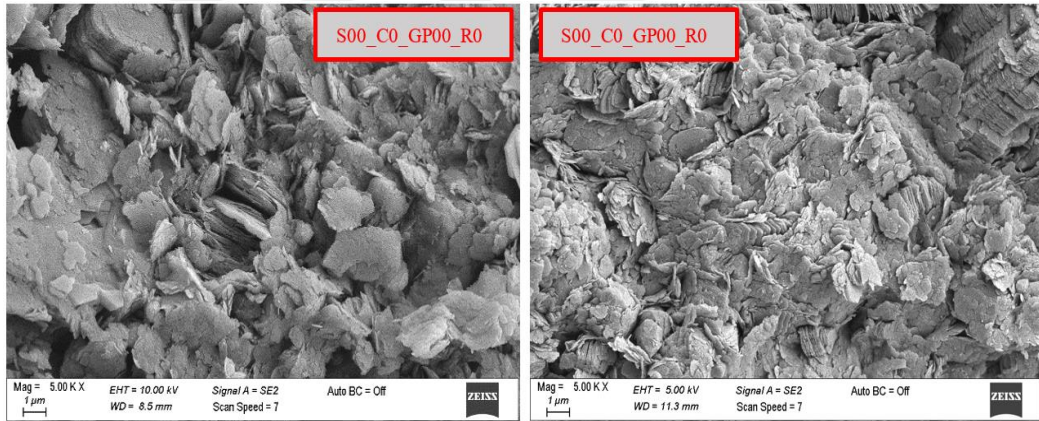
Şekil 4.48. Killi zemin ve farklı oranlarda ÖYFC + OPC + SS/SH ile stabilize edilen killi zeminin XRD kırınım desenleri a) %18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH (Oran 3, 5 ve 7), b) %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH (Oran 3, 5 ve 7), c) %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH (Oran 3, 5 ve 7).



Şekil 4.49. Stabilizasyon sonrası, killi zeminlerin XRD kırınım deseninde gözlenen değişimlerin detaylandırılmış görünümü.

4.4.3. SEM-EDS yöntemleriyle mikroyapısal ve elementel bileşim analizi

Kil ve stabilize zeminlerin yüzey morfolojisini incelemek, stabilizasyon sonrası meydana gelen yapı değişikliklerini görmek, reaksiyon ürünlerini ve bunların dağılımını gözlemlemek, element bileşimini ve dağılımını belirlemek, reaksiyon ürünlerini doğrulamak amacıyla toplam 18 numuneye SEM-EDS analizi yapılmıştır. Şekil 4.50’de çalışmada kullanılan kile ait SEM görüntüleri görülmektedir. Kilin homojen olmayan bir dağılım gösterdiği, laminar ve üst üste yığılmış plaklar (yapraklar) şeklinde bir yapı gösterdiği görülmektedir. Görüntülerdeki plakların gevşek bir şekilde ve boşluklu bir yapıda bulunduğu fark edilmektedir. Kil daneleri arasındaki bu boşluklar belirgin şekilde görülmekte olup, yapı genel olarak gözenekli bir özelliğe sahiptir. İncelenen kilin yapısında herhangi bir bağlayıcının olmamasından dolayı, böyle bir yapı ortaya çıkması beklenilmektedir (Yaghmaeiyan ve ark., 2025). Daneler arasındaki boşluklar, stabilizasyon öncesi ve sonrası yapısal değişimlerin değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir. Daneler arasındaki boşluklarda bağlayıcı jellerin oluşması stabilizasyonun gerçekleştiğinin önemli bir bulgusudur.

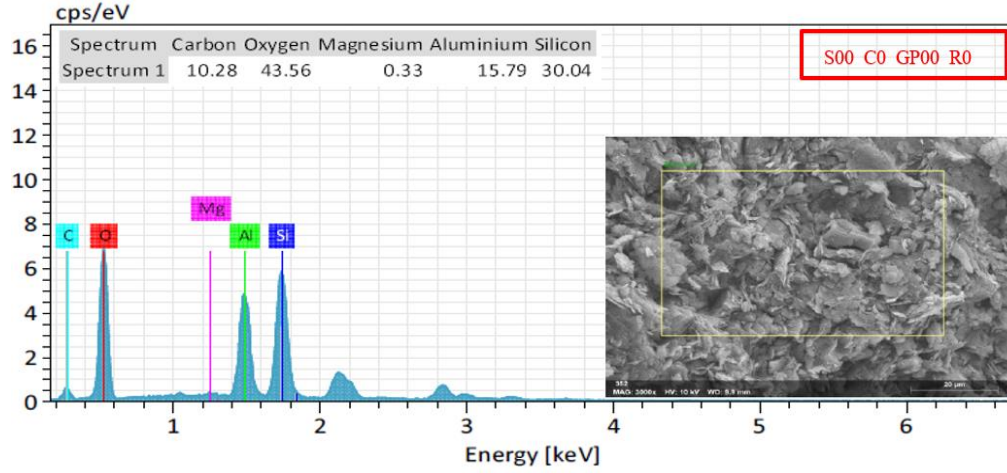


Şekil 4.50. Çalışmada kullanılan killi zemine ait SEM görüntüleri.

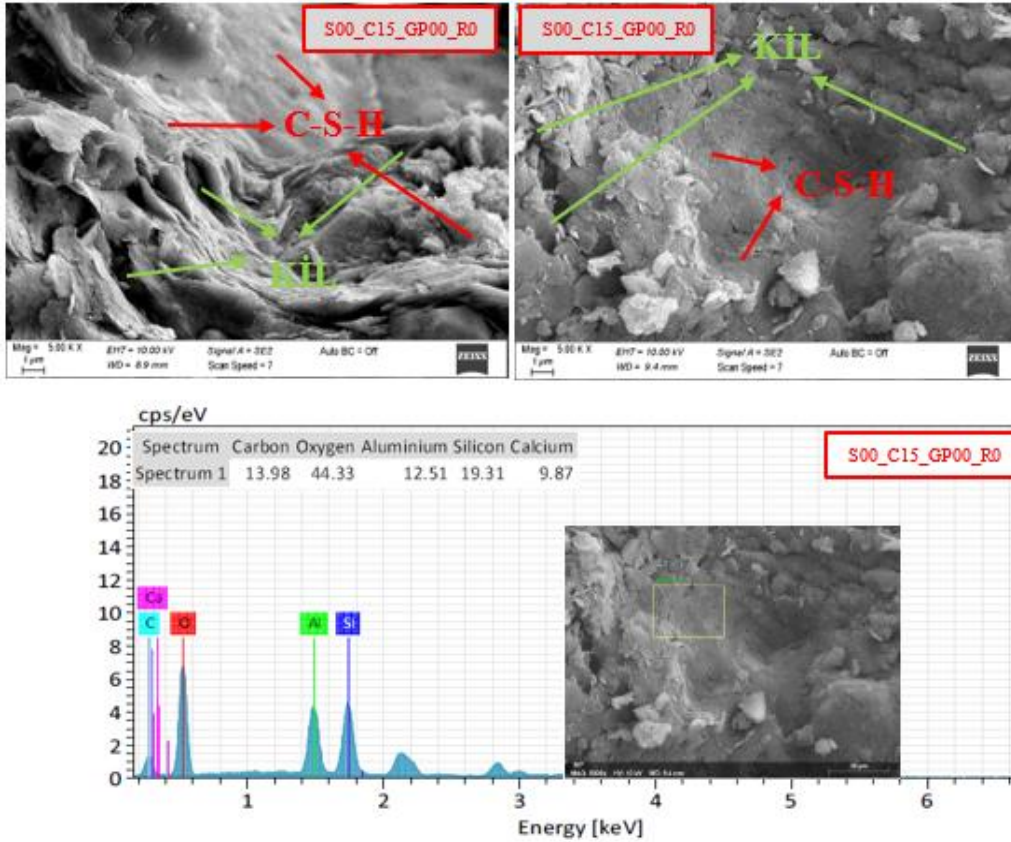
Kile ait EDS spektrumu incelendiğinde yapıda büyük oranda oksijen varlığı söz konusu iken diğer ana elementler ise Si ve Al olduğu görülmektedir. Düşük oranda çıkan karbonun safsızlıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.51). Benzer bulgular literatürde de bildirilmiştir (Jeremiah ve ark., 2023).

%15 OPC ile stabilize edilen kil numunesinin SEM görüntüleri incelendiğinde kil plakalarının, OPC jelleşmesi neticesinde oluşan C-S-H amorf matrisi ile sarıldığı, hidrasyon sonucu oluşan jellerin kil partikülleri üzerine yayılarak bir bağlayıcı ağ oluşturduğu, ancak killerin bir kısmının jel ile kaplanırken bir kısmının ise kaplanmadığı görülmektedir (Şekil 4.52). Kil ve jel ara yüzeylerinde boşlukların

oluşması ise aralarında yeterli düzeyde bir etkileşimin olmadığını göstermektedir. SEM görüntülerde etrenjit kristallerinin oluşmadığı düşünülmektedir. EDS sonuçları incelendiğinde hem kil hem de OPC yapısından gelen O, Al ve Si elementlerinin yanı sıra yeni Ca ait yeni bir pik görülmektedir. Ca içeriğinin OPC ana bileşen olarak C-S-H jellerinin varlığından ileri geldiği düşünülmektedir.

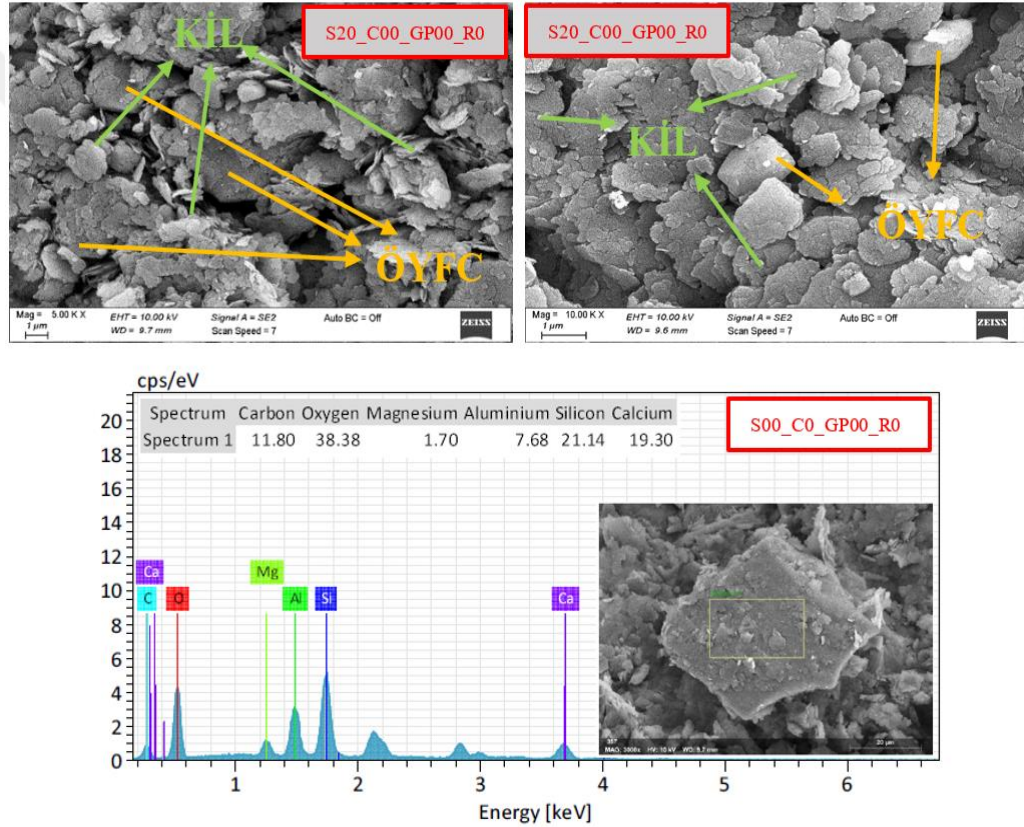


Şekil 4.51. Çalışmada kullanılan killi zeminin SEM-EDS analizi.



Şekil 4.52. %15 OPC ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi.

