

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OLİVİN VE POTASYUM HİDROKSİT (KOH) KATKISININ İNCE
DANELİ BİR ZEMİNİN DAYANIMINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Abdelmaoula MAHAMOUD TAHİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

HAZİRAN 2024

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OLİVİN VE POTASYUM HİDROKSİT (KOH) KATKISININ İNCE
DANELİ BİR ZEMİNİN DAYANIMINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Abdelmaoula MAHAMOUD TAHİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sedat SERT

HAZİRAN 2024

Abdelmaoula MAHAMOUD TAHIR tarafından hazırlanan “Olivin ve potasyum hidroksit (KOH) katkısının ince daneli bir zeminin dayanımına etkisinin incelenmesi.” adlı tez çalışması 28.06.2024 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. Sedat SERT** (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ertan BOL**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK**
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 “OLİVİN VE POTASYUM HİDROKSİT (KOH) KATKISININ İNCE DANELİ BİR ZEMİNİN DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” 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.

28/06/2024

Abdelmaoula MAHAMOUD TAHİR



TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim sırasında, yakından veya uzaktan tezimin tamamlamasına yardımcı olan herkese derin minnettarlığımı ve takdirlerimi içtenlikle ifade etmek isterim. Bu çalışma, onların bilgileri, deneyimleri, ilgileri ve destekleri sayesinde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, doktora öğrenimim boyunca, danışmanım olmayı kabul eden, sürekli destek olan, tez çalışmalarım sırasında bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan ve bu tezin bitirilmesinde büyük rol oynayan değerli danışmanım Prof. Dr. Sedat SERT'e içten şükranlarımı sunmak isterim. Tez çalışması sırasında yönlendirmelerde bulunan Prof. Dr. Ertan BOL, Doç. Dr. İsa VURAL ve Doç. Dr. Ahmet Turgut BİLGİÇLİ'ye, doktora öğrenimim ve tez çalışmam boyunca tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a, bunun yanında sürekli istişarelerde bulunduğum Dr. Öğr. Üy. Mustafa ÖZSAĞIR, Arş. Gör. Eylem ARSLAN ve Arş. Gör. Kadir KOCAMAN'a, deneysel çalışmalarımda destek veren Tekniker Recep EYÜPLER ve Tekniker Sebahattin İŞ'e teşekkürlerimi belirtmek isterim.

Tüm bu yıllar boyunca bana verdiği motivasyon ve her şeyden önce sabrı için sevgili eşime en içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Son olarak, eğitim öğretim hayatım boyunca her zaman maddi ve manevi destek olan tüm aileme ve özellikle sevgili ağabeylerime şükranlarımı sunmak isterim.

Abdelmaoula MAHAMOUD TAHIR



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
2.1. Çeşitli Katkı Malzemeleri ile Zemin İyileştirilmesi Örnekleri	5
2.2. Olivin ile Zemin İyileştirilmesi	9
3. OLİVİN VE POTASYUM HİDROKSİT(KOH)	15
3.1. Olivin.....	15
3.1.1. Olivinin tanımı ve sınıflandırılması	15
3.1.2. Kimyasal özellikleri	15
3.1.3. Dünyada olivin kaynakları	18
3.1.4. Tüketim	18
3.2. Potasyum Hidroksit (KOH).....	19
4. KAYMA DİRENCİ.....	21
4.1. Giriş	21
4.2. Mohr-Coulomb Yenilme Kriteri	22
4.3. Göçme Durumu ve Mohr Çemberleri	23
4.4. Drenajsız ve Drenajlı Kayma Direnci	23
4.5. Kayma Direncinin Belirlenmesi	25
4.5.1. Laboratuvar deneyleri	25
4.5.1.1. Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (UU)...	25
4.5.1.2. Serbest basma deneyi (UCS).....	26
4.5.1.3. Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (CU)	27
4.5.1.4. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi (CD)	27
4.5.1.5. Göçme modları ve yenilme aşamaları	28
4.5.2. Arazi deneyleri	29
5. KİLLİ ZEMİNLER VE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ	31
5.1. Killi Zeminler	31
5.2. Zeminlerin İyileştirilmesi	34
5.2.1. Zemin iyileştirilmesinin amaçları	35
5.2.2. Zemin iyileştirme yöntemleri.....	36
Sıkıştırma ile iyileştirme	36
Katkı maddeleri ile iyileştirme.....	36
Zemin derinliğine göre iyileştirme.....	36
5.2.2.3.1. Yüzeysel iyileştirme.....	37

5.2.2.3.2. Derin iyileştirme.....	37
Dane boyutlarına göre zemin iyileştirme	37
6. MALZEMELER VE YÖNTEM.....	39
6.1. Malzemeler	39
6.1.1. Doğal zemin	39
6.1.2. Olivin.....	39
6.1.3. Kum.....	41
6.1.4. Potasyum hidroksit	41
6.2. Yöntem	42
6.3. Çalışmanın Varsayımları	43
6.4. Deneyler	44
6.4.1. Sınıflandırma deneyleri	44
6.4.1.1. Likit limit ve plastik limit deneyleri.....	44
6.4.1.2. Elek, hidrometre ve piknometre deneyleri	46
6.4.2. Kompaksiyon deneyi.....	47
6.4.3. Karışımların bileşimi ve numunelerin hazırlanması	51
6.4.4. Üç eksenli hücre kesme deneyi (UU).....	53
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	57
7.1. Birinci Aşama.....	57
7.1.1. Deviatör gerilmeler ve şekil değiştirmelerin değerlendirilmesi	57
7.1.2. Kayma direnci parametrelerinin değerlendirilmesi.....	70
7.1.3. FE-SEM analizi	76
7.2. İkinci Aşama.....	77
7.3. Üçüncü Aşama.....	86
7.4. Dördüncü Aşama (Karşılaştırma).....	90
7.5. XRD Analizi	96
8. SONUÇ.....	101
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	111

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
CD	: Konsolidasyonlu drenajlı
CI	: Plastisite indisi
CL	: Düşük plastisiteli kil
CU	: Konsolidasyonlu drenajsız
EDS	: Enerji dispersiv spektrum analizi
FC	: İnce dane oranı
GGBS	: Öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu
KOH	: Potasyum Hidroksit
LL	: Likit limit
MDD	: Maksimum kuru yoğunluk
NS	: Doğal zemin
NS-KOH	: Doğal zemin ve KOH karışımı
OL	: Olivin
OWC	: Optimum su muhtevası
PI	: Plastik indisi
PL	: Plastik limit
SA	: Kum
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
S-OL	: Doğal zemin ve olivin karışımı
S-OL-KOH	: Doğal zemin, olivin ve KOH karışımı
S-SA	: Doğal zemin ve kum karışımı
S-SA-KOH	: Doğal zemin, kum ve KOH karışımı
TS	: Türk standardı
UCS	: Serbest basma dayanımı
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız
XRD	: X-Işını difraksiyon analizi



SİMGELER

γ_n	: Yaş birim hacim ağırlığı
$\gamma_{k,maks}$	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
w	: Su muhtevası
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
e	: Boşluk oranı
n	: Porozite
S_r	: Doygunluk derecesi
M_w	: Zeminin içindeki su kütlesi
M_s	: Danelerin kütlesi
G_s	: Zemin dane özgül ağırlığı
E	: Sıkıştırma enerjisi
σ	: Normal toplam gerilme
τ	: Kayma direnci
τ_f	: Maksimum kayma direnci
σ_1	: Büyük asal gerilme
σ_3	: Küçük asal gerilme veya çevre basıncı
σ_{dev}	: Deviator gerilme
c_u	: Drenajsız kohezyon
ϕ_u	: Drenajsız durumda içsel sürtünme açısı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Olivin kimyasal özellikleri (Anon, 1995; Kanarya, 2010).....	16
Tablo 3.2. Olivinin kimyasal özellikleri ve dane dağılımı (Renforth ve ark, 2015)..	16
Tablo 3.3. Olivin kimyasal özellikleri (Fasihnikoutalab ve ark, 2016).....	17
Tablo 3.4. Olivinin kimyasal özellikleri (Emmanuel ve ark, 2019).....	17
Tablo 3.5. EDX analizi, olivinin kimyasal özellikleri (Emmanuel ve ark, 2019)..	18
Tablo 4.1. Üç eksenli deneyi konsolidasyon ve drenaj koşulları.	28
Tablo 5.1. Bazı kil mTablo 6. 1inerallerinin ağırlığa göre kimyasal bileşimi (Bostancı, 2020).	33
Tablo 6.1. Kil zeminin fiziksel özellikleri.....	40
Tablo 6.2. Doğal zemin, olivin ve kumun kimyasal (EDS analizi) ve fiziksel özellikleri.....	40
Tablo 6.3. Numunelerin karışım oranları.	43
Tablo 6.4. Kompaksiyon deneyi verileri.....	50
Tablo 7.1. Doğal zemin ve olivin katkılı numunelerde maksimum deviatör gerilmeler.	58
Tablo 7.2. Olivinli numunelerin maks. deviatör gerilme artış oranı (%) ve kayma direnci parametreleri.	59
Tablo 7.3. Doğal numunelerde ve 56 günlük numunelerde kırılma modları.	75
Tablo 7.4. Kumlu numunelerin Maks. deviatör gerilmeler (kPa).	78
Tablo 7.5. Kumlu numunelerin Maks. deviatör gerilmeler artış oranı ve kayma direnci parametreleri.	78
Tablo 7.6. NS-KOH numunelerinde maksimum deviatör gerilmeler (kPa).....	89
Tablo 7.7. NS-KOH numunelerinde maksimum deviatör gerilme artış oranları ve kayma direnci parametreleri.....	89
Tablo 7.8. Maksimum deviatör gerilmeler ve kırılma anında deformasyonlar	90
Tablo 7.9. Numunelerin fiziksel özellikleri.....	95
Tablo 7.10. Maksimum deviatör gerilme artışı ve kayma mukavemeti parametreleri.	95
Tablo 7.11. XRD analiz sonuçları (malzemeler).....	97
Tablo 7.12. XRD analiz sonuçları (karışım numuneleri).	99