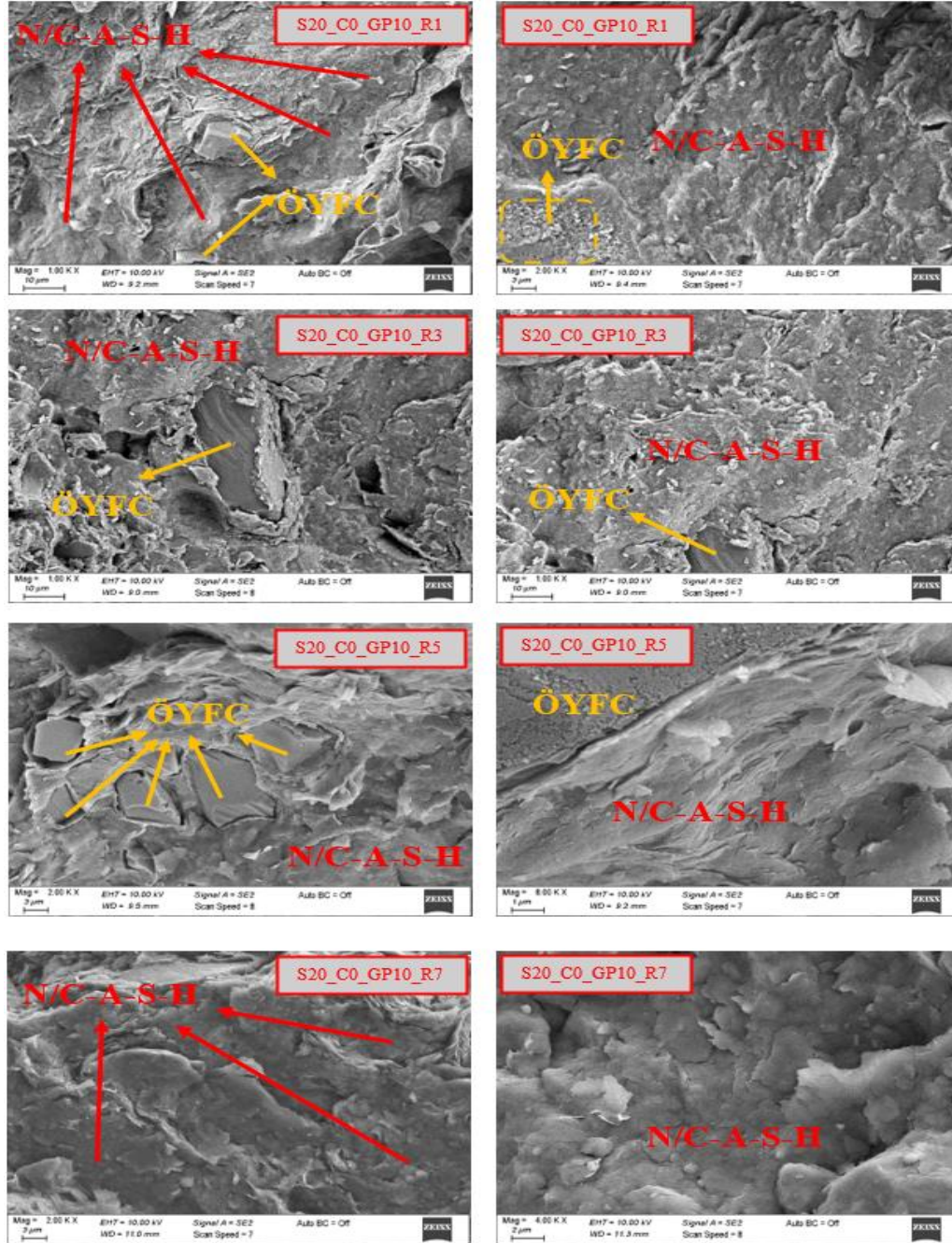
%20 ÖYFC ile stabilize edilen kil numunesinin SEM görüntüleri ve SEM-EDS analizi Şekil 4.53'te görülmektedir. Numunenin SEM görüntüleri incelendiğinde, kil plakaları arasında dağılmış ÖYFC'ye ait metal oksit tanecikleri görülmektedir. SEM görüntülerinde plakalar ve tanecikler arasında yeterli bir bağlanma olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak plakalar ve tanecikler arasında zayıf etkileşimler söz konusu olabilir. ÖYFC ile stabilize olan kildeki düşük düzeydeki dayanım artışının sebebi, ÖYFC'nin kalsiyum içeriğinden kaynaklı mikro yapıda bağlayıcı fazların oluşması ve/veya stabilize zeminin yoğunlaşması ve fiziksel sıkışma etkisi ile açıklanabilir. Plakalar arasında dağılmış tanecik üzerinden yapılan bölgesel EDS analiz sonucu ÖYFC bileşimi ile uyumludur (Tablo 3.6).



Şekil 4.53. %20 ÖYFC ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüsü ve SEM-EDS analizi.

%20 ÖYFC + alkali aktivatörler ile stabilize edilen kil numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 4.54'te görülmektedir. Şekilde, SS/SH oranları 1, 3, 5 ve 7 olan numunelere ait SEM görüntüleri sırasıyla yer almaktadır. Genel itibariyle yapılar heterojenlik göstermektedir. Bütün numunelerde geopolimerleşme sonucu oluşan N/C-A-S-H formları izlenmiştir. Kil plakaları geopolimer matrisinin içine gömülüdür. Geopolimer matrisi amorf görünümde olup XRD analizleriyle de uyumludur. Görüntülerde düşük

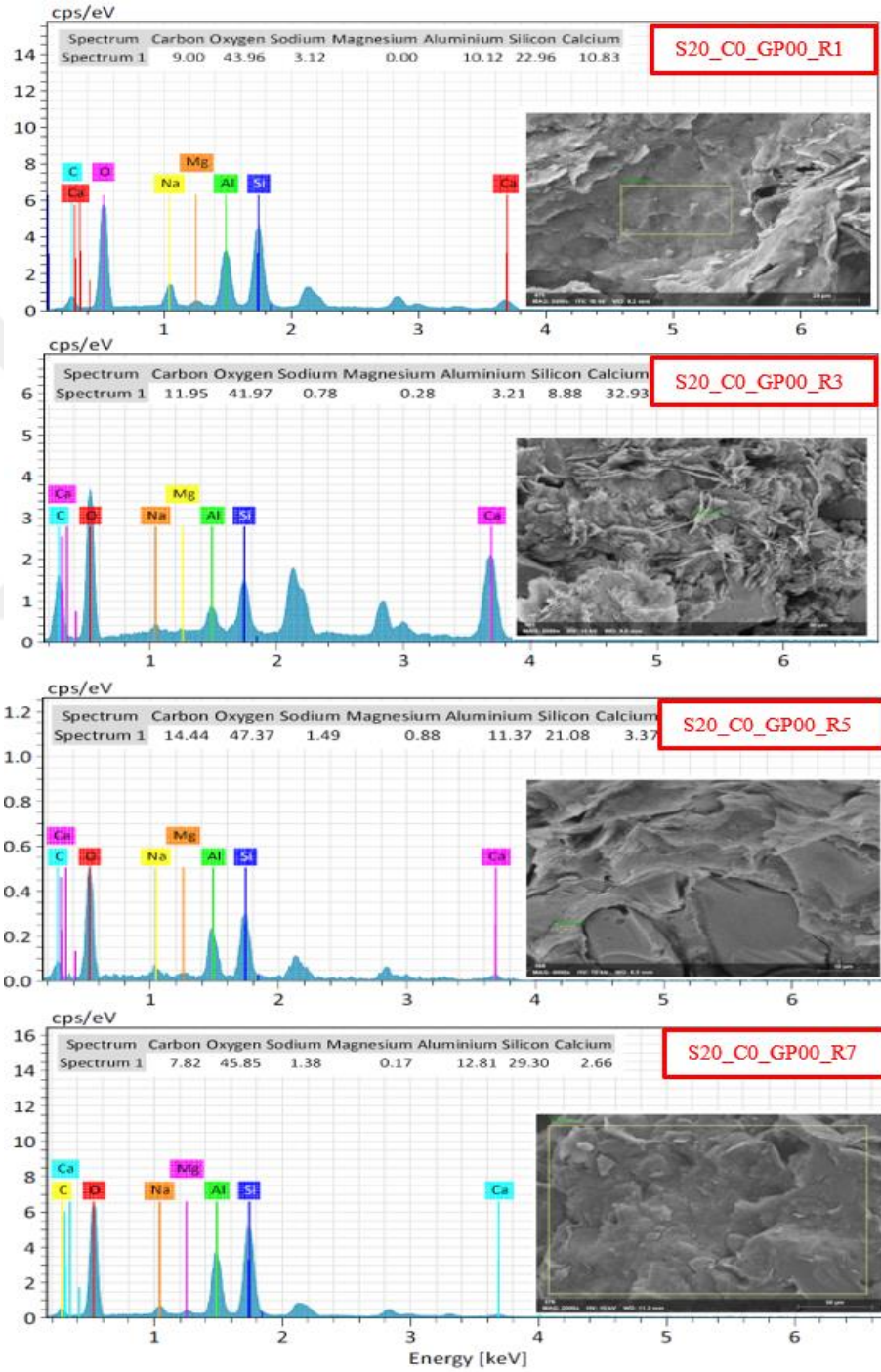
boşluk oranı ve daha kompakt bir yapı izlenmiştir. Alkali aktivasyon neticesinde oluşan N/C-A-S-H jellerinin boşlukları doldurduğu görülmektedir. Şekil 4.54'te sunulan SEM görüntülerindeki yapıları daha ayrıntılı incelemek ve fazların hangi oluşumlara ait olduğunu belirlemek için EDS analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.55'te sunulmuştur.



Şekil 4.54. %20 ÖYFC ve alkali aktivatörler ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.

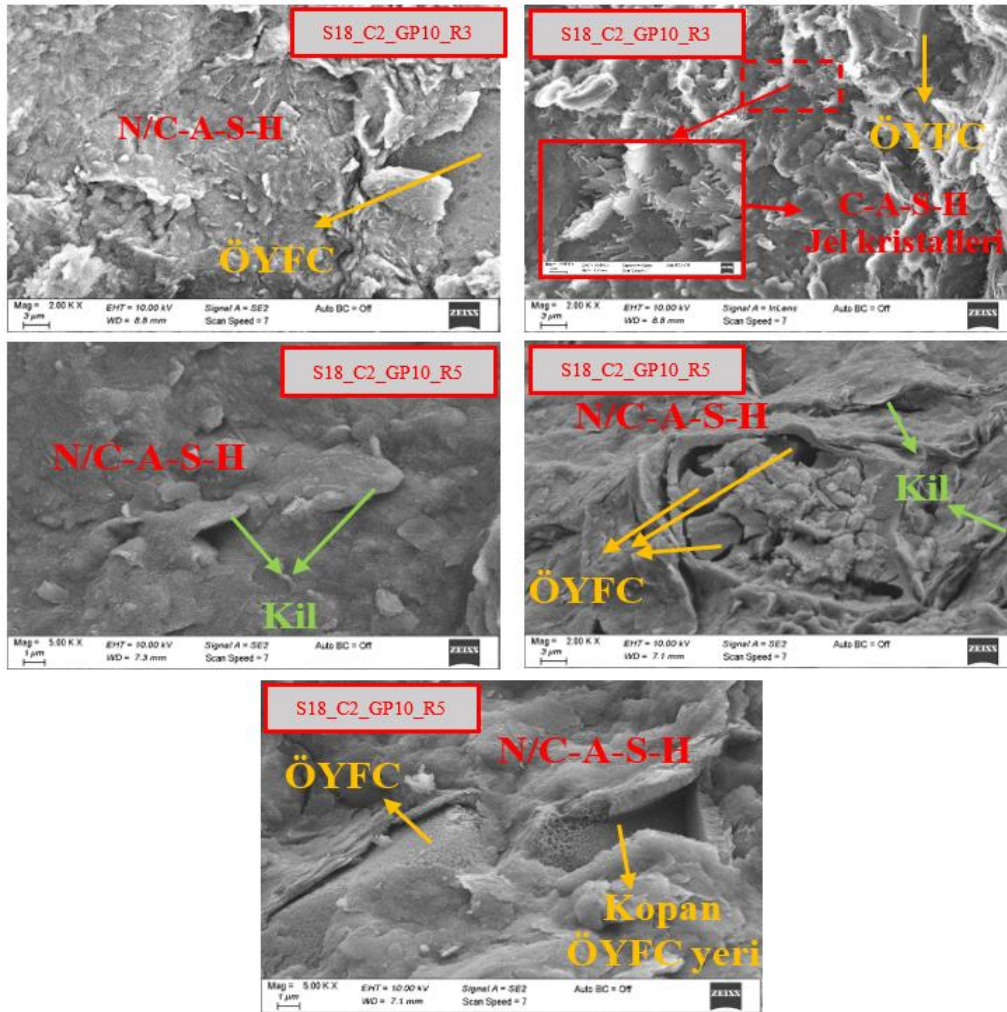
Matris jel yapılarının EDS sonuçlarında, Na varlığı gözlenmiş olup Si, Ca, ve Al sinyalleri belirgin olarak ortaya çıkarmıştır. EDS sonuçları geopolimerleşme

neticesinde oluşan N/C-A-S-H jellerinin varlığını göstermektedir. EDS analiz sonuçlarında Mg oranının düşük olduğu görülmektedir. Analizde görülen Mg'nin ÖYFC içeriğinden geldiği düşünülmektedir. Numunelerin genel olarak Al ve Si oranlarının yüksek olduğu görülmüştür. Na oranının yüksek olduğu bölgelerde sodyum alüminosilikat hidrat (N-A-S-H) oluşumunun, Ca oranının yüksek olduğu bölgelerde ise C-A-S-H oluşumunun daha fazla olduğu söylenebilir.