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1. Mohr-Coulomb kırılma zarfı denklemi.	22
Şekil 4.2. Mohr-Coulomb yenilme kriteri.	23
Şekil 4.3. Toplam ve efektif gerilmeler türünden yenilme zarfları.....	24
Şekil 4.4. UU doygun zeminde Mohr daireleri ve yenilme zarfı.....	26
Şekil 4.5. UCS deneyi Mohr dairesi ve yenilme zarfı.	27
Şekil 4.6. CU deneyi toplam ve efektif Mohr yenilme zarfları.	27
Şekil 4.7. CD deneyi yenilme zarfları.....	28
Şekil 4.8. Zemin yenilme aşamaları (Driss ve ark, 2023).....	29
Şekil 4.9. Zemin göçme modları (Driss ve ark, 2023).....	29
Şekil 5.1. Çeşitli parçacık morfolojisine sahip bazı kil minerallerinin transmisyon elektron mikrografları görüntüleri (Bergaya ve Lagaly, 2006).....	31
Şekil 5.2. (a) Silika Tetrahedron yapısı, (b) Alüminyum Oktahedron yapısı (Özdemir ve ark., 2023).....	33
Şekil 5.3. Casagrande plastisite kartında kil mineralleri bölgeleri (Okkels, 2019). ..	34
Şekil 5.4. Zeminlerin dane boyutlarına göre iyileştirme yöntemleri (Mitchell, 1981).38	
Şekil 6.1. Elek sonrası malzemelerin SEM görüntüsü, (a) olivin, (b) kum.	41
Şekil 6.2. Malzemeler, (a) zemin, (b) olivin, (c) potasyum hidroksit (KOH), (d) Kum.	42
Şekil 6.3. Likit limit tayini, (a) Casagrande yöntemi, (b) Düşen koni yöntemi.	45
Şekil 6.4. Kıvam limiti deneyleri, (a) Plastik limit, (b) Casagrande likit limit, (c) Düşen koni likit limit.....	46
Şekil 6.5. Plastisite kartında zemin bölgesi gösterimi.	46
Şekil 6.6. Numune üzerinde deneyler: (a) Elek analizi, (b) Hidrometre deneyi, (c) Piknometre deneyi.....	47
Şekil 6.7. Doğal zemin, olivin ve kumun dane boyutu dağılım eğrileri.	47
Şekil 6.8. Doğal zemin kompaksiyon eğrisi.	49
Şekil 6.9. Olivin katkısının kompaksiyona etkisi.	49
Şekil 6.10. Kum katkısının kompaksiyona etkisi.	49
Şekil 6.11. Harvard minyatür kompaksiyon aleti: (a) Parçalar, (b) Sıkıştırılmış numune tartımı, (c) Su muhtevası numunesi alınması.	51
Şekil 6.12. Özel kalıpla numune sıkıştırılması.	52
Şekil 6.13. Eşdeğer numune ağırlıkları (a) 153,398 g, (b) 153,053 g, (c) 153,257 g, (d) 153,544 g.....	52
Şekil 6.14. Numunelerin hazırlama prosedürü: (a) Numunenin olivinle karışımı, (b) Potasyum hidroksit çözeltisinin hazırlanması, (c) Elektrikli karıştırıcı ile karıştırma, (d) Numunenin hazırlanması (e) Numunelerin muhafaza edilmesi.	53
Şekil 6.15. UU deneyi; a) Test cihazı, b) Deney numunesi, c) Yenilme anı.	54
Şekil 6.16. Mohr-Coulomb yenilme kriterinden kayma direnci parametreleri elde edilmesi.	55

Şekil 6.17. UU deneyi yapılan tüm numunelerin toplu görüntüsü.....	56
Şekil 7.1. Doğal zeminde gerilme-deformasyon eğrileri.	61
Şekil 7.2. Doğal zemin yenilme zarfları.	62
Şekil 7.3. %10 olivin ve %10 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	63
Şekil 7.4. %15 olivin ve %15 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	65
Şekil 7.5. %20 olivin ve %20 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	67
Şekil 7.6. %25 olivin ve %25 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	69
Şekil 7.7. %10 olivin katkısı için yenilme zarfları.....	71
Şekil 7.8. %15 olivin katkısı için yenilme zarfları.....	71
Şekil 7.9 %20 olivin katkısı için yenilme zarfları.....	72
Şekil 7.10. %25 olivin katkısı için yenilme zarfları.....	72
Şekil 7.11. %10 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.....	73
Şekil 7.12. %15 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.....	73
Şekil 7.13. %20 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.....	74
Şekil 7.14. %25 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.....	74
Şekil 7.15. SEM analizi sonuçları a) olivin, b) NS numunesi c) S-OL numunesi, d) S-OL-KOH numunesi.	77
Şekil 7.16. %10 kum ve %10 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	80
Şekil 7.17. %15 kum ve %15 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	82
Şekil 7.18. %20 kum ve %20 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	83
Şekil 7.19. %25 kum ve %25 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	84
Şekil 7.20. %10 kum katkısı için yenilme zarfları.....	85
Şekil 7. 21. %15 kum katkısı için yenilme zarfları.....	85
Şekil 7.22. %20 kum katkısı için yenilme zarfları.....	86
Şekil 7.23. %25 kum katkısı için yenilme zarfları.....	86
Şekil 7.24. Doğal zemin+KOH (NS+KOH) numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.	87
Şekil 7.25. Doğal zemin+KOH (NS+KOH) numunelerinde yenilme zarfları.....	89
Şekil 7.26. Yapılan mukayese numuneler (%25 olivin ve %25 kum).	90
Şekil 7.27. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde gerilme-deformasyon ilişkisi: (a), (c) olivin, (b), (d) kum.....	92
Şekil 7.28. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde gerilme-deformasyon ilişkisi: (e), (g) olivin, (b) kum.	92
Şekil 7.29. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde kırılma zarfları: (a), (c) olivin, (b), (d) kum.	94
Şekil 7.30. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde kırılma zarfları: (e), (g) olivin, (f), (h) kum.	94
Şekil 7.31. Farklı kür sürelerinde maksimum deviatör gerilmeler: (a) Olivin, (b) Kum.	96
Şekil 7.32. XRD analizi (a) NS, (b) olivin, (c) kum.	97
Şekil 7.33. XRD analizi: (a) S-OL-1, (b) S-SA-1, (c) S-OL-KOH-90, (d) S-SA-KOH-90.....	99

OLİVİN VE POTASYUM HİDROKSİT (KOH) KATKISININ İNCE DANELİ BİR ZEMİNİN DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Kayma direncinin düşük olduğu durumlarda, özellikle drenajsız koşullarda kil zeminlerin kayma direncinin arttırılması kentsel gelişim sorunlarının çözümü için önemlidir. Bu bağlamda, zemin iyileştirme yöntemi büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, olivin katkısının potasyum hidroksitin (KOH) hem yokluğunda hem de varlığında düşük plastisiteli killi zeminde kayma direncine etkisinin incelenmesidir. Çalışmada, olivinin KOH ile aktifleştirilmiş veya aktifleştirilmemiş durumlarda kil zeminde dayanım artışı sağlamasının ana nedenlerinin sorgulanması ve tartışılması amacıyla deneysel veriler elde edilmiştir. Drenajsız koşullarda kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi amacıyla, olivin doğal zemine farklı oranlarda (ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25) eklenerek numuneler hazırlanmış, farklı kür süreleri (1 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 gün) ve farklı çevre basınçları (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) altında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yapılmıştır.

İyileştirme etkisinin olivin danelerine özgü olup olmadığının anlaşılabilmesi için, potasyum hidroksitin (KOH) hem yokluğunda hem de varlığında deneyler yapılmıştır. Çalışma sonucunda, olivin katkısının tek başına zaman içerisinde kayma direncini artırdığı, ancak KOH ile aktive edildiğinde çok daha yüksek kayma direnci sağladığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca olivin daneleri ile kum daneleri arasında karşılaştırmalı bir çalışma da yürütülmüştür. Burada da, önceki deneylerde olduğu gibi, deneyler katkı oranları ve çevre basınçları sabit tutularak gerçekleştirilmiştir. Buna yönelik olarak numuneler sadece kum veya sadece olivin ile işlenmiş halde hazırlanmıştır. İki durumda da mukavemette bir artış gözlemlenmiş, ancak daha düşük özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle daha fazla hacim kaplayan kumun varlığından dolayı kum katkılı numunelerin mukavemeti olivin katkılı olanlardan daha yüksek elde edilmiştir. Öte yandan KOH varlığında her iki durumda da kayma direnci çok daha fazla artmış, bu durumda da kum katkılı numunelerin daha yüksek kayma direncine sahip olduğu bulunmuştur. KOH içeren durumlarda, olivin ve kumun ağırlıkça %25 olduğu durumda, 100 kPa çevre basıncı altında ve 90 günlük kür süresi dikkate alındığında, doğal zemine göre mukavemet artış oranı olivin için %399, kum için ise %613 olarak bulunmuştur. Artış oranları KOH bulunmayan durumlarda ise olivin ve kum için sırasıyla %141 ve %153 olmuştur.

Kimyasal reaksiyonun ardından kristal fazların oluşumunu analiz etmek için mineralojik analiz (XRD) yapılmıştır. Zamanla silikat (SiO_2) ve alüminatın (AlO_2) çözünmesi ve işlenmiş zeminlerin iyileştirilmesini sağlayan kristal fazların oluşması nedeniyle kayma mukavemetinin arttığı yorumlanmıştır. Olivin yerine kum kullanıldığında aynı ve bazen daha yüksek değerlerin elde edilmesi, soruların yanıtlanmasına olanak sağlamıştır. Dolayısıyla bu, alternatif bir katkı maddesinin

sağladığı iyileştirmenin daha ekonomik bir şekilde sağlanabileceği anlamına gelmektedir.

Buradan hareketle, KOH varlığında kazanılan görece aşırı mukavemetin olivin veya kuma özgü olup olmadığı sorusuna cevap bulabilmek için son olarak doğal zemine sadece KOH eklenerek önceki deneylerle aynı şartlarda deneyler tekrarlanmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında doğal zemine sadece KOH eklendiğinde, zaman içerisinde olivin ve KOH katkılı numunelerin gösterdikleri mukavemete yakın değerler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara istinaden, potasyum hidroksitin aktivatör olarak değil, stabilizatör olarak tanımlanmasının daha doğru olacağı kanısına varılmıştır.



INVESTIGATION OF THE EFFECT OF OLIVINE AND POTASSIUM HYDROXIDE (KOH) ADDITIVE ON THE STRENGTH OF A FINE-GRAINED SOIL

SUMMARY

Increasing the shear resistance of clay soils, especially under undrained conditions, is important for solving urban development problems. In this context, the soil improvement method is of great importance.

The aim of this study is to investigate the effect of olivine additive on the shear resistance of low plasticity clay soils in the absence and presence of potassium hydroxide (KOH). Experimental data are presented to question and discuss the main reasons why olivine, with or without KOH activated clay strength increase. It is of great importance to identify potential additives to increase the strength values in low plasticity clay soils. Such studies play an important role in the development of soil improvement techniques and the selection of materials used in engineering applications.

Within the scope of this experimental thesis study, a low plasticity clay soil brought from Kocaeli province was studied. Liquid limit, plastic limit and pycnometer tests were carried out on the part of the sample that passed through the No. 40 sieve. 4% of the sample consists of sand and 96% consists of fine-grained material. The sample with these properties was classified as low plasticity clay (CL) according to the unified soil classification system (ASTM D-4318). In this study, a three-stage experimental program was conducted to investigate the effects of various additives to increase the strength of low plasticity clay. Three different additives were used in the mixtures: olivine, sand and potassium hydroxide (KOH). By performing compaction experiments, the optimum water content and maximum dry unit weight of each natural clay and mixed blends were determined.

Compaction was primarily done using Proctor and Harvard miniature compaction methods. Since it was aimed to prepare the samples with equal properties, the results of samples prepared by both methods on natural and mixed soil samples were compared. As a result of the comparison, it was seen that Proctor compaction and Harvard miniature compaction tests gave almost the same results. From a practical point of view, the process of preparing all the samples was carried out using only the Harvard miniature compaction method. In the Harvard miniature compaction, to determine the optimum water content and maximum dry unit volume weight for each sample, a 600-gr sample was taken and mixed with different water ratios (5%, 10%, 15% and 20%) until it became homogeneous. By applying the same procedure for natural samples and additive mixtures, optimum water contents and maximum dry unit volume weights were determined.

Each mixture sample was compressed in a mold with a diameter of 3.5 cm and a height of 7 cm, taking into account the optimum water content and maximum dry unit volume

weight values of each mixture. Since a smaller mold than the Proctor standard was used, the number of strokes was reduced from 25 to 6 in order to keep the standard Proctor energy constant. KOH alkaline activator was dissolved in distilled water at a concentration of 10 molarity and allowed to cool before adding it to natural soil, olivine and sand mixtures. The mixtures were compressed by adding enough KOH solution to the activated samples to reach the optimum water content. Non-activated samples were compressed according to their natural water content. In order to avoid any change in the water content of the samples, the samples were kept in a plastic storage box during the curing period and were previously placed in two plastic bags. All samples were cured at ambient temperature throughout the curing period.

In the first stage, olivine grains were added to the natural soil at different rates (10%, 15%, 20% and 25%). To see the development of the shear resistance of the soil over time with the addition of olivine, an unconsolidated undrained triaxial cell shear test (UU) was carried out at the end of 1 day, 14 days, 28 days, 56 days and 90 days of curing periods. UU experiments were carried out under different cell pressures (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa and 400 kPa).

The results of these first stage experiments showed that olivine, when used alone, does not have a significant chemical effect that develops over time to strengthen the properties of clay soil. However, it has also been proven that olivine grains have a significant effect on increasing the mechanical properties of the soil. In this context, it has been shown that the olivine mineral affects the physical properties of the soil and the addition of olivine has the potential to increase mechanical properties. It was concluded that although chemical effects were not clearly observed, there was an improvement in mechanical properties. These findings support the evaluation of olivine mineral as a potential granular material in soil improvement applications.

The second stage was carried out based on the results of the first phase. Since it was observed that the mere addition of olivine did not have a clear chemical effect over time, it was decided to use potassium hydroxide (KOH) as an activator. At this stage, when olivine was added to the clayey soil together with potassium hydroxide, a significant strengthening effect was observed over time.

In the third stage, it was investigated whether the healing feature belonged only to olivine by using a sand with a grain distribution similar to olivine. In other words, it has been experimentally demonstrated whether the chemical reactions occurring with the use of KOH are specific to olivine. For this purpose, a comparison was made between olivine grains and sand grains, and the effects of olivine grains in this combination were examined. At the end of this stage, it was revealed that sand with granulometry and chemical composition similar to olivine could also provide successful improvement. In this context, KOH is considered to be the main factor of the improvement achieved in the second stage.

In the fourth stage, factors such as the effect of grains, the effect of the activator and the effect of time were taken into consideration. At this final stage, a study was conducted to observe the effect of potassium hydroxide (KOH) alone. At the same time, this stage revealed which of the three different additives (olivine, sand and KOH) was the key factor in this reinforcement.

As a result of the study, it was found that olivine alone was not sufficient over time, and when activated with KOH, it provided higher shear resistance. In order to see the effects of olivine grains, a comparative study was also carried out between olivine

grains and sand grains, both in the absence and presence of potassium hydroxide (KOH). Here, as in the previous experiments, the experiments were carried out keeping the additive ratios and cell pressures constants. When the samples were treated with sand or olivine only, an increase in strength was observed in both cases, but the strength of sand was higher than that of olivine due to the presence of a high volume of sand. On the other hand, in the presence of KOH, the shear strength increased in both cases, but that of the sand was also higher. Considering the same proportion of olivine and sand (25% by dry weight), 100 kPa cell pressure and 90 days curing time, the increase in strength compared to natural soil is 399% for olivine and 613% for sand. Mineralogical analysis (XRD) was performed to analyze the formation of crystalline phases following the chemical reaction. Over time, the shear strength increased due to the dissolution of silicate (SiO_2) and aluminate (AlO_2) and the formation of crystalline phases, which allowed to improve the treated soils. The fact that the same and sometimes higher values were obtained when sand was used instead of olivine allowed questions to be answered. Therefore, this means that the improvement provided by an alternative additive can be achieved more economically.

From this point of view, in order to answer whether the strength gained in the presence of KOH is specific to olivine or not, the experiments were repeated under the same conditions of the previous experiments with only KOH added to the natural soil. In the results of the experiments, in the sole presence of KOH, results close to the strength of olivine in the presence of KOH were observed over time. Based on these results, KOH is not defined as an activator, but as a stabilizer.



1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde en çok karşılaşılan problemlerden biri, inşaat yapılacak ortamda genellikle yapıdan aktarılan gerilmeleri yeterli güvenlikle taşıyamayan zayıf zeminlerin varlığıdır. Bununla birlikte, şehirlerin genişlemesiyle ve sorunsuz inşaat sahalarının yeterli olmaması nedeniyle, gevşek iri daneli ve yumuşak ince daneli zeminleri içeren sahaların değerlendirilmesine önemli bir ihtiyaç vardır. Yüksek su muhtevalarına sahip olabilen bu tip zeminlerin düşük kayma dirençleri (dolayısıyla düşük temel taşıma güçleri), yapı yükü altında aşırı oturma gösterebilecek olmaları ve yüksek sıvılaşma potansiyellerinin bulunması inşaat projeleri için çoğu zaman zorluklar yaratmaktadır. Çözüm olarak inşaat alanının değiştirilmesi, zeminlerin değiştirilmesi, zeminlerin iyileştirilmesi, zemin koşullarına göre temel tasarımının uygun hale getirilmesi veya derin temel sistemlerinin kullanılması farklı seçenekler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Maliyetlerin yüksek olması nedeniyle yer değiştirerek sağlam ortamlarda inşaat yapılması yerine mevcut zayıf zeminlerin iyileştirilmesi çok daha fazla oranlarda tercih edilmektedir. Kayma dayanımlarının düşük olduğu durumlarda temelin aktardığı yapısal yükler taşınamamakta ve yapıda ciddi hasarlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle zeminlerin teknik özelliklerini iyileştirmek ve yapı inşaatına uygun hale getirmek için farklı yöntemler denenmiştir. Zemin iyileştirmesi, zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan bir teknik olarak tanımlanmaktadır (Hejazi ve ark, 2012). Zeminlerin iyileştirilmesinde, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmek için teknik ve ekonomik şartlar yanında zaman da dikkate alınarak farklı yöntemler kullanılabilir. Kireç, çimento, uçucu kül, polimer, polipropilen fiber ve elyaf gibi çeşitli katkı maddelerinin farklı oranlarda kullanılmasıyla zemin iyileştirmesi yapmak bu yöntemlerden birine karşılık gelmektedir.

Zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için liflerin kullanılması, günümüzde geoteknik mühendisliği projelerinde yaygın bir uygulama haline gelmiştir. İnce daneli zeminleri güçlendirmek için doğal fiberlerin zemine gelişigüzel dağılımlı olarak

katılması, kayma direncinin arttırılmasında kullanılması giderek daha fazla rağbet gören bir yöntem olarak dikkat çekmektedir (Ndepete, 2017; Küçük, 2021).

Zemin iyileştirilmesinde, çimento, kireç ve uçucu kül gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerekli optimum koşulların sağlanması durumunda, bu malzemelerin uygulanması ile puzolanik reaksiyonlar sonucu çimentolaşma jellerinin oluşması ve böylece zemine ekstra direnç kazandırılması literatürün ana sonucu olarak ortaya çıkmıştır (Rao ve Rajasekaran, 1996; Singhi ve ark, 2016; Ghadir ve Ranjbar, 2018; Khazaei ve Moayedi, 2019). Çimento, birçok etkili özelliği nedeniyle günümüzde geoteknik alanında zemin iyileştirmesinde ana veya kısmi bağlayıcı olarak geniş kullanım alanına sahiptir. Çimento, katkı maddesi olarak uygun şekilde kullanıldığında kayma yenilmelerini engeller, oturmayı azaltır, kazı stabilitesine yardımcı olur ve sıvılaşmayı önler. Ancak tüm bu avantajları sağlamasına rağmen, çevresel açıdan ciddi bir sorun oluşturmaya devam etmektedir. Bu durum inşaat mühendislerinin ve çevrecilerin çimentonun yerini alabilecek, ancak zeminin iyileştirilmesine ilişkin verimliliği sağlayan ve çevreyi koruyan başka bağlayıcılar aramasına neden olmuştur. Bu kapsamda bulunan en önemli bağlayıcılardan biri olivindir (Fasihnikoutalab ve ark, 2015). Doğal olivin, yumuşak kilin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Bu nedenle zemini iyileştirerek temeller gibi yapıların stabilitesini sağlama ve hidrolik bariyer oluşturma gibi konularda hem stabilizatör olarak hem de çevresel anlamda olumlu katkılar ortaya koymuştur (Emmanuel ve ark, 2019).

Kil zeminlerin özellikle düşük kayma direnci sergiledikleri drenajsız durumlarda dayanımlarının arttırılması önemli bir çalışma konusudur. Bu tez çalışmasında, daha önceki çalışmalarda zeminlerde katkı malzemesi olarak az kullanılmış bir malzeme olan olivin ve potasyum hidroksit (KOH) katkısı ile kil zeminlerin kayma direncinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Farklı kür sürelerinde hazırlanan numunelerin kayma direnci konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli kesme deneyi (UU) ile belirlenmeye çalışılmıştır. Çeşitli çevre basınçlarındaki deneyler, sadece olivin katkılı numuneler ve olivini aktive etmek için potasyum hidroksit (KOH) kullanılan numuneler olmak üzere iki grupta yürütülmüştür. Çalışma sonucunda, olivin katkısının kayma direnci artışı konusunda tek başına yeterli olmadığı, potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edildiğinde daha yüksek kayma direnci sağladığı ortaya çıkmıştır. Sadece olivin ile işlenmiş kil numunelerin kayma direncinin zamanla artmadığı ve sadece kile göre daha

iri olan olivin danelerinin direnç artışına katkı yaptığı tespit edilmiştir. KOH ile aktive edilen numunelerde ise hem olivin daneleri hem de oluşan kimyasal bağlar direnç artışına katkı yapmıştır. Olivin danelerinin etkilerini bu kimyasal etkilerden ayırmak için mukayeseli bir çalışma da yürütülmüştür.