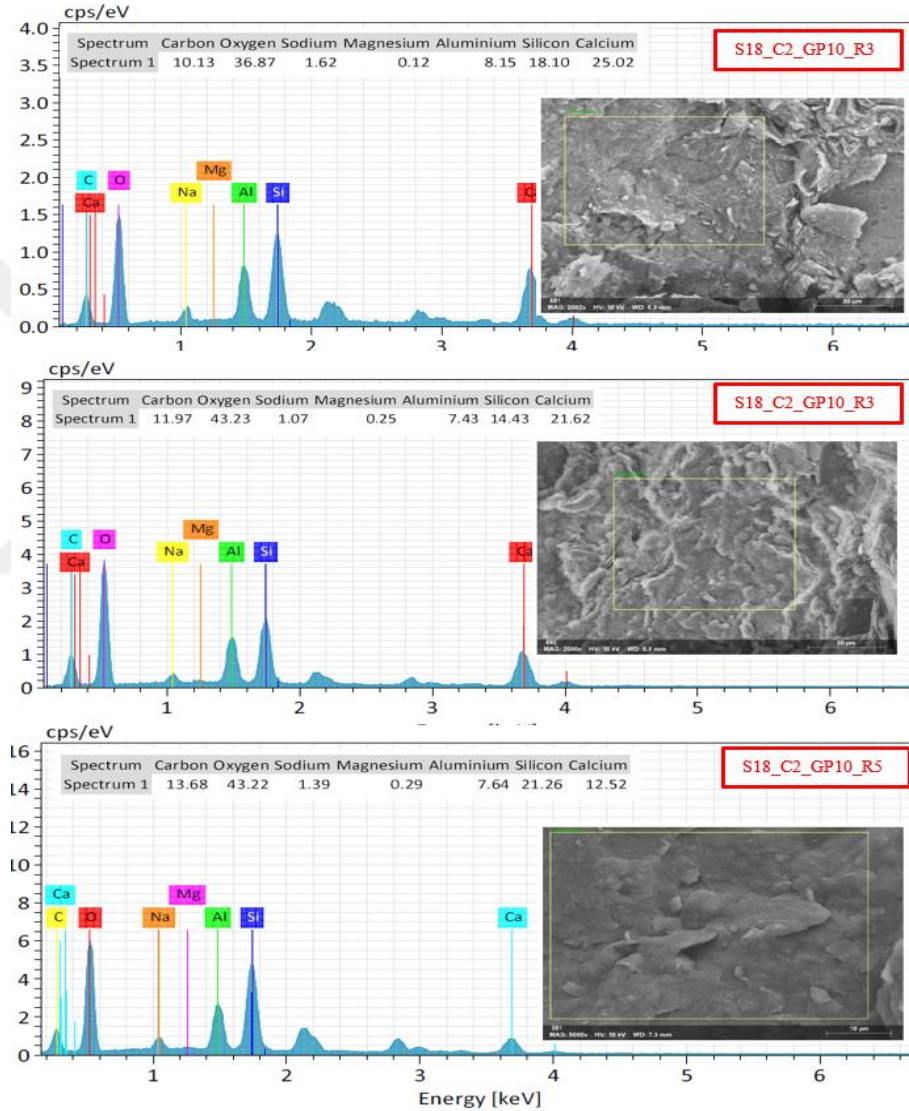
Şekil 4.55. %20 ÖYFC + alkali aktivatörler ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri

18 ÖYFC + %2 OPC + SS/SH oranı 3 ve 5 ile stabilize edilen kil numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 4.56'da görülmektedir. SEM görüntülerinde stabilize kilde yoğun amorf bir matrisin olduğu görülmektedir. Matris büyük oranda geopolimerden oluşurken, OPC varlığından dolayı hidrasyon jelinin varlığının da söz konusu olduğu düşünülmektedir. SS/SH oranı 3 olan karışımda yoğun jelleşmeden kaynaklı C-A-S-H jelinin kristal kalıntıları iğnemi kısa lifcik yapıları şeklinde görülmektedir. Kil plakalarının matris içinde gömülü olduğu, ÖYFC taneciklerinin ise matris jel tarafından sarıldığı görülmektedir. Görüntüler, jel oluşumunun kil yapısındaki boşlukları kapatarak sıkı bir yapı oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Şekilden ÖYFC tanecikleri detaylı incelendiğinde kenar yapısında pürüzleşme ve ayrıca parçalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi alkalinin ÖFYC yapısındaki iyonları çözmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çözünen bu iyonlar ortamdaki jelleşme reaksiyonlarına katılmıştır.



Şekil 4.56. %18 ÖYFC + %2 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.

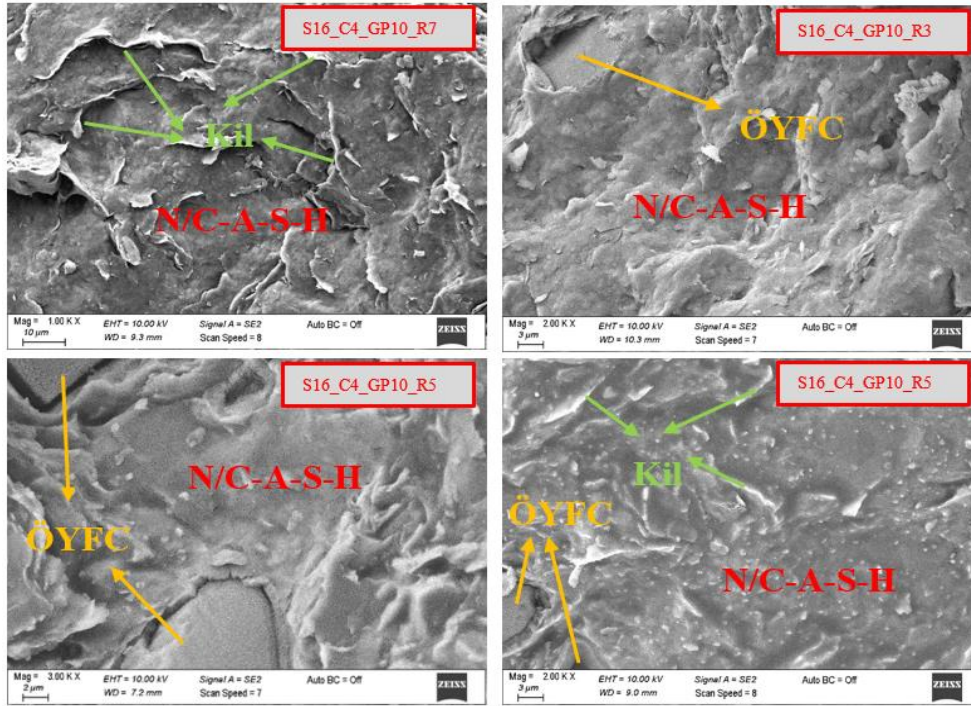
SEM görüntülerinde belirgin bir şekilde görülen matris yapılarının kimyasal bileşimi SEM-EDS analizleri ile incelendiğinde Ca, Al, Si, Na ve O varlığı görülmüştür (Şekil 4.57). Bu bulgu jelleşme ile N/C-A-S-H oluşumunun bir göstergesidir. Jel yapısında Al varlığının olması ve SEM görüntülerinde tespit edilen çözünmeden, ÖYFC'nin alkali varlığında jelleşmeye katıldığı söylenebilir. S18_C2_GP10_R5 numunesinde Ca oranının düşük olması geopolimerleşmede N-A-S-H katkısı olasılığının daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.57. %18 ÖYFC + %2 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri.

%16 ÖYFC + %4 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH = 3, 5 ve 7) ile stabilize edilen kilin SEM görüntüleri Şekil 4.58'de görülmektedir. S16_C4_GP10_R7 numunesinde, alkali aktivasyon neticesinde kil katmanları arasında jel yapıların oluştuğu ve bu yapıların katmanlar içerisinde yayıldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde

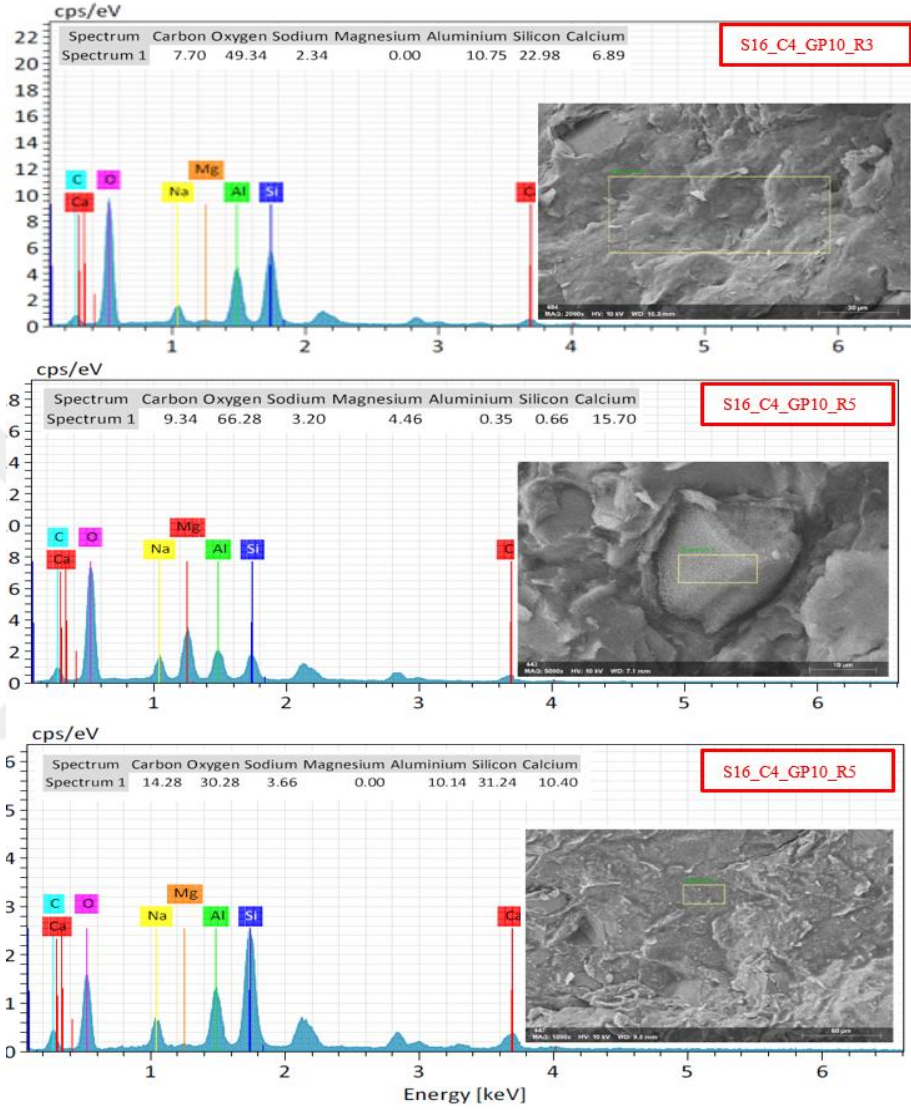
S16_C4_GP10_R3 numunesinde kil plakaları jel matris içine gömüldüğü ve ayrıca ÖYFC etrafında da yoğun jelleşmenin varlığı söz konusudur. SEM görüntülerinde kil katmanlarının arasında kısmi boşlukların varlığı söz konusudur. S16_C4_GP10_R5 numunesinde kil katmanlarının jel matris tarafından daha büyük oranda kapandığı, kil katmanları arasında daha az boşlukların olduğu izlenmektedir. S16_C4_GP10_R5 numunelerindeki alkali aktivasyon sonucu meydana gelen reaksiyon ürünlerinin daha homojen ve daha geniş yüzeye yayılmış olduğu, amorf ve yapışkan bir görünüme sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.58. %16 ÖYFC + %4 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3, 5 ve 7 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.