Önceki çalışmaların çıktılarını genişletmek ve sonuçların nedenselliğini tartışarak dayanımdaki artışı sağlayan ana nedeni ortaya çıkarmak amacıyla çok kapsamlı bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada ana sorulardan biri, olivin eklenen numunelerdeki mukavemet artışının kilden daha büyük dane boyutuna sahip herhangi bir malzemenin eklenmesinden kaynaklanıp kaynaklanmadığıdır. Buna yönelik olarak daha önce elde edilen bulgulara dayanarak ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %15, %20 ve %25) olivin içeren numunelerde farklı çevre basıncı (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) değerleri altında drenajsız konsolidasyonsuz üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) gerçekleştirilerek sonuçları tartışılmıştır. İkinci olarak olivine benzer dane dağılımına sahip bir kum üzerinde de aynı şartlar altında (ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25) aynı deneyler yapılmış ve kimyasal etkiye geçmeden mukavemetin gerçekten de dane boyutu etkisiyle mi arttığı sorgulanmıştır. Yani numuneye olivin yerine ağırlıkça aynı oranlarda ve benzer boyutlara sahip kum eklenerek deneyler tekrarlanmıştır. Karıştırılan numunelerin dayanımında, zaman içerisinde herhangi bir değişiklik olmadığı ve doğal zemine göre iki durumda da artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, olivinin kimyasal reaksiyonlarını hızlandırmak amacıyla bir önceki gruba ait numunelere (aynı oran ve boyutta kum ve olivinin ayrı ayrı karıştırıldığı numuneler) KOH çözeltisi ilave edilmiştir. Önceki çalışmalarda bu şekilde hazırlanmış numunelerde uzun süre boyunca kimyasal reaksiyonların gerçekleşeceği tespit edildiğinden 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde bekletilen numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Literatürde sonraki kısımlarda belirtileceği üzere KOH ile aktive edilmiş durum ile inaktive durumların sonuçlarını karşılaştıran çalışmalar bulunmaktadır. Burada cevaplanması gereken soru, KOH varlığında kazanılan mukavemetin olivine özgü olup olmadığıdır. Yani, olivin yerine KOH ile aktive edilmiş kum kullanılsaydı veya doğal zemine sadece KOH ilave edilseydi benzer sonuçlar elde edilebilir miydi? Bu amaçla, bu gruplara ait numuneler KOH ile hazırlanmış ve ilk grupla aynı koşullar altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin mineralojik yapısını araştırmak amacıyla XRD analizleri gerçekleştirilmiş ve değişimler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle

karşılaştırılmış ve sürdürülebilirlik açısından olivin malzemesinin dayanıma katkısının karakteristik olup olmadığı sorgulanmıştır. Bu anlamda, bu tez çalışması daha sonra bu malzeme ile yapılacak iyileştirme çalışmaları için bir yol gösterici olacaktır.

Bu çalışmadaki tüm geoteknik deneyler ve mikroskopik analizler sırasıyla Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik ve Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Karakterizasyon Laboratuvarlarında yapılmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Günümüzde inşaat mühendisliğinde problemlı zeminlere sürekli yeni çözümler aramaya devam edilmektedir. Özellikle geoteknik projelerinde en fazla karşılaşılan sorunlu zeminlerden bir tanesi killi zeminlerdir. Killi zeminlerde taşıma gücü düşük ve oturma potansiyeli yüksek olabilmekte, ayrıca su emme özelliği ve düşük geçirimliliğinden dolayı arazide çeşitli sorunlarla karşılaşılabilir. Bu sorunların çözümüne yönelik olarak sürekli çeşitli yöntemler araştırılmaktadır.

Kimyasal katkı maddelerinin kullanımı killi zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili çözümlerden bir tanesidir. Bu katkı maddeleri zeminlerin kimyasal özelliklerini kullanarak onları geoteknik açıdan olumlu yönde etkileyerek inşaat projelerinde risklerin en düşük seviyeye indirilmesine yardımcı olabilmektedir. Killi zeminleri iyileştirmek için kimyasal katkı maddeleri kullanmanın etkileri olumlu yönde etki göstermiş olan bazı çalışmalar ışığında aşağıda verilmiştir.

2.1. Çeşitli Katkı Malzemeleri ile Zemin İyileştirilmesi Örnekleri

Basha ve ark, (2004) çalışmalarında, killi bir zemini stabilize etmek amacıyla, çimento (ağırlıkça %4 ve %8) ve pirinç kabuğu külünü (RHA) (ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25) farklı kombinasyonlarda katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Oluşturulan numuneler üzerinde sınıflandırma deneyleri, kompaksiyon deneyleri, CBR deneyleri ve serbest basma deneyleri gerçekleştirilerek zeminin dayanımı incelenmiştir. Çimento ve RHA ile stabilize edilmiş zeminlerden elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir: Çimento ve RHA ile stabilize edilmiş zeminlerin likit limitleri (LL) ve plastik limitleri artmış, ancak plastisite indisleri (PI) azalmıştır. Kompaksiyon deneyi sonuçlarından çimento ve RHA ilavesinin optimum su muhtevasını (OWC) arttırdığı ve maksimum kuru birim ağırlığın (MDD) çimento ve RHA yüzdesinin artışına karşılık geldiği görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlıktaki değişimin hem zeminin hem de stabilizatörün partikül boyutu ve özgül ağırlığı nedeniyle meydana geldiği anlaşılmıştır. Serbest basma deneyi analizinde, çimento tek başına kullanıldığında maksimum dayanıma karşılık gelen çimento içeriğinin %8 olduğu görülmüştür. RHA tek başına kullanıldığında, RHA'daki çimentolaşma özelliklerinin eksikliği nedeniyle

mukavemetin az arttığı bulunmuştur. Bu nedenle, RHA'nın tek başına killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılması önerilmemiştir. Çimento ve RHA karıştırıldığında, %4 çimento ve %20 RHA içeren numunenin yaklaşık 4 katı mukavemete sahip olduğu gösterilmiştir. CBR analizinde, çimento ve RHA kombinasyonlarında, %4 çimento-%5 RHA ve %8 çimento-%20 RHA karışımlarında sırasıyla %60 ve %53 olmak üzere maksimum CBR değerine ulaşıldığı görülmüştür. Daha az çimento içeriği ve RHA karıştırıldığında CBR değerinde büyük artışa ulaşıldığından bunun yol yapımında zemin iyileştirmesi için bir avantaj olabileceği vurgulanmıştır.

Sariosseiri ve Muhunthan (2009) yaptıkları çalışmada, ABD'nin Washington kentinde üç farklı zeminin (ASTM D 2487 standardına göre: ML, SP-SM ve ML-CL) stabilizasyonunda Portland çimentosunun kullanımına ait deneysel sonuçları sunmuşlardır. Portland çimentosu, numunelere kuru ağırlığına göre farklı oranlarda (%2,5, %5, %7,5 ve %10) eklenmiştir. Numunelerin davranışlarını belirlemek için, Atterberg deneyleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basma deneyleri (UCS) ve konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyleri (CU) yapılmıştır. Çalışma sonucunda, numunelerin serbest basma ve üç eksenli hücre kesme deneyi dayanımlarında zemin türüne bağlı olarak önemli iyileşmeler olduğunu göstermişlerdir. CU üç eksenli hücre kesme deneyi sonuçlarından, Portland çimentosu uygulamasının kayma dirençlerini önemli ölçüde artırdığı ve kırılma davranışlarını zemin türüne bağlı olarak büyük ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Portland çimentosuyla işlenmiş numunelerin, işlenmemiş numunelerle karşılaştırıldıklarında çok daha kırılğan davranış gösterdikleri aktarılmıştır.

Siddique ve Houssain (2011), yüksek plastisiteli bir kil üzerinde yapılan kireç stabilizasyonunun plastisite, büzülme, şişme, kompaksiyon ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kil zemini stabilize etmek için farklı kireç içeriği (ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15) olan numuneler hazırlanmış ve bunlar üzerinde farklı sürelerde (1, 2, 4, 8 ve 16 haftalık) kür uygulanmıştır. İşlenmiş kil üzerinde kıvam limitleri, hacimsel büzülme, kompaksiyon, CBR ve serbest basma deneyleri yapılmıştır. Kireç içeriği arttıkça işlenmiş numunelerin şişme potansiyeli ve hacim değişimi de önemli ölçüde azalmıştır. Kompaksiyon deneylerinde, kireç içeriği arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken optimum su muhtevası artmıştır. İşlenmiş numuneler doğal numuneyle karşılaştırıldığında, serbest basma ve

CBR dayanımlarının kireç içeriği artışına ve kür süresinin yükselmesine bağlı olarak önemli ölçüde yükseldiği belirtilmiştir.

Kılıç (2016) yaptığı çalışmada, üç farklı bölgeden alınarak laboratuvara getirilen kil örneklerine değişen miktarlarda çimento ilave ederek çimento stabilizasyonunun kil mukavemeti üzerindeki etkisini Veyn deneyi, serbest basma deneyi ve üç eksenli hücre kesme deneyi kullanarak araştırmıştır. Çalışmada, çimento katkısı farklı oranlarda (%6, %10 ve %15) yapılmış numuneler üzerinde üç farklı kür süresi altında (7 gün, 14 gün ve 28 gün) hem Veyn deneyi hem de üç eksenli hücre kesme deneyleri (100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa çevre basınçları) yürütülmüştür. Ayrıca %20 ve %25 çimento katkısı olan numunelerin üzerinde aynı kür sürelerinde sadece serbest basma deneyi uygulanmıştır. Deneysel sonuçlara istinaden, Emsworth, Hamble ve West Ashling bölgelerinden gelen zeminlerden hazırlanan numunelere çimento eklenmesiyle bu zeminlerin kayma dirençlerinin arttığı gösterilmiştir.

Negawo ve ark, (2019) çalışmalarında, çok şişme gösteren killi bir ortamda inşa edilecek yol tabakalarına ait mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla kireç katkısının etkinliğini incelemişlerdir. Doğal zemine farklı oranlarda kireç (%5, %7 ve %9) eklenerek oluşturulan numuneler 40 ± 2 °C kontrollü sıcaklık altında 7 gün boyunca kürlemeye tabi tutulmuş, kirecin oluşturulan bu numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Kireç ilavesi ile plastisite indisi, şişme potansiyeli ve maksimum kuru yoğunluk önemli derecede azalmıştır. Diğer taraftan optimum su muhtevası azalmış, serbest basma dayanımı (UCS) ve Kaliforniya taşıma oranı deneyi (CBR) dayanımlarında önemli artışlar meydana gelmiştir. CBR analizinde, 4 günlük ıslatma süresinden sonra 2,54 mm penetrasyonda %7 kireçle işlenmiş numunenin CBR oranının %0,73'ten %5,1'e yükseldiği görülmüştür. CBR deneyinden elde edilen sonuca göre numunenin şişme indisi %8,1'den %1,2'ye düşmüştür. Çalışmaların sonucunda, yol yapımında, %7 kireç uygulamasının şişme gösteren zeminleri etkili bir şekilde stabilize edebileceği vurgulanmıştır.