Şekil 4.58’de görülen numunelerin yapılarını daha ayrıntılı incelemek amacı ile EDS analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 4.59’da sunulmuştur. S16_C4_GP10_R3 numunesinde Ca, Na, Al ve Si varlığı görülmüştür. Şekil 4.59’da görülen bu EDS bulgusu N/C-A-S-H geopolimer oluşumuna işaret etmektedir. Na içeriğinin diğer numunelere göre daha yüksek çıkması N-A-S-H oluşumunun lehine yorumlanmıştır. S16_C4_GP10_R5 numunesinin ÖYFC taneciği üzerinden alınan EDS sonucu ortamdaki alkali aktivasyonu neticesinde Al ve Si yapılarının çözünerek geopolimer jelleşmesine katıldığı anlaşılmaktadır. Bu durum ÖYFC yüzeyinden alınan EDS analizindeki Al ve Si ağırlık yüzdelерinin sırasıyla %0,35 ve %0,66 olmasıyla da kanıtlanmıştır. S16_C4_GP10_R5 numunesinin jel matrisinden yapılan EDS analizi

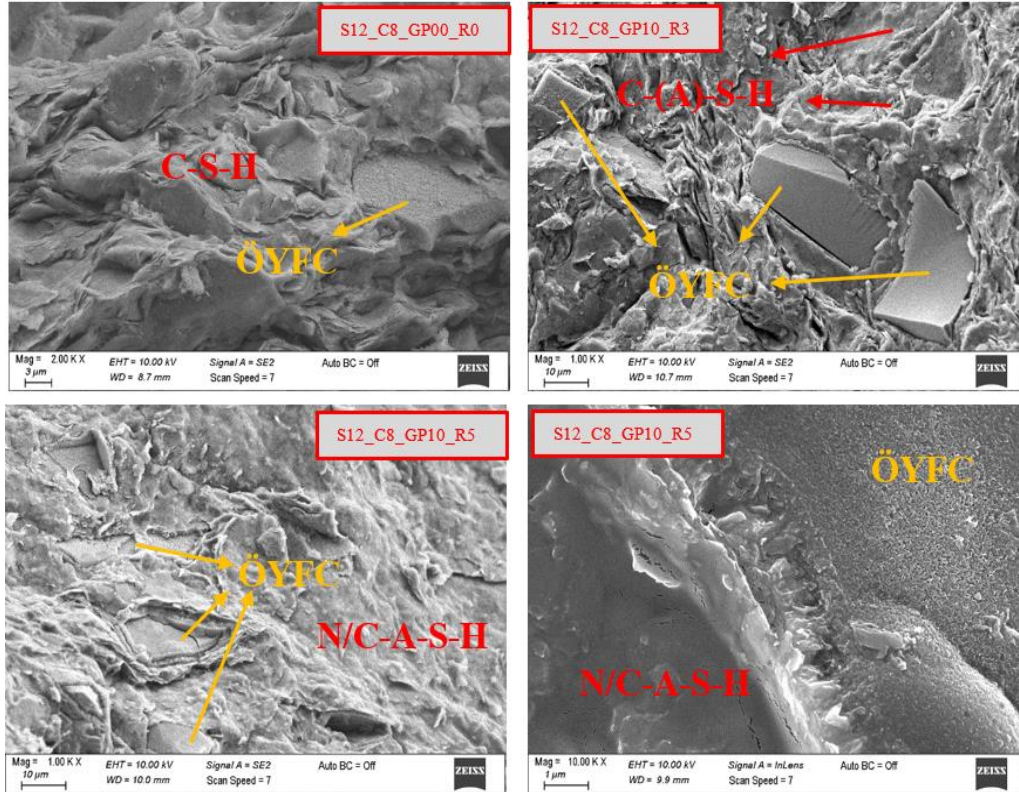
ise Na (%3,7), Ca (%10,4), Si (%31,2) ve Al (%10,1) varlığını görülmüştür. Ayrıca Na içeriğinin yüksek olması N-A-S-H oluşumunun baskın olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar genel olarak %16 ÖYFC ve %4 OPC içerikli numunelerde, diğerlerinden farklı olarak, N-A-S-H oluşumunun daha fazla olduğunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.59. %16 ÖYFC + %4 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3, 5 ve 7 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri.

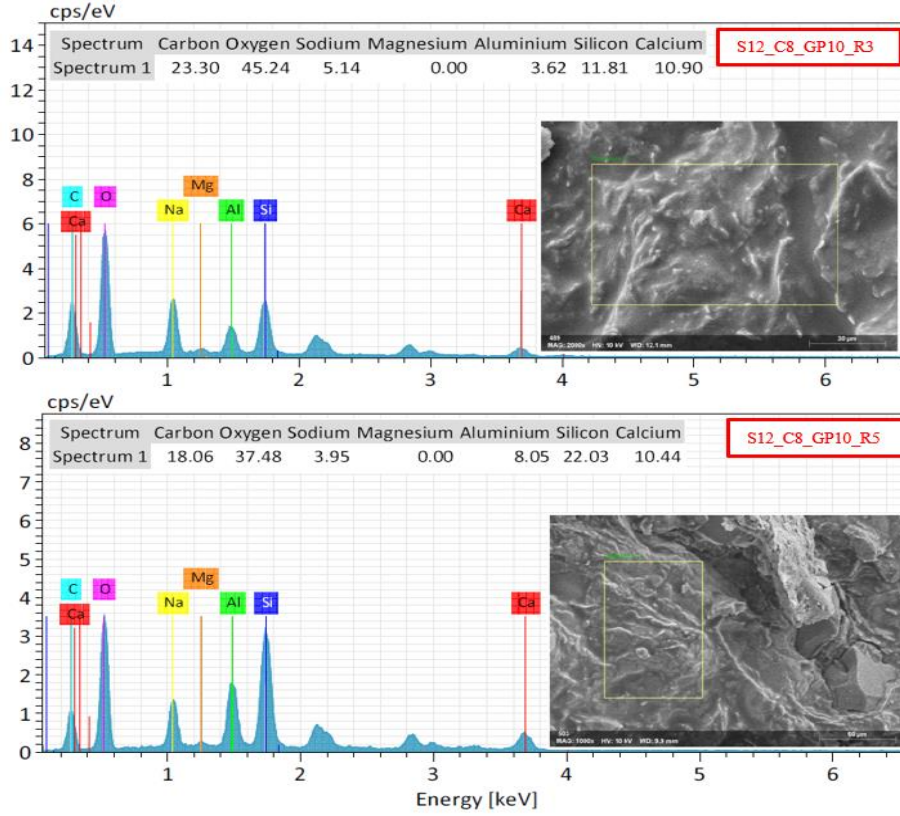
%12 ÖYFC + %8 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH oranı 3 ve 5) ile stabilize edilen kil numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.60'ta görülmektedir. %12 ÖYFC + %8 OPC numunesine ait SEM görüntüsü incelendiğinde kil plakalarının birbirine matris ile bağlandığı ancak aralarında boşlukların olduğu görülmektedir. Matrisin görünümü, karışımda alkali olmadığından OPC hidratasyonu neticesinde C-S-H oluşumuna atfedilebilir. S12_C8_GP10_R3 numunesinde matris morfolojisi daha önceki yüksek oranda ÖYFC içeren numunelerle kıyaslandığında

daha pürüzlü olması, geopolimer oranının göreceli olarak daha düşük, hidrasyon sonucu oluşan C-S-H oranının ise daha yüksek olduğunu gösterebilir. SS/SH oranı 5 olan numunede matrisin daha pürüzsüz olması N/C-A-S-H yapısının daha fazla olmasından kaynaklanıyor olabilir. S12_C8_GP10_R5 numunesinin 10Kx büyütmedeki görüntüsünden net görüldüğü gibi ÖYFC alkali etkisi ile çözünerek jel oluşumuna katılmaktadır. Oluşan jel yayılmış ve süreklilik göstermektedir. Kristalimsi bir faz olmadığı ya da matrise gömülü kaldığı söylenebilir.



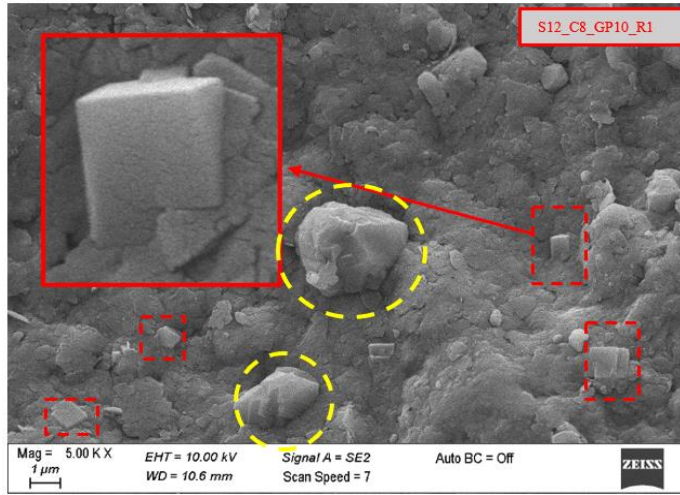
Şekil 4.60. %12 ÖYFC + %8 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM görüntüleri.

Matris fazlarının oluşumunu daha detaylı incelemek için yapılan EDS analiz sonuçları Şekil 4.61’de verilmiştir. EDS analiz verileri incelendiğinde SS/SH oranı 3 olan numunede Na içeriğinin SS/SH oranı 5 olan numuneye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç SH miktarının fazla olduğu durumda N-A-S-H oluşumunu desteklemektedir. Ayrıca numunelerin Na içeriğinin %3,95 ve %5,14 olması, ortamda alkali aktivasyonun gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Bir diğer bulgu ise S12_C8_GP10_R3 numunesinde yüksek C (karbon) oranının olmasıdır. Bunun nedeni yüksek SH ve OPC oranından dolayı $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumunun fazla olması ve bunun da havadaki CO_2 ile teması ile karbonatlaşma ile sonuçlanmasındandır.

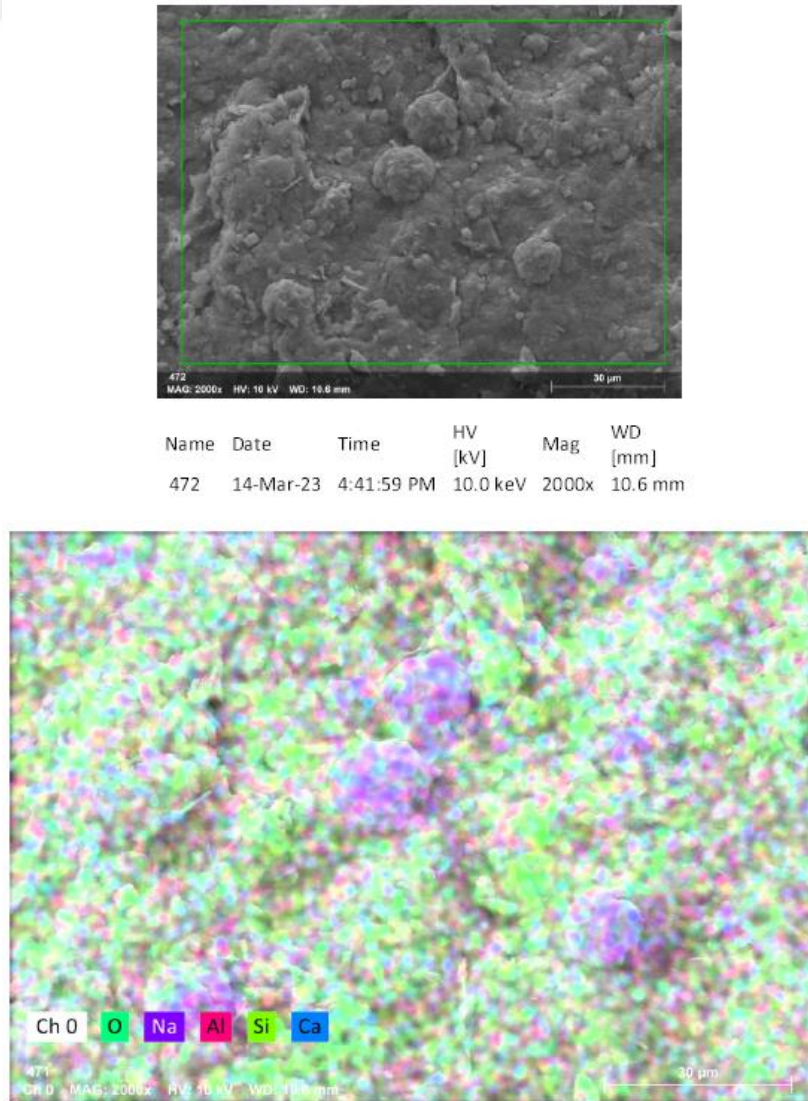


Şekil 4.61. %12 ÖYFC + %8 OPC ve %12 ÖYFC + %8 OPC + alkali aktivatörler (SS/SH=3 ve 5 oranlarında) ile stabilize edilen killi zeminin SEM-EDS analizleri.

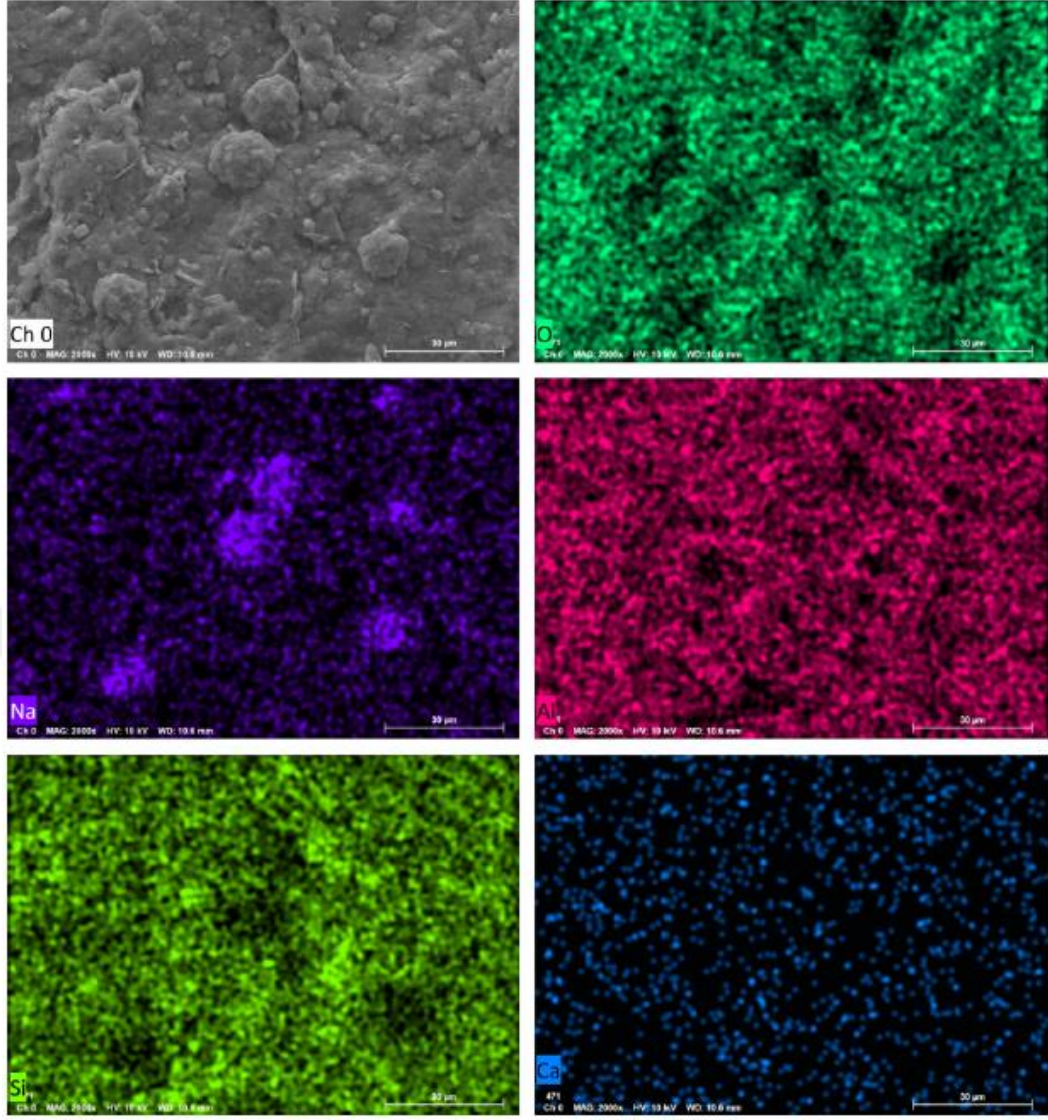
%12 ÖYFC + %8 OPC ve SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde diğer bütün numunelerden farklı olarak kübik kristal (kırmızı dikdörtgen bölgeler) ve bu kristallerin oluşturduğu topaklar (sarı daireler) görülmektedir (Şekil 4.62). Bu numunenin stabilizasyonunda SH oranının yüksek olması ve karışımdaki ÖYFC yüzdesinin az olmasından dolayı fazla olan SH miktarının tepkimeye girememesi ve bu sebepten dolayı havadaki CO₂ ile reaksiyonun gelişmesine sebebiyet vermiştir. Tepkime neticesinde Na₂CO₃.H₂O kristallerinin meydana geldiği şeklinde yorumlanmıştır. Bu oluşuma ait spesifik pikler FTIR spektrumlarında da görülmüş ve detaylı bir şekilde yorumlanmıştır. Şekil 4.62’de gözlenen kristal yapıları daha detaylı incelemek için EDS haritalama gerçekleştirilmiştir. Haritalama topakların yoğun bir şekilde Na, C ve O içerdiğini göstermektedir. Şekil 4.63’te elementlerin toplu olarak haritalaması görülürken, Şekil 4.64’te ise O, Na, Al, Si ve Ca elementlerinin ayrı ayrı haritalaması verilmiştir. Gerek Şekil 4.63 ve 4.64’te en belirgin ve ayırt edici element mor renk ile gösterilen Na’dır. Diğer elementlerin Na’ya göre daha homojen dağıldığı görülmektedir. Bu sonuçlar kristallerin Na₂CO₃ olduğunu desteklemektedir.



Şekil 4.62. %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen killi zeminde gözlenen kristal yapılar.

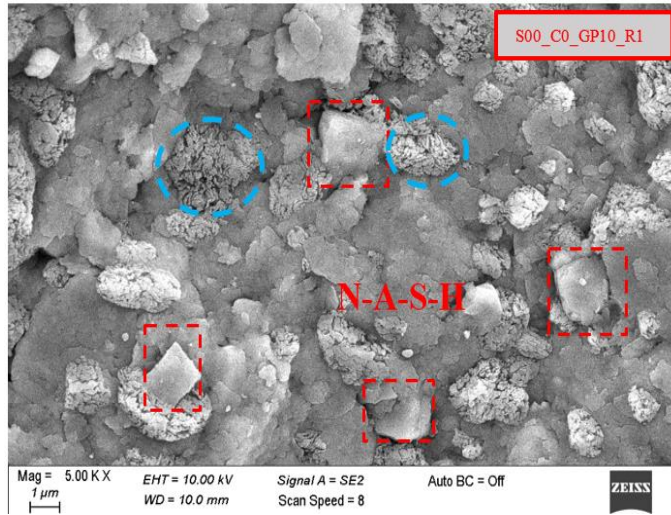


Şekil 4.63. %12 ÖYFC + %8 OPC + SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen killi zeminde gözlenen kristal yapıların EDS haritalanması.



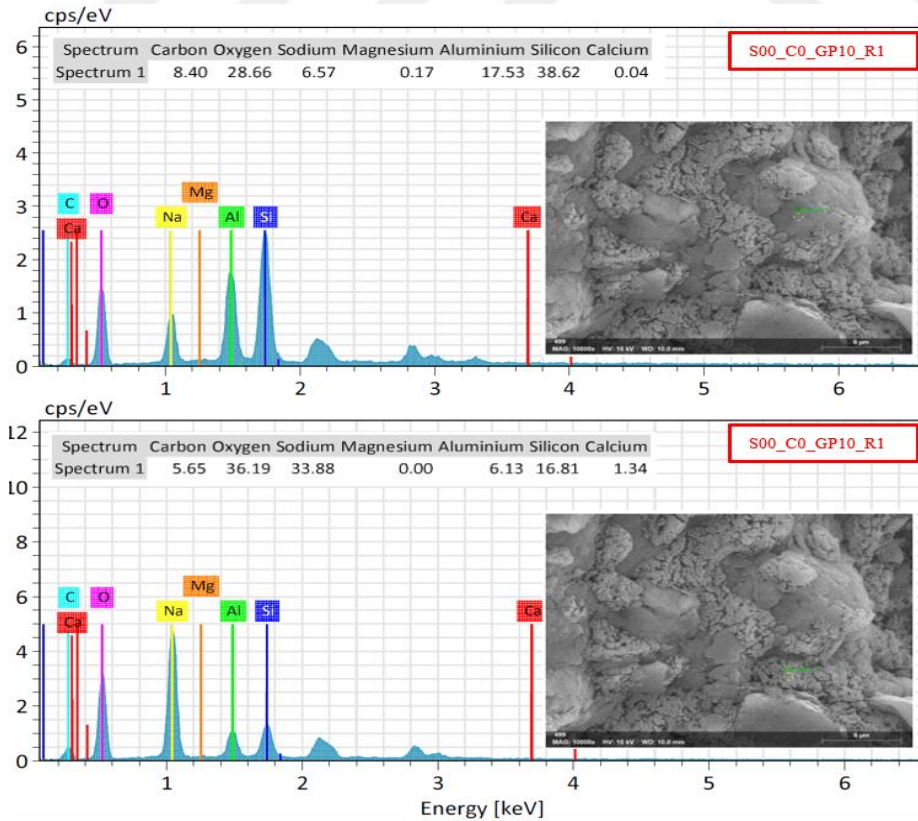
Şekil 4.64. %12 ÖYFC + %8 OPC ve SS/SH oranı 1 ile stabilize edilen killi zeminde gözlenen elementlerin dağılım haritaları.

S00_C0_GP10_R1 numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde diğer hiçbir numunede görünmeyen topaklanmış bölgelerin (mavi daireler) olduğu görülmektedir (Şekil 4.65). Bu yapılarının SS kalıntıları olduğu, kübik kristallerin (kırmızı dikdörtgenler) ise SH karbonatlaşması sonucu oluşan Na_2CO_3 kristalleri olduğu düşünülmektedir. Ayrıca kil plaklarının oldukça düşük miktarda jel ile birbirlerine zayıf şekilde tutundukları görülmektedir. Bu jel, kil bünyesindeki kaolinit kısımların alkali varlığında çözünmesi neticesinde ve SS/SH reaksiyonu ile oluşan zayıf N-A-S-H jellerinin olduğu düşünülmektedir. Kaolinit yapılarının çözündüğü XRD sonuçlarından da görülmüş olması bu yorumu desteklemektedir. Mekanik sonuçlarda bu numune zayıf dayanım göstermiştir. Bu bulgu, SEM görüntülerinde ortaya çıkan silikat kalıntıları, Na_2CO_3 oluşumları ve jelleşmenin düşük kalmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.65. SS/SH oranı 1 ile stabilize edilmiş killi zeminin SEM görüntüsü.

S00_C0_GP10_R1 numunesinin SEM’de gözlenen topak bölgeleri ve jel yapıları daha detaylı araştırmak için her iki bölgeden ayrı ayrı noktasal EDS analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.66’da verilmiştir. Jel fazı EDS sonucu Si, Na, Al ve O varlığını göstermektedir. Bu ise belirtildiği şekilde N-A-S-H jel oluşumuna işaret etmektedir. Topaklı bölgede ise yüksek oranda Na, Si ve O çıkmıştır. Bu sonuç ise SS kalıntıların varlığını gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 4.66. SS/SH oranı 1 ile stabilize edilmiş killi zeminin EDS analizi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alkaliyle aktive edilmiş hibrit cüruf/çimento sisteminin yüksek plastisiteli killi zemindeki stabilizasyon performansı araştırılmıştır. En etkili hibrit cüruf/çimento sistemini geliştirmek amacıyla, öğütölmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), Portland çimentosu (OPC), sodyum silikat (SS) ve sodyum hidroksit (SH) malzemeleri hem tek başlarına hem de birlikte kullanıldıkları durumlarda performanslarını karşılaştırmak için 27 farklı karışım hazırlanmıştır. Her bir karışım ile işlenen yüksek plastisiteli killi zemine ait kompaksiyon özellikleri belirlenmiş, farklı gün ve kür koşullarında stabilize numunelerin serbest basınç dayanımı (SBD) ve ultrasonik darbe hızı (UPV) değerleri ölçülmüş, bu iki parametre arasındaki ilişki incelenmiş ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal veriler ve bulgular doğrultusunda karışımların stabilizasyon performansları çok yönlü değerlendirilerek sonuç ve öneriler çıkartılmıştır.