Çimen ve Coşan (2019) çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir kile volkanik tüf ve amorf silikayı ağırlıkça farklı oranlarda karıştırarak oluşturdukları numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Kil içerisine %2, %5, %10, %15, %20 ve %25 kütle oranlarında amorf silika ve volkanik tüf ekleyerek kıvam limitleri, standart kompaksiyon, sabit hacimli şişme ve serbest basma deneyleri

yürütmüşlerdir. Daha sonra volkanik tuf ve amorf silika oranları sabit kalmak kaydıyla ağırlıkça %5 kireç ilave ederek numuneleri ayrı ayrı tekrar hazırlamışlardır. Kireç ve volkanik tuf veya kireç ve amorf silika kombinasyonlarında her iki durumda da serbest basma dayanımının arttığı, şişme potansiyelinin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak volkanik tuf ile amorf silika katkıları karşılaştırıldığında aynı miktardaki amorf silika katkısının serbest basma dayanımının artırılmasında daha etkili olduğu, volkanik tufün ise şişme potansiyelinin düşürülmesinde daha etkili olduğu görülmüştür.

Bostancı (2020), laboratuvar ortamında yürüttüğü zemin iyileştirmesi çalışması kapsamında %8, %10 ve %12 oranlarında sönmemiş kireç ve hidrolik kireç katkılarının farklı kür süreleri altında (1 gün, 7 gün, 14 gün ve 28 gün) yüksek plastisiteli bir kilin geoteknik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında kıvam limitleri, piknometre, hidrometre, sıkıştırma (kompaksiyon), PH ve serbest basma deneyleri yapılmıştır. Başlangıçta alınan zemin örnekleri üzerinde hiçbir katkı maddesi kullanılmadan adı geçen deneyler yapılmıştır. Daha sonra sönmemiş kireç ve hidrolik kireç katkıları belirlenen oranlarda kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde aynı deneyler yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Kireç katkıları eklendiğinde likit limit değerinde ve plastisite indisinde azalma, plastik limit değerinde ise artış görülmektedir. Sıkıştırma deneyinde, maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığına ve optimum su muhtevasının arttığına yönelik sonuçların elde edildiği aktarılmıştır. Serbest basma deneyleri incelendiğinde, katkı maddesi miktarı arttıkça serbest basma dayanımı değerinin arttığı ve birim şekil değiştirme oranının azaldığı görülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre yüksek plastisiteli killi zeminin iyileştirilmesinde sönmemiş ve hidrolik kireç katkılarının kullanılabileceği, yöntemin görece daha ekonomik bir yöntem olduğu ve gerekli kalite değerlerini sağlayabildiği belirtilmiştir.

Driss ve ark, (2023) çalışmaları kapsamında, yüksek plastisite bir kil (CH) zemini iyileştirmek için katkı maddesi olarak kireç ve doğal puzolan kullanmışlar ve bunun etkilerinin değerlendirilmesine yönelik deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Doğal zemine doğal puzolan ağırlıkça %10 ve %20, kireç ise ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında eklenmiştir. İşlenmiş numuneler 1 gün, 7 gün ve 28 gün boyunca kürlenmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde bu farklı kür süreleri sonunda bazı deneyler (elek analizi, kıvam limitleri, pH, kompaksiyon, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi), mikroyapısal analiz (XRF) ve taramalı elektron

mikroskobu analizi (SEM) gerçekleştirilmiştir. Zeminlerin kayma mukavemeti incelendiğinde, varyasyonların kayma parametreleri ve yenilme modu üzerindeki etkileri sunulmuştur. Çalışmanın sonuçları, kireçle işlendiğinde yüksek oranda plastikliğe sahip kilin özelliklerinde önemli iyileşme görüldüğünü ortaya koymuştur. Kireç ve doğal puzolanın tek başına kullanımlarına kıyasla bir kombinasyon şeklinde kullanıldıklarında daha yüksek kayma direnci parametreleri gözlemlenmiştir. Kireçle işlenmiş numunelere doğal puzolan eklenmesiyle, özellikle uzun vadede ek bir kimyasal reaksiyon oluştuğu ve ek çimentolaşma ve daha iyi flokülasyon görüldüğü bildirilmiştir. Bu durumda %6 kireç ve %20 doğal puzolan ile muamele edilen numunenin maksimum deviatör gerilmesinin 28 günlük kür süresi boyunca %200 arttığı belirlenmiştir. Çalışma sonunda %6 kireç ve %20 doğal puzolan ile işlenmiş numunelerde, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinde önemli artışlar görülmüş ve gerilme-şekil değiştirme davranışlarında sünek davranıştan gevrek davranışa geçildiği gözlemlenmiştir.

2.2. Olivin ile Zemin İyileştirilmesi

Kanarya (2010), yürüttüğü çalışmada olivin kumuna Na bentonit (%2'den %12'ye kadar %1 arttırarak) ve su (%4, %5, %6 ve %7) ilave ederek ıslak (yaş) basınç dayanımını, gaz geçirgenliğini, yüzey sertliğini ve olivin kumunun akışını deneysel olarak incelemiştir. Metal döküm üretiminde yaş kalıp kumu olarak olivinin kullanılmasının araştırıldığı bu çalışma sonunda %89 olivin kumu, %6 Na bentonit ve %5 su içeren karışımların optimum değerleri verdiği belirtilmiştir. Bu optimum oranlarda gaz geçirgenliği 65,5 cm³/s, sertlik değeri 84 lb/inç², yaş basma değeri 1140 gr/cm² ve akıcılık değeri 0,4 olarak elde edilmiştir. Çalışma sonunda olivin kumunun, dökme çelik üretiminde ıslak kalıp kumu olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Fasihnikoutalab ve ark, (2015) çalışmalarında, olivinin killi zeminlerin stabilizasyonunda bağlayıcı olarak görev yapan önemli bir magnezyum oksit kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Buna göre olivin, sürdürülebilir bir malzeme olarak iklim değişikliği kontrolüne, zemin stabilizasyonuna ve şev stabilitesine katkı sağlayabilir. Yazarlara göre bu malzemenin kullanımı, zemin stabilizasyonunda iki önemli avantaj sunar: karbondioksit tutma kabiliyeti ve sağlam bir tabaka olarak şev kaymalarına karşı etkili bir engel oluşturma yeteneği. Olivin, genellikle mafik ve ultramafik kayalarından elde edilen yüksek MgO içeriğine sahip bir mineraldir ve bu özellikleri

sayesinde beton üretimi ve zemin stabilizasyonunda çimento yerine tercih edilen bir alternatif olma potansiyeline sahiptir. Çevresel açıdan olivinin bu potansiyeli, geoteknik mühendisliğinde kullanılmasına yönelik araştırmalar gerektiğine de işaret etmektedir.

Fasihnikoutalab ve ark, (2016) çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir kil zemin üzerinde yaptıkları deneysel çalışmanın olivinin bir zemin stabilizatörü olarak potansiyelini gösteren ilk deneysel çalışma olduğunu söylemişlerdir. Yazarlar, %15 olivin ilave edilen kilde karbondioksit basıncının ve karbonatlaşma süresinin serbest basma dayanımı (UCS) üzerindeki etkisini görmek üzere bu çalışmayı yürütmüşlerdir. Çalışma sonunda kayma direnci açısından olivinin yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda etkili olduğu vurgulanmıştır. Çalışma sonunda, en yüksek dayanıma 200 kPa'lık karbondioksit basıncı etkisinde 168 saat karbonatlaşmadan sonra ulaşılmıştır. Bu durumda serbest basma dayanımı 100 kPa'dan 1274 kPa'a çıkmıştır. Mikroyapısal analizlerde, olivinle işlenmiş karbonatlı zeminin yüzeyinde manyezit varlığı gösterilmiştir. Sonuçta, işlenmiş zeminde değiştirilmiş fiziksel ve kimyasal özelliklerden dolayı iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

Fasihnikoutalab ve ark, (2017a) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, olivin (Mg_2SiO_4) kullanımı yanında alkali aktivasyonu ve karbonatlaştırmanın zemin iyileştirmesi açısından ilk kez birlikte uygulandığını vurgulamışlardır. Çalışmada, 7 ile 90 gün arasında karbon dioksit basıncının ve alkali konsantrasyonunun (%5 ila %20 arasında sodyum hidroksit ilavesi) etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, NaOH varlığında olivin kullanmanın avantajlarını ve 90 gün boyunca zemin kayma mukavemetinde %40'a varan artış olduğunu göstermiştir. Bunun yanında 7 gün ilave karbonatlaşmaya tabi tutulan numunelerde, zemin mukavemetinde %60'a varan artışlar ortaya çıkmıştır. Karbonatlaşma öncesi ve sonrası yapılan mikroyapısal incelemelerde, mukavemet gelişiminin karbonat oluşumuna bağlı olduğu fark edilmiştir. Zemin mukavemetindeki artış yanında bir temel avantaj da, kireç veya çimento stabilizasyonuna kıyasla daha düşük karbon ayak izi elde edilmesi bulunmaktadır. Bu çalışmada, bir alkali aktivatör (NaOH) varlığında zemin iyileştirilmesinde olivinin kullanımının başarılı olduğu ön plana çıkarılmıştır.

Fasihnikoutalab ve ark, (2017b) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, olivinin (Mg_2SiO_4) potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilmesi durumunda zeminin serbest basma dayanımını artırdığını ortaya koymuşlardır. Doğal zemini iyileştirme amacıyla

KOH ile aktive edilmiş olivin farklı oranlarda (ağırlıkça %5-20) kullanılmış ve 7 ve 90 günlük farklı kür süreleri uygulanmıştır. Yazarlar, KOH varlığında olivin kullanımıyla, işlenmiş zeminin kayma mukavemetinin 90 günde 7,4 MPa'a kadar arttığını belirlemişler ve sonuç olarak işlenmiş zemin kayma direnci konusunda olivinin büyük bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Menon ve Mohandas (2019) çalışmalarında, KOH ile aktive edilmiş olivinin zeminin serbest basma dayanımını artırdığını ortaya koymuşlardır. Çalışmada KOH ile aktive edilen olivin ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25, ve %30 oranlarında kullanılarak farklı kür süreleri (7 gün, 14 gün ve 28 gün) sonunda düşük plastisiteli kilin serbest basma dayanımının değişimi araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarında, olivin ilavesinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı %25'e kadar artırdığı, optimum su muhtevasını ise %25'e kadar azalttığı görülmüştür. Olivin ile işlenmiş numunelerin mukavemetinin bir alkali aktivatör varlığında arttığı görülmüş, mukavemet artışına bağlı olarak, optimum olivin konsantrasyonunun yaklaşık %25 olduğu bulunmuştur. SEM analizinde, olivinin zemin içindeki hidrasyon ve puzolanik reaksiyonunun bir sonucu olarak zeminin gözeneklerini doldurduğu anlaşılmıştır. Çalışma sonunda dayanım artışının yanında, kireç veya çimento stabilizasyonuna kıyasla daha düşük CO₂ salınımı olması yöntemi çevreci bir çözüm olarak ön plana getirmiştir.

Emmanuel ve Anggraini (2020) çalışmalarında, killi zeminlerin düşük hidrolik iletkenlikleri nedeniyle, depolama alanlarındaki kaplama malzemelerinin yapımında yaygın olarak kullanıldığını söylemişlerdir. Ancak bu tür killi zeminlerin yüksek şişme potansiyeli nedeniyle hidrolik iletkenliklerinin kuruma çatlaklarından olumsuz etkileneceğinden de bahsetmişlerdir. Ayrıca depolama sahasında çatlaklar olması halinde killi zeminlerin geçirimsizliklerinin sızıntı suyundan da etkilenebileceğini belirtmişlerdir. Kurumadan kaynaklı çatlakların etkilerini azaltmak için, denizel kil numuneleri ağırlıkça %30 olivinle işlenmiş ve bu durumda azalan hidrolik çatlak boyutu sayesinde hidrolik iletkenliğin düşük seviyelerde kalmaya devam ettiği görülmüştür. Yazarlar, zeminlerin hidrolik iletkenliğini azaltmasından dolayı olivinin uygun bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Emmanuel ve ark, (2020a) çalışmalarında, depolama sahasındaki sızıntı suyu ve olivinle işlenmiş denizel kil arasındaki etkileşimi inceleyerek, yapılmış depolama sahalarında olivinle işlenmiş kilin kimyasal özellikler açısından alt kaplama malzemesi olarak kullanımının uygun olup olmayacağını araştırmışlardır. Çalışmada,

doğal zemine ağırlıkça %10, %20, %25, %30 ve %35 oranlarında olivin katılmış ve oluşan karışımlar optimum çevresinde (-2, 0, +2 ve +%4) dört farklı su muhtevasında üç farklı sıkıştırma enerjisi (indirgenmiş, standart Proctor ve modifiye Proctor) etkisi altında sıkıştırılmışlardır. Hazırlanan numuneler üzerinde kıvam limitleri, hacimsel büzülme gerinimi (VSS), serbest basma dayanımı (UCS) ve hidrolik iletkenlik (HC) deneyleri yapılmıştır. Genellikle UCS değerleri artan sıkıştırma enerjileri ile artmış ve artan su muhtevası ile azalmıştır. Kullanılan tüm sıkıştırma enerjileri için, %-2 optimum su muhtevası ve %30 olivin katkısı oranlarında maksimum UCS değerleri elde edilmiştir. Morfolojik ve mineralojik analizler (FESEM ve XRD), magnezyum alüminat hidrat (MAH) ve magnezyum silikat hidrat (MSH) oluşumunun zeminin hidromekanik özelliklerinin olumlu yönde değiştirilmesinde başlıca etken olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçta, %35 oranına kadar olivinle (%30 optimum) işlenmiş deniz kilinin depolama alanlarında sızıntı suyuna karşı iyi bir bariyer malzemesi olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Emmanuel ve ark, (2020b) çalışmalarında, yumuşak denizel kilin mukavemetini arttırmak için olivin ve Hindistan cevizi lifi içeriğinin optimizasyonunu araştırmışlardır. Yazarlar, olivin içeriği, lif içeriği ve kür (zamanla kimyasal reaksiyon etkisi) süresine bağlı olarak serbest basma dayanımı (UCS) değerlerinin değişimini araştırmışlardır. Çalışmanın sonunda ANOVA analizi olivin içeriğinin ve kür süresinin UCS değerlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Çalışma sonucunda ayrıca bir regresyon modeli de ortaya konmuştur. %30 olivin içeriği, %2.5 Hindistan cevizi lifi içeriği ve 35 günlük kür süresi sonucunda serbest basma dayanımının iki kat arttığı bulunmuş ve olivin ve Hindistan cevizi liflerinin eklenmesinin hem fiziksel hem de kimyasal değişimler yoluyla yumuşak denizel kilin mukavemet özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir.

Fasihnikoutalab ve ark, (2020) çalışmalarında, killi bir zemini stabilize etmek için olivin (Mg_2SiO_4) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBS) kullanmışlardır. Çalışmada olivin oranı ağırlıkça %15 ve %20, yüksek fırın cürufu ağırlıkça %5, %10 ve %20 olarak seçilmiş ve 10 M olarak hazırlanmış sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Stabilize edilmiş numuneler 7, 18 ve 90 günlük kür süreleri sonrasında serbest basma deneyine (UCS) tabi tutulmuştur. 90 günlük kür süresi sonunda %20 GGBS ile işlenmiş zeminin (NaOH ile aktivasyon olmadan) UCS'leri orijinal zemine kıyasla sadece hafif bir artış (142 kPa)

göstermiştir. %20 olivin ve %20 GGBS ile işlenmiş zeminde, UCS 90 günden sonra 444 kPa'a kadar yükselmiştir. Bununla birlikte, NaOH bir aktivatör olarak kullanıldığında, %20 olivin ve %20 GGBS ile işlenmiş zeminin UCS'leri 90 günden sonra yaklaşık 6000 kPa'a ulaşmıştır. Yazarlar, SEM/EDS analizlerini yorumlamışlar ve NaOH varlığında zemine öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve olivin ilavesiyle Ca ve Mg'un çözünmesinin sağlandığını, C-S-H ve M-S-H jellerinin oluşmasıyla da daha yüksek reaksiyon kapasitesinin oluştuğunu ve bunun da mukavemette önemli artış sağladığını belirtmişlerdir.

Emmanuel ve ark, (2022) çalışmalarında, yüksek plastisiteli bir deniz kilinin iyileştirilmesinde olivin ve kireç kullanılması durumunda oluşacak davranış farklılıklarını göstermek amacıyla karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Olivin ve kireç kile ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %25, %30 ve %35) katılmış ve farklı kür sürelerinde (1 gün, 3 gün ve 7 gün) killi zeminde gelişen UCS ve CBR değerleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, %30 olivin içeriğinin tüm kür süreleri için optimum değerleri verdiği görülmüştür. Kireç için optimum katkı oranının %35 olduğu anlaşılmıştır. Çalışmada olivin uygulanmış kilin kireç uygulanmış kile göre daha üstün performans gösterdiği belirlenmiştir. Yazarlar, olivinin yumuşak deniz kilinin geoteknik özelliklerini geliştirdiğini ve bu nedenle hidrolik bariyerler, yol tabakaları ve temeller gibi yapıların stabilitesini arttırmak için etkili bir stabilizatör olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, olivin ve zeminin dane boyutunun kimyasal reaksiyon hızı bakımından önemli olduğunu belirtmişler ve bu nedenle daha küçük (kil ve kilden daha küçük mikro boyutlu) olivin boyutlarının yumuşak zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasının gerekli olduğunu vurgulamışlardır.



3. OLİVİN VE POTASYUM HİDROKSİT(KOH)

3.1. Olivin

3.1.1. Olivinin tanımı ve sınıflandırılması

Olivin, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ formülüne sahip, magnezyum, demir ve silikattan oluşan bir mineraldir. Genellikle mafik ile ultramafik magmatik kayalarda yaygın olarak bulunan bir mineraldir (Fasihnikoutalab ve ark, 2015). Olivin grubu mineralleri temelde ortorombik kristal sisteminin yapısına göre kristalleşen Mg^{+2} ve Fe^{+2} silikatlardan oluşur ve orto-silikat grubunda bulunurlar. Mg^{+2} ve Fe^{+2} 'nin hakim olduğu ana mineraller Mg_2SiO_4 (Forsterit) ve FeSiO_4 (Fayalit) olarak adlandırılır (Kanarya, 2010). Glokokroit (Glaucocroite, CaMgSiO_4), Kirstenit (Kirchsteinite, CaFeSiO_4), Pikroteforit (Picrotephorite, CaFeSiO_4), Montisellit (Monticellite, CaMgSiO_4), Fayalit-Kneblit (Fayalite-Knebelite, FeMnSiO_4) ve Teforit (Tephorite, Mn_2SiO_4) gibi mineraller de Mg^{+2} ve Fe^{+2} içermektedirler (Anon, 2001; Kanarya, 2010).

Doğada forsterit ve fayaliti katışıksız olarak bulmak çok zor olduğundan olivin içeren kristallerin isimlendirmesinde içerdikleri forsterit (Fo) miktarı kullanılmaktadır. Burada Mg/Fe oranı dikkate alınır (Anon 1995; Kanarya 2010).

Olivinin hiç magnezyum içermeyenine saf Fayalite (Fe_2SiO_4) ve hiç demir içermeyenine saf Forsterit (Mg_2SiO_4) ismi verilmektedir. Sarı-yeşil, zeytin yeşili, yeşil-siyah ve kırmızı-kahverengi gibi çeşitli renklerde bulunabilen olivinin özellikleri Mg/Fe oranına istinaden değişebilir. Yoğunluğu 3,27-4,40 arasında değişmektedir (Fasihnikoutalab ve ark, 2015).

3.1.2. Kimyasal özellikleri

Kanarya (2010), dünyadaki olivin araştırmalarının ağırlıklı olarak magnezyum açısından zengin forsterit tipi olivin üzerinde odaklandığını belirtmektedir. Saf forsteritin doğal olarak bulunması zor olduğundan endüstri yüksek oranda forsterit içeren olivini tercih etmektedir. Genellikle endüstriyel kullanım için MgO dozu %42'nin üzerinde olmalı ve toplam FeO miktarı %7-8'i geçmemelidir. Aynı derecede

önemli olan SiO₂ içeriği %38-%42 arasındadır, diğer metal oksitlerin toplamı %3'ten azdır ve yangın kaybı %1 civarındadır. Olivin, refrakter özelliği olan bir bazik malzemedir. Sinterleşme ve ergime sıcaklıkları sırasıyla 1450 °C ve 1760 °C'dir. Tablo 3.1., 3.2., 3.3., 3.4. ve 3.5'te farklı çalışmalarda bulunan kimyasal özellikler sunulmuştur.

Tablo 3.1. Olivin kimyasal özellikleri (Anon, 1995; Kanarya, 2010).