Çalışmada kullanılan kilin optimum su muhtevası (OWC) %21,6 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık (MDD) değeri ise $15,7 \text{ kN/m}^3$ olarak bulunmuştur. Kile OPC ilavesiyle yapılan kompaksiyon deneylerinde, OPC oranı arttıkça OWC değeri azalmış, MDD değeri ise artmıştır. %20 ÖYFC katkısıyla gerçekleştirilen kompaksiyon deneylerinde ise tüm karışımlar arasında en düşük OWC değeri (%19,2) ve en yüksek MDD ($16,5 \text{ kN/m}^3$) değeri elde edilmiştir. Farklı oranlarda ÖYFC ve OPC karışımlarını kullanıldığı kompaksiyon deneyleri sonucunda, ÖYFC oranı azaldıkça OWC değerinin kısmen arttığı, buna karşılık MDD değerinin ise azaldığı görülmüştür. ÖYFC ve OPC karışımlarına alkali aktivatör (SS/SH oranı 1, 3, 5 ve 7) ilave edildiğinde, OWC değerlerinde %0,5-0,6 oranında bir artış, MDD değerlerinde ise 0,1-0,2 kN/m^3 düzeyinde bir azalma gözlenmiştir. Killi zeminde ÖYFC, OPC ve SS/SH'nin birlikte kullanıldığı kompaksiyon deneylerinde, SS/SH oranındaki değişimin OWC ve MDD üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Killi zemine yalnızca alkali aktivatör eklenerek yapılan kompaksiyon deneylerinde, OWC doğal kile göre azalmış, MDD ise artmıştır.

Killi zemin ve stabilize edilmiş bütün zemin numunelerinin 0, 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde hem havada kurutma hem de ıslak kürlenmiş şartlarda SBD değerleri ölçülmüştür. Bütün numunelerde zaman arttıkça SBD değerinde artma gözlenmiştir. Aynı kür sürelerinde havada kurutma numuneler ıslak kürlenmiş numunelere göre daha yüksek SBD değerleri göstermiştir. OPC ile stabilize edilmiş killi zeminde, artan OPC oranı SBD değerini yükseltmiştir. Yalnızca alkali aktivatör kullanılarak stabilize edilmiş killi zeminlerin SBD değerinde, işlenmemiş zemine kıyasla belirgin bir artış gözlenmemiştir. Bu durum, SS ve SH kombinasyonunun bu çalışmada kullanılan killi zeminin stabilizasyonu için tek başına yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. %20 ÖYFC ile stabilize edilmiş numunelerde 90 günlük kür sonunda SBD değerinde artış miktarı havada kurutma numunelerinde %47, ıslak kürlenmiş numunelerde ise %79 olmuştur. %20 ÖYFC stabilizasyonu ile elde edilen dayanım artışı ağırlıklı olarak fiziksel etkileşimlere, kısmen ise kimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. ÖYFC + OPC ile stabilize edilmiş killi zeminlerde, artan OPC oranına bağlı olarak SBD değerinde artış gözlenmiştir. ÖYFC + OPC + alkali aktivatörlerle stabilize edilen killi zeminlerde en yüksek SBD değeri, SS/SH oranı 5 olan karışımlarda elde edilmiştir. Bu oranı sırasıyla 7, 3 ve 1 oranı ile stabilize edilmiş killi zeminler takip etmiştir. SS ve SH içeriklerinin stabilizasyondaki etkisi, ÖYFC ve OPC oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. En yüksek SBD değeri %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH = 5 içeren karışımda hem havada kurutulan hem de ıslak kürlenen numunelerde elde edilmiştir. Bu numunelerde SBD artışı sırasıyla %298,4 ve %536,7 olarak hesaplanmıştır. Alkali aktivatörlerle aktive edilmiş hibrit cüruf/çimento ile stabilize edilmiş killi zeminlerin büyük bir kısmı hem havada kurutma hem de ıslak kür koşullarında yalnızca OPC ile stabilize edilmiş killi zeminlere kıyasla daha iyi stabilizasyon performansı göstermiştir. OPC ile stabilize edilmiş numuneler erken kür sürelerinde daha hızlı ve yüksek dayanım kazanırken, alkali aktivatör kullanılarak stabilize edilmiş numunelerde dayanım artışı daha uzun kür süresinde belirginleşmiştir. SS/SH oranı 1 olan numunelerde, SH miktarı diğer karışımlara göre daha fazladır. Fazla miktardaki SH tepkimeye girememiş ve havadaki nem ve karbon dioksit (CO_2) ile reaksiyona girerek yüzeyde sodyum karbonat monohidrat ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) kristalleri oluşturmuştur. Kristal oluşumları alüminosilikat miktarı düşük olan numunelerde daha fazla gözlenmiştir. SH oranının gereğinden fazla olması stabilizasyonun performansını olumsuz etkilemiştir. ÖYFC + OPC + alkali aktivatör ile stabilize edilmiş numunelerin hacim ve kütle değişimleri, OPC ile stabilize edilmiş

numunelere kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. SS/SH oranının stabilizasyonda hacim ve kütle değişimi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. SS/SH oranının artmasıyla birlikte hacim ve kütle değişiminde artış gözlenmiştir.

Hem havada kurutulan hem de ıslak kür uygulanan numunelere 90 günlük kür süresinin sonunda UPV testleri yapılmıştır. Havada kurutulan numunelerin UPV değerleri ıslak kürlenen numunelere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. OPC ile stabilize edilmiş numunelerde OPC miktarı arttıkça UPV değeri artmıştır. SBD sonuçlarına benzer şekilde en yüksek UPV değeri %16 ÖYFC + %4 OPC + SS/SH = 5 karışımıyla stabilize edilmiş numunede gözlenmiştir. SBD ile UPV arasındaki ilişkiyi incelemek için doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Havada kurutulan, ıslak kürlenen ve her iki kür koşulunu kapsayan numuneler için toplam üç ayrı regresyon modeli oluşturulmuştur. Her model için R^2 değeri hesaplanmış ve ampirik denklemler geliştirilmiştir. Modellerin R^2 değerlerinin yüksek çıkması SBD ile UPV arasında güçlü ve pozitif yönlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Önerilen ampirik denklemler benzer nitelikteki çalışmalar ve veriler için parametre kestirimi amaçlı kullanılabilir.

ÖYFC ve alkali aktivatörlerin kullanıldığı karışımlar ile stabilize edilen killi zeminlerde en yüksek dayanım değerleri, SS/SH oranı 5 olan numunelerde gözlenmiştir. Bu numuneleri sırasıyla SS/SH oranları 7, 3 ve 1 olan karışımlar izlemiştir. Havada kurutma kür şartlarındaki numuneler arasında, SS/SH oranı 5, 7 ve 3 olan karışımlar, %15 OPC ile stabilize edilen numunelere kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Islak kürleme koşulları altında ise, SS/SH oranı 5 ve 7 olan karışımların dayanım değerleri, %15 OPC ile stabilize edilmiş numunelerden daha yüksek bulunmuştur. Buna göre, yalnızca alkali aktivatörler kullanılarak aktive edilen ÖYFC bazlı bağlayıcı sistemlerin, geleneksel OPC ile yapılan stabilizasyona kıyasla killi zeminlerin dayanım özelliklerini iyileştirmede etkili bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır. Alkaliler ile aktive edilen gerek ÖYFC gerekse hibrit cüruf/çimento katkıları, OPC'ye kıyasla daha düşük karbon salınımı, atık malzemelerin değerlendirilmesi, daha az enerji ve su gereksinimi, doğal kaynakların korunması, uzun ömürlülük ve dayanıklılık sayesinde çevre korunması gibi çevresel avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar sayesinde bahsi geçen katkıları OPC'ye kıyasla çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak hesaba katılabilir.

Killi zemin, ÖYFC, OPC ve stabilize edilmiş numunelerden seçilenlere FTIR, XRD ve SEM-EDS analizleri yapılmıştır. FTIR analizinde, killi zeminin ve stabilize edilmiş

numunelerin spektrumları arasındaki fark alınarak, değişimin yoğunlaştığı bantlar ve pik şiddetlerindeki farklılıklar daha ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Stabilize edilmiş numunelerin FTIR spektrumlarındaki –OH pik şiddetindeki azalma, hidrasyonla kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapılarının oluşumu, geopolimerleşme süreçleri ve karbonatlaşma gibi kimyasal değişimlerle ilişkilendirilmiştir. OPC ve alkali aktivatörün birlikte kullanıldığı karışımlarda –OH bandında fark edilebilir bir azalma gözlenmiştir. Fazla miktarda SH'nin kullanıldığı stabilize edilmiş numunelerde karbonatlaşmanın meydana geldiği görülmüştür. ÖYFC'nin tek başına kullanıldığı karışımlarda, ÖYFC ile kil arasında sınırlı düzeyde kimyasal etkileşim olduğu ve bu etkileşim neticesinde karbonatlaşmanın oluştuğu düşünülmektedir. Stabilize edilmiş numunelerin FTIR spektrumlarında, doğal killi zeminde bulunmayan yeni piklerin oluştuğu gözlenmiştir. Bu piklerin özellikle alkali aktivatör ilavesiyle belirgin hale gelmesi, geopolimerleşmenin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. %15 OPC ile stabilize edilmiş numunenin XRD deseninde kil pikleri kısmen görülürken, OPC'ye ait pikler gözlenmemiştir. Bu durum, OPC'nin hidrasyonla amorf C-S-H jelleri oluşturduğunu göstermektedir. XRD kırınım deseninde gözlenen kaolinit pikleri, alkali varlığında çözünmeden dolayı azalmıştır. SS/SH'nin kullanıldığı ÖYFC ve ÖYFC + OPC ile stabilize edilmiş numunelerde, XRD deseninde geopolimerleşmeye bağlı olarak amorf N/C-A-S-H yapısına ait yayvan pikler oluşmuştur.

OPC ile stabilize edilmiş numunelerin SEM görüntülerinde C-S-H jellerinin kil plakalarını kısmen sararak bağlayıcı bir ağ oluşturduğu gözlenmiştir. Buna karşılık, ÖYFC ile stabilize edilmiş numunelerde ise ÖYFC taneciklerinin kil plakaları arasında dağınık şekilde yer aldığı ve bu yapıda tanecikler arası bağlanmanın zayıf olduğu görülmektedir. SEM analizlerinde, alkali aktivatörle stabilize edilmiş numunelerde geopolimerleşme sonucu oluşan amorf N/C-A-S-H jel yapılarının geliştiği görülmüştür. Özellikle yüksek dayanım gösteren numunelerde, bu jellerin kil plakalarını sararak boşlukları doldurduğunu ve kompakt bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. ÖYFC tanecikleri detaylı incelendiğinde, kenarlarında alkali aktivatörün çözüldüğü iyonlara bağlı olarak pürüzleşme ve parçalanmalar tespit edilmiştir. Bu iyonların jelleşme reaksiyonlarına katıldığı değerlendirilmiştir. EDS analizlerinde jelleşmenin meydana geldiği bölgelerde Na, Si, Ca ve Al elementlerine ait sinyaller belirgin şekilde izlenmiş, ancak bu sinyallerin yoğunluğu numuneler arasında değişkenlik göstermiştir. Na oranının yüksek olduğu bölgelerde sodyum alüminosilikat

hidrat (N-A-S-H) oluşumunun, Ca oranının yüksek olduğu bölgelerde ise kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) oluşumunun daha fazla olduğu söylenebilir. SEM görüntülerinde, SH oranının yüksek olduğu numunelerde, fazla miktarda SH'nin tepkimeye girmeyip havadaki CO₂ ile reaksiyona girerek Na₂CO₃·H₂O kristalleri oluşturduğu gözlenmiştir. FTIR, XRD ve SEM-EDS analizleri, stabilizasyon sürecinde hem OPC'nin hidratasyonu ile oluşan bağlayıcı jellerin hem de geopolimerleşmeye bağlı fazların başarıyla geliştiğini ortaya koymuştur.

SH miktarı stabilizasyonun performansını olumsuz etkilememesi için dikkatle optimize edilmelidir. FTIR, XRD ve SEM-EDS analizlerinde numunelerin homojen olmaması, verilerin doğru şekilde değerlendirilmesinde sınırlayıcı bir faktör oluşturmaktadır. Alkali aktivasyonun zemin stabilizasyonunda performansı, kullanılan kil veya zemin türüne, aktivatörün tipi ve oranına, katkı maddesinin özelliklerine ve kür koşullarına bağlı olarak değişebileceğinden, uygulamalarda dikkatli ve kontrollü olunması gerekmektedir. Farklı oranlardaki ÖYFC ve OPC içeriğine bağlı olarak en uygun SS/SH oranı değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle her bir karışım için SS/SH oranı ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Alkali aktivasyon yöntemiyle stabilize edilen zeminlerde dayanım gelişimi kısmen yavaş gerçekleştiğinden, bu yöntem erken dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmemelidir.