Kimyasal Bileşimler	Kütle (%)
MgO	48-50
SiO ₂	42-43
Al ₂ O ₃	0,05-0,1
Fe ₂ O ₃	6,8-7,3
CaO	-
Ateş kaybı	0,7-1,5

Tablo 3.2. Olivinin kimyasal özellikleri ve dane dağılımı (Renforth ve ark, 2015).

XRF analizi	Kütle (%)
SiO ₂	41,64
TiO ₂	0,02
Al ₂ O ₃	0,75
Fe ₂ O ₃	7,39
MnO	0,11
MgO	47,73
CaO	0,38
Na ₂ O	<0,01
K ₂ O	0,05
P ₂ O ₅	0,01
SO ₃	<0,01
Ateş kaybı	2,27

Tablo 3.2. (Devamı) Olivinin kimyasal özellikleri ve dane dağılımı (Renforth ve ark, 2015).

Dane boyutu dağılımı	Kütle (%)
>500 μm	7,4
500-212 μm	27,5
212-125 μm	50,0
125-63 μm	11,1
63-45 μm	3,1
<45 μm	0,8

Tablo 3.3. Olivin kimyasal özellikleri (Fasihnikoutalab ve ark, 2016).

Kimyasal Bileşimler	Kütle (%)
MgO	48,28
SiO ₂	40,32
Al ₂ O ₃	1,37
Fe ₂ O ₃	8,90
CaO	-
Ateş kaybı	1,13

Tablo 3.4. Olivinin kimyasal özellikleri (Emmanuel ve ark, 2019).

Kimyasal Bileşimler	Kütle (%)
MgO	44,01
SiO ₂	40,02
Al ₂ O ₃	5,98
Fe ₂ O ₃	8,04
CaO	0,20
Ateş kaybı (LOI)	1,75

Tablo 3.5. EDX analizi, olivinin kimyasal özellikleri (Emmanuel ve ark, 2019).

Kimyasal Bileşimler	Kütle (%)
Mg	30,91
Si	20,71
O	30,98
Fe	6,68

3.1.3. Dünyada olivin kaynakları

Plani (2001), dünyada çıkarılmakta olan en büyük olivin rezervinin Norveç'te mevcut olduğunu belirtmektedir. Aheim çevresinde bulunan bu kaynağın yaklaşık 6,5 km² bir alana sahip olduğu ve 2 milyar tondan fazla Fosterit (Mg₂SiO₄) rezervine sahip olduğu beyan edilmektedir. Söz konusu bu olivin (dünit) 1948'den beri çıkarılmakta olup ekonomik alanda en büyük yeri almaktadır. Kanarya (2010), İtalya'da Torino yakınlarında madencilik çalışmalarına 1960 yılında başladığını ve bu bölgede 100 milyon tonluk bir olivin rezervinin bulunduğunu aktarmaktadır. Yazarlar, 1980 yılına kadar İsveç'te refrakter endüstrisi ve ısıtıcılar (radyatör şeklinde) için yılda 50000 tondan fazla dünit üretildiğinden, bunun yanında İspanya'nın kuzeybatı tarafında Galiçya çevresindeki dünitlerin rezervinin de 100 milyon tondan fazla olduğundan bahsetmektedirler. Çalışmada, ABD'de Washington ve Kuzey Carolina'da olivin içeren çok sayıda dünit yatağının bulunduğu, Washington çevresinde 200 milyon tondan fazla dünit rezervi keşfedildiği beyan edilmektedir. Güney Afrika, Japonya, Yeni Zelanda ve Meksika'da önemli ölçüde dünitlerin mevcut olduğu, ancak bunların rezervleri hakkında güvenilir bilgi bulunmadığı da anlaşılmaktadır. Ek olarak Pakistan, İran ve Yugoslavya'da önemli hacimde dünit mevcut olmasına rağmen, endüstride kullanımına dair hiçbir belge bulunamadığı da aktarılmaktadır.

3.1.4. Tüketim

Plani (2001), dünyada olivin üretiminin en fazla Norveç'te yıllık 3,1 milyon ton olarak gerçekleştiğini belirtmektedir. Ancak, Norveç'te yıllık olivin tüketimi sadece 20000 ton civarında olup, üretimin büyük kısmı (2,9 milyon ton/yıl) ihraç edilmektedir. Avusturya'da prefabrik yapıların, kimyasal bağlı tuğlaların ve refrakterlerin üretiminde 38.000 ton/yıl'dan fazla dünit kullanıldığı ifade edilmiştir. İtalya'da %25'i

elik endüstrisinde, %30'u döküm ve refrakter endüstrisinde, %30'u aşındırıcı olarak, %10'u döşemede ve %5'i inşaat sektöründe olmak üzere 200000 ton/yıl'dan fazla dünit tüketilmektedir. Aynı kaynakta ayrıca özel boyaların imalatında da kullanıldığı ifade edilmektedir. Plani (2001)'e göre Avrupa'da dünit tüketimi, özellikle elik endüstrisinde dolomitin yerini aldıktan sonra artmaya başlamıştır. Öte yandan, dökümhane ve aşındırıcı endüstrisinde olivin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Ancak Avrupa ülkelerinin ne kadar dünit tükettiği konusunda güvenilir bir bilgi elde edilememektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde olivin, elik, dökümhane ve refrakter üretimi gibi önemli endüstrilerde önemli miktarlarda kullanılmaktadır. Ancak tüketim açısından yaklaşık 300000 tonun üzerinde olivin tüketildiği bilinmektedir. Japonya'da 1995 yılında, 190000 ton olivin tüketildiği ifade edilmiştir. Ayrıca %34'ü demir-elik dahil olmak üzere sanayi için, %66'sı ise bina ve inşaat amaçlı kullanılmaktadır. Meksika'da 1988-1989 yıllarında elik endüstrisinde 25000 ton/yılın üzerinde dünit tüketildiği ifade edilmiştir.

3.2. Potasyum Hidroksit (KOH)

Potasyum hidroksit, potasyum iyonu (K^+) ve hidroksit iyonu (OH^-) birleştirildiğinde ortaya çıkan bir bazıktır. Kimyasal formülü KOH'tır. Potasyum hidroksit, beyaz ile hafif sarı renkli olan bir alkalidir. Potasyum hidroksit, potasyum klorürün (KCl) elektrolizinden elde edilmektedir. Su veya polar çözücülerle karıştırıldığında ekzotermik bir reaksiyon oluşmaktadır. Potasyum hidroksit su sıcaklığına ve konsantrasyonuna bağlı olarak kullanılmaktadır (Gilliam ve ark, 2007).



4. KAYMA DİRENCİ

4.1. Giriş

Zemin katmanlarında kendi ağırlıklarından (jeolojik gerilme) ve zemine uygulanan yüklerden dolayı gerilmelerin geliştiği bilinmektedir. Zemine uygulanan yükler derinlik boyunca zemin tabakalarında normal gerilmelerin ve kayma gerilmelerinin artmasına neden olmakta, bu da zeminin deformasyonuna neden olmaktadır. Zeminlerin gerilme-deformasyon davranışı genellikle diğer birçok yapı malzemesinde olduğundan çok daha karmaşıktır (Ürkmez, 2009).

Tüm zeminler, daneler arası sürtünme ve/veya daneler arasındaki çekim kuvvetleri (kohezyon) sayesinde kayma direnci göstermektedir. Zemin mekaniğinde, kayma direnci çok önemli bir kavramdır. Zeminlere aşırı gerilmelerin uygulanması kaçınılmaz olarak yenilmeye yol açmaktadır. Bu nedenle, inşaat mühendisliği alanında zeminlerin kayma direncinin incelenmesi esastır. Bir zeminin kayma direnci bilgisi, temellerin taşıma gücü, şevlerin stabilitesi ve istinat yapılarının dengesi gibi çok sayıda inşaat mühendisliği problemlerini çözmek için kullanılmaktadır.

Diğer tüm malzemeler gibi zeminlerde de, uygulanan yüklerin oluşturduğu gerilmeler belirli bir sınırı aştığında göçme meydana gelmektedir. "Göçme" terimi, bir temel veya şev üzerindeki yük veya gerilmenin, deformasyonun kabul edilemez ölçüde artması durumuna sebep olmasını ifade etmektedir (Durmuş, 2007). Bir başka ifadeyle zeminin göçmeden önce dayanabileceği maksimum gerilmeye kayma direnci denmektedir (Önalp ve Sert, 2016).

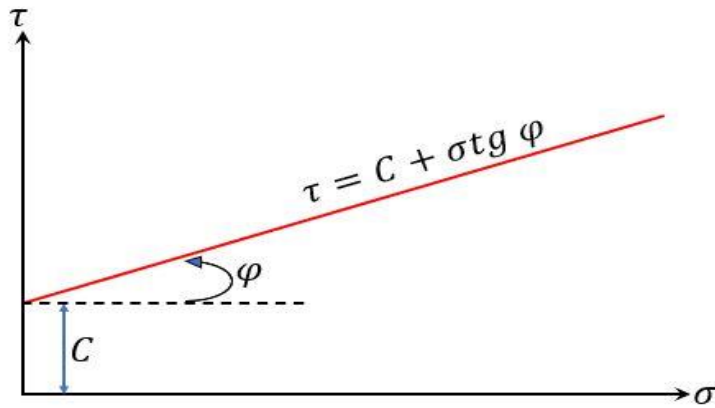
İnşaat mühendisliği projelerinde zemin kayma direnci parametreleri, sahada karşılaşılan sorunlara cevap vermek için farklı analiz yaklaşımlarını içeren toplam ve efektif gerilme yaklaşımlarını dikkate alarak yapılan deneyler sonucunda elde edilmektedir. Arazide karşılaşılan problemlerin çoğu aşırı toplam veya farklı oturmalar ve kayma direncinin aşılmasından kaynaklanmaktadır. Yapıdan aktarılan kayma gerilmesi zeminin kayma dayanımını aşarsa zeminde bir kayma yüzeyi oluşacak ve bu yüzey boyunca yenilme meydana gelecektir. Bu nedenle,

zeminin kayma dayanımını anlamak ve ölçmek yapıların tasarımında kritik bir noktadır (Arslan, 2021).

Danelerin sürtünme oluşumunun gücünü temsil eden içsel sürtünme açısı, kumlarda killere göre daha yüksek bir değere sahiptir. Danelerin arasındaki elektriksel çekimin oluşturduğu kohezyon özellikle killer başta olmak üzere ince daneli zeminlerde önemli değerlere ulaşabilmektedir. Temiz kumlarda ve plastik olmayan siltlerde kohezyon sıfır kabul edilmektedir.