KAYNAKLAR

- Abdullah, H. H., ve Shahin, M. A. (2019, 7-9, April). Strength characteristics of clay stabilized with fly-ash based geopolymer incorporating granulated slag. H. El Nagggar, M. Shanin (Ed.) *In Proceedings of the 4th world congress on civil, structural, and environmental engineering*, Roma, İtalya. <https://doi.org/10.11159/icgre19.139>
- Adeyanju, E., ve Okeke, C. A. (2019). Exposure effect to cement dust pollution: a mini review. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1572.
- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., & Beecham, S. (2021). Enzyme induced calcium carbonate precipitation and its engineering application: a systematic review and meta-analysis. *Construction and Building Materials*, 308, 125000.
- Alireza, S. G. S., Mohammad, M. S., & Hasan, B. M. (2013, 29 April - 4 May). Application of nanomaterial to stabilize a weak soil. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 5, Chicago, Illinois, USA
- Al-Khafaji, R., Jafer, H., Dulaimi, A., Atherton, W., & Weida, Z. (2017). Soft soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag. In The 3rd BUiD Doctoral Research Conference, At British University in Dubai. UAE
- Almajed, A., Lateef, M. A., Moghal, A. A. B., & Lemboye, K. (2021). State-of-the-art review of the applicability and challenges of microbial-induced calcite precipitation (MICP) and enzyme-induced calcite precipitation (EICP) techniques for geotechnical and geoenvironmental applications. *Crystals*, 11(4), 370.
- Alp B. (2012), Utilization of GGBFS Blended Cement Pastes in Well Cementing, [Yüksek lisans tezi] Middle East Technical University
- Amer, I., Kohail, M., El-Feky, M. S., Rashad, A., & Khalaf, M. A. (2021). Characterization of alkali-activated hybrid slag/cement concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 135-144.
- Amulya, S., Ravi Shankar, A. U., & Praveen, M. (2020). Stabilisation of lithomargic clay using alkali activated fly ash and ground granulated blast furnace slag. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(9), 1114-1121.
- Arun, E., Arumairaj, P. D., & Janaki Raman, S. (2019). Application of geopolymer in stabilization of soft clay. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 996-999.
- Aruntaş, H. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-204.
- Askarian, M., Tao, Z., Adam, G., & Samali, B. (2018). Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 330-337.

- ASTM 597-02. (2003). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, West Conshohocken, PA.
- ASTM C618. (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete1.
- ASTM D7928-17. (2017). Standard Test Method for Particle Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2017. <https://doi.org/10.1520/D7928-17>
- Aydın, S. (2013). A ternary optimisation of mineral additives of alkali activated cement mortars. *Construction and Building Materials*, 43, 131-138.
- Aydın, S. (2010). Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi [Doktora tezi] Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Aytekin, S. (2009). Uçucu küllerinin killi zeminlerin ıslahında kullanımı. [Yüksek lisans tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Bacsik, Z., Mink, J., & Keresztury, G. (2004). FTIR spectroscopy of the atmosphere. I. Principles and methods. *Applied spectroscopy reviews*, 39(3), 295-363.
- Bagewadi, S. V., ve Rakaraddi, P. G. (2015). Effect of geopolymer on the strength of black cotton soil. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(8), 229-231.
- Barzgar, S., Tarik, M., Ludwig, C., & Lothenbach, B. (2021). The effect of equilibration time on Al uptake in CSH. *Cement and Concrete Research*, 144, 106438.
- Bilge, T. (2011). Yüksek fırın cürufu katkısının kil zeminlerin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması [Yüksek lisans tezi]. Balıkesir Üniversitesi.
- Bilgen, G. (2011). Öğütülmüş çelikhane cürufu, kireç ve deniz suyunun killerin iyileştirilmesinde kullanımı.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S. T., & Çapar, Ö. F. (2010, 18-20 Ekim). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi, 2. *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi*, 1, 506-513, Mersin, Türkiye
- Brandon, D., ve Kaplan, W. D. (2013). *Microstructural characterization of materials*. John Wiley & Sons.
- Chuewangkam, N., Kidkhunthod, P., & Pinitsoontorn, S. (2024). Direct evidence for the mechanism of early-stage geopolymerization process. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03539.
- Coduto, D. P., Yeung, M. C. R., & Kitch, W. A. (2011), *Geotechnical Engineering: Principles & Practices: Principles and Practices*, Pearson.
- Cömert A. T., Ural N. (2015, 26-27, Kasım), Effect of marble dust on properties and CBR of clay soil, 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye
- Çimen, Ö., Günaydın, H. İ., & Keskin, S. N. (2017). Yüksek plastisiteli kil zeminin mühendislik özelliklerine inşaat atıklarının etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 250-253.

- Davidovits, J. (1994, October). Properties of geopolymer cements. *In First international conference on alkaline cements and concretes*, 1, 131-149
- Dener, M., Karatas, M., Shi, J., & Mohabbi, M. (2025). Mechanical properties and microstructure of hybrid alkali-activated cement component. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(1), 1-12.
- Duyu, H., Tania, T., & Dhake, M. (2015). Study on the effect of ground granulated blast furnace slag on the properties of black cotton soil and red soil. *International Journal of Science and Research*, 6(5), 418-422.
- Eskisar, T., ve Aksu, G. (2020). Zeminlerde tek fazlı geopolimerizasyon uygulaması ve geopolimerizasyonun serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 466-478.
- Gan, C., Hu, H., Meng, Z., Zhu, X., Gu, R., Wu, Z., Wang, H., Wang, D., Gan, H., Wang, J., & Dou, G. (2019). Characterization and hemostatic potential of two kaolins from southern China. *Molecules*, 24(17), 3160.
- Gavali, H. R., Bras, A., Faria, P., & Ralegaonkar, R. V. (2019). Development of sustainable alkali-activated bricks using industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 215, 180-191.
- Gebbru, K. A., Kidanemariam, T. G., & Gebretinsae, H. K. (2021). Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review. *Chemical Engineering Science*, 238, 116610.
- Genç, S. (2009). Şişen zeminler ve bentonit-kaolin karışımlarının şişme özellikleri. [Yüksek lisans tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Ghadir, P., ve Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and building materials*, 188, 361-371.
- Ghith, A. A., Hashem, F. S., & Ghobashy, M. M. (2024). Polymer-based soil stabilization for reduction of particulate matter emissions in Egypt: a comparative analysis of acrylate polymer. *Journal of Environmental Science*, 53(12), 3254-3276.
- Guo, X., Shi, H., & Xia, M. (2016). Effect of different calcium resources on reaction mechanism of geopolymer. *Chinese Journal of Materials Research*, 30(5), 348-354.
- Gutiérrez-Orrego, D. A., Gómez-Botero, M. A., & García, E. F. (2023). Alkali-activated hybrid cement from mineral wool fiber waste and OPC. *Buildings*, 13(2), 354.
- Haeri, S. M., ve Valishzadeh, A. (2021). Evaluation of using different nanomaterials to stabilize the collapsible loessial soil. *International Journal of Civil Engineering*, 19(5), 583-594.
- Haq, M. Z. U., Sood, H., Kumar, R., & Ricciotti, L. (2024). Sustainable geopolymers from polyethylene terephthalate waste and industrial by-products: a comprehensive characterisation and performance predictions. *Journal of Materials Science*, 59(9), 3858-3889.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. McGraw-Hill.

- Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305, 124685.
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Faridmehr, I., & Baghban, M. H. (2021). Performance of Epoxy Resin Polymer as Self-Healing Cementitious Materials Agent in Mortar. *Materials*, 14(5), 1255. <https://doi.org/10.3390/ma14051255>
- Jamil, N. H., Abdullah, M. M. A. B., Pa, F. C., Mohamad, H., Ibrahim, W. M. A. W., & Chaiprapa, J. (2020). Influences of SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 14922-14932.
- Jeremiah, J. J., Abbey, S. J., Booth, C. A., & Kashyap, A. (2023). Behaviour and microstructural characteristics of Lime-GGBS-Treated kaolin clay contaminated with gypsum. *Materials*, 16(2), 874.
- Joudah, Z. H., ve Abdul Kareem, B. (2024). Engineering Properties of Modified Rubberized Concretes: Role of Metakaolin and Ground Blast Furnace Slag as Ordinary Portland Cement Replacements. *Eng*, 5(3), 2067-2091. <https://doi.org/10.3390/eng5030110>
- Jung, H., Jeong, S., Park, Y., Shin, Y., & Jeong, H. (2023). X-ray diffraction analysis of damaged layer during polishing of silicon carbide. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(1), 25-32.
- Kakooei, H., Gholami, A., Ghasemkhani, M., Hosseini, M., Panahi, D., & Pouryaghoub, G. (2012). Dust exposure and respiratory health effects in cement production. *Acta Medica Iranica*, 122-126.
- Kalay, E. (2010). Sıkıştırılmış yüksek plastisiteli kil zemin stabilizasyonunda pomza, mermer tozu ve kirecin kullanılması [Doktora tezi] Süleyman Demirel Üniversitesi
- Kaya, M., İlkentapar, S., Durak, U., Atabey, İ. İ., & Çelikten, S. (2024). Physical mechanical and microstructural properties of kaolin-based fly ash-added geopolymer mortars. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(5), 3559-3572.
- Kencanawati, N. N., Anshari, B., Paedullah, A. G., & Shigeishi, M. (2018). The study of ultrasonic pulse velocity on plain and reinforced damaged concrete. In *MATEC Web of Conferences*, 195, 02026.
- Kgabi, D. P., ve Ambushe, A. A. (2023). Characterization of South African bentonite and kaolin clays. *Sustainability*, 15(17), 12679.
- Khale, D., ve Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, 42(3), 729-746.
- Khasib, I. A., Daud, N. N. N., & Nasir, N. A. M. (2021). Strength development and microstructural behavior of soils stabilized with palm oil fuel ash (POFA)-based geopolymer, *Applied Sciences*, 11(8), 3572.
- Kim, Y. S., Dang, M. Q., & Do, T. M. (2016). Studies on compressive strength of sand stabilized by alkali-activated ground bottom ash and cured at the ambient conditions. *International Journal of Geo-Engineering*, 7, 1-8.

- Kizirgil, M. E. (2001). Sivas Demir-Çelik Fabrikası cürufunun yol stabilizasyonunda kullanılmasının araştırılması [Yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi.
- Kocabıyık, L., (2010), Yüksek Fırın Cürufu Mineral Katkısının Betondaki Etkinlik Katsayının Belirlenmesi ve Betonun Kırılma Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi, [Yüksek lisans tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kolymbas, D., & Fellin, W. (Eds.). (2000). *Compaction of Soils, Granulates and Powders*. AA Balkema.
- Kök, O. E., Özdemir, A., Yasin E., Yıldırar, P., Şahinoğlu A. (2023). Kil Mineralleri ve Kolloidal Süspansiyonlar. Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar (1. Cilt, 7. Bölüm, ss. 115-139), Platanus Publishing.
- Kumar, A., ve Lingfa, P. (2020). Sodium bentonite and kaolin clays: Comparative study on their FT-IR, XRF, and XRD. *Materials Today: Proceedings*, 22, 737-742.
- Kumari, N., ve Mohan, C. (2021). Basics of clay minerals and their characteristic properties. *Clay Clay Miner*, 24(1), 1-29.
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Abd Majid, M. Z., Tahir, M. M., & Mohamad, E. T. (2017). Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016204.
- Lee, E. G., Seto, J. Y., Hirao, T., Bernath, P. F., & Le Roy, R. J. (1999). FTIR emission spectra, molecular constants, and potential curve of ground state GeO. *Journal of molecular spectroscopy*, 194(2), 197-202.
- Li, Z., Gao, M., Lei, Z., Tong, L., Sun, J., Wang, Y., Wang, X., & Jiang, X. (2023). Ternary cementless composite based on red mud, ultra-fine fly ash, and GGBS: Synergistic utilization and geopolymerization mechanism. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02410.
- Liew, Y. M., Kamarudin, H., Al Bakri, A. M., Luqman, M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C. M., & Heah, C. Y. (2012). Processing and characterization of calcined kaolin cement powder. *Construction and Building Materials*, 30, 794-802.
- Liu, Z., El-Tawil, S., Hansen, W., & Wang, F. (2018). Effect of slag cement on the properties of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 830-837.
- Ma, C., Chen, B., & Chen, L. (2018). Experimental feasibility research on a high-efficiency cement-based clay stabilizer. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 62-72.
- Ma, C., Qin, Z., Zhuang, Y., Chen, L., & Chen, B. (2015). Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay. *Soils and Foundations*, 55(5), 1222-1232.
- Majeed, Z. H., ve Taha, M. R. (2013). A review of stabilization of soils by using nanomaterials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2), 576-581.
- Malhotra, V. M., ve Carino, N. J. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC press.

- Manjula, R., Praveena, R., Clevin, R. R., Ghattargi, C. H., Dorle, A. S., & Lalitha, D. H. (2013). Effects of occupational dust exposure on the health status of portland cement factory workers. *International Journal of Medicine & Public Health*, 3(3).
- Mariani, M. (2010). Ukrainian clays for ceramics. *Handbook of Ceramic Raw Materials, Italian Ceramic Society*, 81-83.
- Meroufel, B., Benali, O., Benyahia, M., Zenasni, M. A., Merlin, A., & George, B. (2013). Removal of Zn (II) from aqueous solution onto kaolin by batch design. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(07), 669.
- Mishra, J., Nanda, B., Patro, S. K., & Krishna, R. S. (2022). Sustainable Fly Ash Based Geopolymer Binders: A Review on Compressive Strength and Microstructure Properties. *Sustainability*, 14(22), 15062. <https://doi.org/10.3390/su142215062>
- Mohamed, O. A., Al Khattab, R., & Al Hawat, W. (2022). Effect of relative GGBS/fly contents and alkaline solution concentration on compressive strength development of geopolymer mortars subjected to sulfuric acid. *Scientific Reports*, 12(1), 5634.
- Mohammed, A., Rafiq, S., Mahmood, W., Al-Darkazalir, H., Noaman, R., Qadir, W., & Ghafor, K. (2021). Artificial Neural Network and NLR techniques to predict the rheological properties and compression strength of cement past modified with nanoclay. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1313-1328.
- Murray, H. H. (2006). Geology and location of major industrial clay deposits. *Developments in clay science*, 2, 33-65.
- Nagajothi, S., ve Elavenil, S. (2021). Effect of GGBS addition on reactivity and microstructure properties of ambient cured fly ash based geopolymer concrete. *Silicon*, 13(2), 507-516.
- Naik, T. R., Malhotra, V. M., & Popovics, J. S. (2003). The ultrasonic pulse velocity method. In *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Second Edition*. CRC Press.
- Nickolov, Z. S., Ozcan, O., & Miller, J. D. (2003). FTIR analysis of water structure and its significance in the flotation of sodium carbonate and sodium bicarbonate salts. *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 224(1-3), 231-239.
- Nour, A. H., Modather, R. H., Yunus, R. M., Elnour, A. A., & Ismail, N. A. (2024). Characterization of bioactive compounds in patchouli oil using microwave-assisted and traditional hydrodistillation methods. *Industrial Crops and Products*, 208, 117901.
- Ojeda, J. J., ve Dittrich, M. (2012). Fourier transform infrared spectroscopy for molecular analysis of microbial cells. *Microbial systems biology: methods and protocols*, 187-211.
- Oya-Monzón, M., Eliche-Quesada, D., & La Rubia, M. D. (2024). Effect of the Incorporation of Olive Tree Pruning Sawdust in the Production of Lightweight Mortars. *Journal of Composites Science*, 8(5), 188. <https://doi.org/10.3390/jcs8050188>
- Önalp, A. (1997). *Geoteknik bilgisi I: zeminler ve mekaniği*. Sakarya Üniversitesi.

- Önalp, A., ve Arel, E. (2018). *Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği Çözümlü ve Problemlerle* (5. Baskı). Birsen Yayınevi
- Özaydın, K., (2000). *Zemin Mekaniği*. Birsen Yayınevi.
- Özdemir, A., ve Özdemir, M. (2006). Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ve son yıllarda yaygın olarak uygulanan bazı zemin iyileştirme yöntemleri. *Sondaj Dünyası Dergisi*, 3, 34-38.
- Öztürk, Y. Z. (2009). Gölbaşı (Ankara) yerleşim alanı killerin şişme potansiyelinin belirlenmesi ve kireç ile iyileştirme. [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., Jamshidi, M., & Ding, Y. (2012). Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue?. *Construction and Building Materials*, 30, 400-405.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314.
- Padmakumar, C., Parvathi, K., Jayasree, P. K., & Peter, L. (2017, 14-16, December). Effect of Curing Periods on Strength Development of Geopolymerized Kaolinite Clay, *Indian Geotechnical Conference, IGC 2017*, IIT Guwahati, Assam, India.
- Pal, S. C., Mukherjee, A., Pathak, S. R. (2003). Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and concrete research*, 33(9), 1481-1486.
- Pathak, A. K., Pandey, V., Murari, K., & Singh, J. P. (2014). Soil stabilisation using ground granulated blast furnace slag. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4, 164-171.
- Peethamparan, S. (2006). Fundamental study of clay-cement kiln dust (CKD) interaction to determine the effectiveness of CKD as a potential clay soil stabilizer. [Doktora tezi]. Purdue University.
- Phoo-Ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., & Chindaprasirt, P. (2017). Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2202-2210.
- Piyathissa, S. D. S., Kahandage, P. D., Namgay, Zhang, H., Noguchi, R., & Ahamed, T. (2023). Introducing a Novel Rice Husk Combustion Technology for Maximizing Energy and Amorphous Silica Production Using a Prototype Hybrid Rice Husk Burner to Minimize Environmental Impacts and Health Risk. *Energies*, 16(3), 1120.
- Pourakbar, S., Maneshmoaveni, A., Moazami, D., Moretti, L., Yousefi, A., & Cristelo, N. (2024). Stabilization of clay soil using alkali-activated sewage sludge. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(5), 3213-3224.
- Rahier, H., Wullaert, B., & Van Mele, B. (2000). Influence of the degree of dehydroxylation of kaolinite on the properties of aluminosilicate glasses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 62, 417-427.

- Rauf, A. U., Mallongi, A., & Astuti, R. D. P. (2020). Heavy metal contributions on human skin disease near cement plant: a systematic review. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 8(F), 117-122.
- Rawat, R., ve Pasla, D. (2024). Mix design of FA-GGBS based lightweight geopolymer concrete incorporating sintered fly ash aggregate as coarse aggregate. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(8), 1164-1179.
- Regourd, M. (1986). Slags and slag cements. Cement replacement materials, In: R.N. Swamy, Editor, *Slags and Slag Cement, Concrete Technology and Design* vol. 3, 73-79, Surrey University Press.
- Rezaeimalek, S., Huang, J., & Bin-Shafique, S. (2017). Performance evaluation for polymer-stabilized soils. *Transportation Research Record*, 2657(1), 58-66.
- Richhariya, G., Dora, D. T. K., Parmar, K. R., Pant, K. K., Singhal, N., Lal, K., & Kundu, P. P. (2020). Development of self-healing cement slurry through the incorporation of dual-encapsulated polyacrylamide for the prevention of water ingress in oil well. *Materials*, 13(13), 2921.
- Sagnak, M. (2018). Stabilization of bentonite and kaolinite clays using recycled gypsum and liquid sodium silicate. [Doktora tezi]. University of Delaware.
- Sayyed, M. I., Almuqrin, A. H., Elsafi, M., Rilwan, U. (2024). Evaluation of incorporation of granite waste and SnO_2 -NPs into coating mortar for gamma-ray shielding. *Radiation physics and chemistry*, 222, 111818.
- Schuhmacher, M., Domingo, J. L., & Garreta, J. (2004). Pollutants emitted by a cement plant: health risks for the population living in the neighborhood. *Environmental research*, 95(2), 198-206.
- Shi, C., ve Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resources, conservation and recycling*, 29(3), 195-207.
- Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2003). *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press.
- Singhi, B., Laskar, A. I., & Ahmed, M. A. (2016). Investigation on soil-geopolymer with slag, fly ash and their blending. *Arabian Journal for science and engineering*, 41, 393-400.
- Sinkhonde, D. (2023). Quantitative study on surface porosity and roughness parameters of mineral and organic admixtures based on multi-scale characterisation techniques. *Cleaner materials*, 7, 100166.
- Subroto, E., Jeanette, G., Meiyanasari, Y., Luwinsky, I., & Baraddiaz, S. (2020). Review on the analysis methods of starch, amylose, amylopectinin food and agricultural products. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(7), 3519-3524
- Suresh, D., ve Nagaraju, K. (2015). Ground granulated blast slag (GGBS) in concrete—a review. *IOSR journal of mechanical and civil engineering*, 12(4), 76-82.
- Thai, T. D., Huynh, N. M., Kieu, D. T. K., Nguyen, V. U. N., Do, Q. M. (2025) Evaluation of Compressive Strength of Uncalcined Dredged Sediment and Fly Ash-based Geopolymer Using Response Surface Method, *International Journal of Engineering, IJE TRANSACTIONS C: Aspects*. 38(3), 670-679

- Tokuy M., ve Erdoğan K., (2003), *Cürüflar ve Cürüflu Çimentolar*, TÇMB/AR-GE, Ankara,
- Totıç, E., Göktepe, F., & Yaşar, M. (2019). Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 769-778.
- Tumluer, G. (2006). Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti. [Yüksek lisans tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Tunç A. (2002) *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Dağıtım
- Turan, F. (2015), Killi Zeminlerin Yük Altında Oturmalarının Nümerik Analizi, [Uzmanlık tezi], İller Bankası Anonim Şirketi.
- Turner, L. K., ve Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and building materials*, 43, 125-130.
- Valencia-Saavedra, W., Robayo-Salazar, R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2021). Alkali-activated hybrid cements based on fly ash and construction and demolition wastes using sodium sulfate and sodium carbonate. *Molecules*, 26(24), 7572.
- Vargas, a. P. (2010). Biofunctional microstructured silica coating on dental materials [Doktora tezi]. Universidade do Porto.
- Vural, İ. (2019). İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1-6.
- Wang, H., Liu, T., Yan, C., & Wang, J. (2023). Expansive soil stabilization using alkali-activated fly ash. *Processes*, 11(5), 1550.
- Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in cement research*, 7(27), 93-102.
- Warren, B. E. (1990). *X-ray Diffraction*. Courier Corporation.
- Wong, L. S. (2022). Durability performance of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, 14(5), 868.
- Xing, G., Zhang, L., Xuan, W., Pan, Y., Zhao, Y., & Zhang, B. (2021). Influence of alkaline activators on unconfined compressive strength of saline soils stabilised with ground granulated blast furnace slags. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 8893106.
- Xu, B., ve Yi, Y. (2019). Soft clay stabilization using ladle slag-ground granulated blastfurnace slag blend. *Applied Clay Science*, 178, 105136.
- Yaghmaeiyan, N., Mirzaei, M., & Delghavi, R. (2025). Introduction of kaolin clay and its application as a heterogeneous catalyst in organic syntheses: a review. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 22, 667-682.
- Yavaşcan, S. (2010). İnce daneli zeminlerin endüstriyel atık maddeleri ile iyileştirme potansiyelinin araştırılması [Yüksek Lisans Tezi] Niğde Üniversitesi
- Yıldırım, E., Bol, E., Avcı, E., Özocak, A. (2024). Stabilization of Clayey Soil with Alkali-activated Hybrid Slag/Cement. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(1), 260-273.

- Yıldırım, S. (2002). Zemin incelemesi ve temel tasarımı. Birsen yayınevi.
- Yi, Y., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2014). Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 267-274.
- Yorucu, H., Özkan, O. T., Özen, S., Mısırlı, Z., Onurlu, S. (1986). *Malzeme Biliminde Tarama Elektron Mikroskobu Uygulamasına Giriş*, TÜBİTAK Gebze Araştırma Merkezi, Marmara Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Merkezi.
- Zanelli, C., Iglesias, C., Domínguez, E., Gardini, D., Raimondo, M., Guarini, G., & Dondi, M. (2015). Mineralogical composition and particle size distribution as a key to understand the technological properties of Ukrainian ball clays. *Applied Clay Science*, 108, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.005>
- Zhang, M., Guo, H., El-Korchi, T., Zhang, G., & Tao, M. (2013). Experimental feasibility study of geopolymers as the next-generation soil stabilizer. *Construction and building materials*, 47, 1468-1478.
- Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2020). Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders-A review. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120896.
- Zorluer, I., Usta, M., (2003, 18-19, Aralık), Zeminlerin atık mermer tozu ile iyileştirilmesi, *Türkiye IV Mermer Sempozyumu*, MERSEM, Afyon, Türkiye.
- Zumrawi, M. M. E., & Mohammed, A. E. (2019). Effects of poly vinyl acetate on characteristics of expansive soil. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 6(2), 167-176.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Eray YILDIRIM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1998, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2005, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği
- **Doktora** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2002-2016 yılları arasında Sakarya Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.
- 2016 yılından bu yana Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Yıldırım, E., Bol, E., Avcı, E., & Özocak, A. (2024). Stabilization of Clayey Soil with Alkali-activated Hybrid Slag/Cement, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(1), 260-273.