4.2. Mohr-Coulomb Yenilme Kriteri

Zeminler için, göçmeye neden olan normal gerilmelerin ve kayma gerilmelerinin birleşik etkilerini dikkate alan çok sayıda varsayım geliştirilmiştir. En basit ve pratikte en çok kullanılan Mohr-Coulomb yenilme kriteridir. Olay, normal gerilme ve kayma gerilmesinin bir kombinasyonu olarak ele alınmış ve bu kombinasyonun etkisini dikkate alarak Mohr-Coulomb teorisi önerilmiştir. Coulomb tarafından önerilen doğrusal ilişki, Mohr'un kayma mukavemeti ile zemin göçme anındaki normal gerilme arasındaki eğrisel ilişkisi ile birleştirildiğinde Şekil 4.1 ve Denklem (4.1)'de gösterilen Mohr-Coulomb kriteri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.1. Mohr-Coulomb kırılma zarfı denklemi.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (4.1)$$

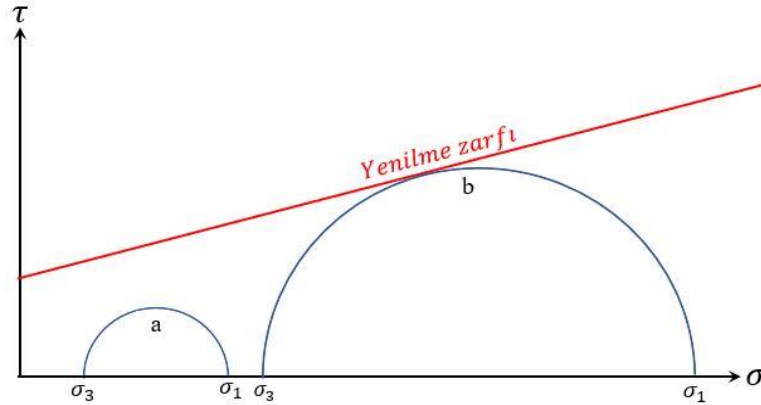
Denklem (4.1)'de, τ : kayma dayanımını, c : kohezyonu, σ : düşey düzlemdeki normal gerilmeyi, φ : içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. Birinci terim, daneler arasındaki elektriksel çekimi ifade eden kohezyonu, ikinci terim ise daneler arasındaki

sürtünmeyi ifade eden içsel sürtünme açısını göstermektedir. Özetle, kohezyon ve içsel sürtünme açısı kayma direnci parametreleri olmaktadır.

Coulomb tarafından kohezyonlu zeminlerin mukavemeti ilk kez tanımlandıktan sonra, zeminlerde iki kohezyon türü olduğu belirlenmiştir. Birincisi, sementasyon etkilerinin görüldüğü veya aşırı konsolidasyon nedeniyle meydana gelebilen moleküller arasındaki gerçek çekime dayanan gerçek kohezyondur. Diğeri ise negatif aşırı boşluk suyu basıncı veya kılcıl hareket nedeniyle oluşmuştur. Diğeri bir deyişle, efektif gerilmeden dolayı danelerin birbirine kenetlenmesinden oluşan görünür kohezyondur (Arslan, 2021; Coduto, 1998).

4.3. Göçme Durumu ve Mohr Çemberleri

Mohr çemberi, zemindeki normal gerilmelerin ve kayma gerilmelerinin kullanımı ile elde edilir ve bu çember kırılma zarfının altında ise yenilme olmaz, çemberin zarfa teğet olması ise yenilmeye ulaşıldığını ifade etmektedir. Şekil 4.2’de, çember (a) yenilme zarfı altında olduğu için yenilmemiş bir durumu temsil etmektedir. Çember (b) ise yenilme zarfına teğet olduğu için yenilmeyi ifade etmektedir. Bu bağlamda Mohr çemberleri, yenilme zarfının altında veya temas şeklinde olabilmektedirler, ancak yenilme zarfını kesen yani daha büyük gerilmeler gösteren şekilde olamazlar.



Şekil 4.2. Mohr-Coulomb yenilme kriteri.

4.4. Drenajsız ve Drenajlı Kayma Direnci

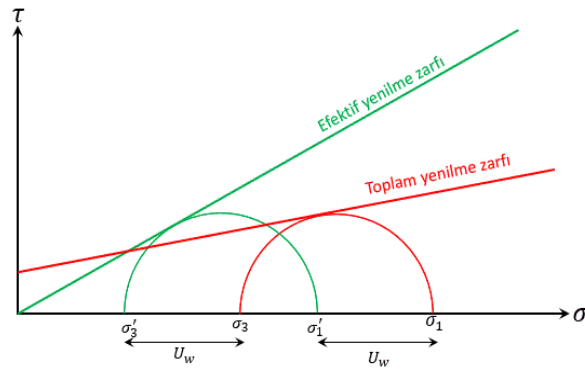
Terzaghi yaklaşımına göre efektif gerilme kavramı, zeminin birbirine bağlı iki ortamdan, daneler ve boşluk suyundan oluştuğunu dikkate almaktadır. Doygun ortamda, σ toplam gerilmeyi (daneler ve su tarafından gerilmelerin taşınması), σ' efektif gerilmeyi (sadece daneler tarafından gerilmelerin taşınması) ve u boşluk suyu

basıncımı temsil etmektedir. Dolayısıyla Terzaghi bağıntısı drenajsız durumda denklem (4.2)'de ve drenajlı durumda denklem (4.3)'te gösterildiği gibi karşımıza çıkmaktadır.

$$\tau = c_u + \sigma tg\varphi_u \quad (4.2)$$

$$\tau = c' + \sigma' tg\varphi' \quad (4.3)$$

Zeminler farklı dane boyutlarına ve boşluk oranlarına sahip olduklarından, geçirimsizlik katsayıları düşük veya yüksek olabilmektedir. Bu da yükleme sırasında boşluk suyunun sistem dışına çıkmasını etkilemektedir. Buna göre drenajsız ve drenajlı olmak üzere iki farklı durum ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, kuvvetlere maruz kalan doygun bir zemin hacim değişimine zorlanmaktadır. Pratik olarak su sıkıştırılmaz, bu nedenle suyun hareketiyle hacim değişikliği gerçekleşmektedir. Daneli zeminlerin permeabilitesi yüksek olduğu için su akışı çok hızlıdır. Bu durumda yük aniden veya kısa bir sürede daneler tarafından taşınmaya başlanmaktadır. Bu durum drenajlı kayma direnci olarak tanımlanmaktadır. Aksi durumda, ince daneli zeminlerde, permeabilite düşük olduğu için yükleme ile boşluk suyunun sistem dışına çıkması hızlıca mümkün olamayacağından zemine gelen gerilmeler daneler ve boşluk suyu basıncı tarafından taşınmaktadır. Bu durum ise drenajsız kayma direnci olarak tanımlanmaktadır. İnce daneli (kohezyonlu) zeminlerin yavaş şekilde yüklenmesi veya uzun vadedeki su basınçlarının sönmüş hali durumu drenajlı kayma direnci olarak kabul edilmektedir. Drenajsız kayma direnci (kısa vade) hesaplamada toplam gerilme cinsinden dikkate alınırken drenajlı kayma direnci (kısa veya uzun vade) efektif gerilmeler cinsinden dikkate alınmaktadır (Şekil 4.3.).



Şekil 4.3. Toplam ve efektif gerilmeler türünden yenilme zarfları.

4.5. Kayma Direncinin Belirlenmesi

Zeminlerin drenajsız ve drenajlı kayma dirençlerinin belirlenmesi, laboratuvar ve sahadaki farklı deneyler yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Kayma direnci parametreleri saha şartlarını yansıtan ve yansıtmayan deneyler kullanılarak laboratuvar ortamında kolayca belirlenebilmektedir.

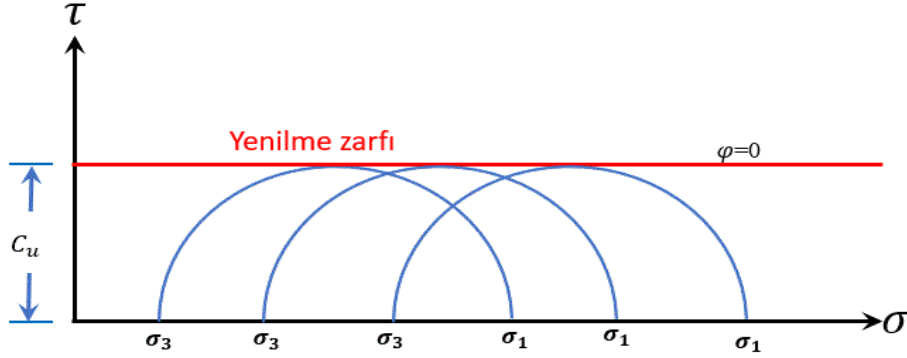
4.5.1. Laboratuvar deneyleri

Zeminlerin kayma direncini belirlemek için bir dizi laboratuvar deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerin başlıca: kesme kutusu deneyi, kanatlı kesici deneyi (VST), serbest basma deneyi (UCS) ve üç eksenli (UU, CU ve CD) hücre kesme deneyleridir. Arazi koşullarını en iyi yansıtan üç eksenli hücre kesme deneyidir.

4.5.1.1. Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (UU)

UU üç eksenli hücre kesme deneyi, boyu çapının 2 katı ($H/D=2$) civarında olan silindirik bir numuneye sabit bir hidrostatik basınç (çevre basıncı) ve artan bir deviatör gerilme uygulanarak konsolidasyona bırakmadan ve kesme anında drenaja müsait edilmeden yapılan bir deneydir. Hızlı bir deneydir. Numune, esnek ve su geçirmez bir membran (genel olarak lateks veya neopren) ile izole edilmektedir. Dikey yükleme pistonu, makine tipine göre üst veya alt yöne doğru hareket etmektedir. Numune hücreye yerleştirildikten sonra hücreye su doldurulur ve çevre basıncı verilir. Bu çevre basıncı numunenin her yerine dikey kuvvet olmadan "izotropik" koşullar altında uygulanmaktadır. Çevre basıncı uygulandıktan hemen sonra numuneye sabit hızda bir eksenel deformasyon uygulanmaya başlanır ve bu sırada çevre basıncı sabit tutulur. Deney sırasında gerilme-deformasyon eğrisi (σ - ϵ) kaydedilebilmektedir. Kayma mukavemeti genellikle bu üç eksenli sıkıştırma sırasında ulaşılan maksimum gerilme değerine karşılık gelmektedir. Sünük davranış gösteren zeminlerde, %20 deformasyona karşılık gelen deviatör gerilme büyük asal gerilmeyi bulmak üzere kullanılır. Son gerilme durumu yenilmeyi temsil etmektedir ve buna göre Mohr dairesi tanımlanmaktadır. Arazi koşullarına göre farklı çevre basınçlarında birkaç deney (3 veya fazla) yapılarak birkaç Mohr dairesi elde edilip kayma-normal gerilme (τ - σ) eğrisinden kayma direnci parametreleri çıkarılmaktadır. Doygun zeminlerde, deney sırasında boşluk suyu basınçları drenaja izin verilmemesinden dağılmaz, hacim sabittir. Doygun olmayan zeminlerde ise hacim değişmektedir. Bu deneyde, toplam

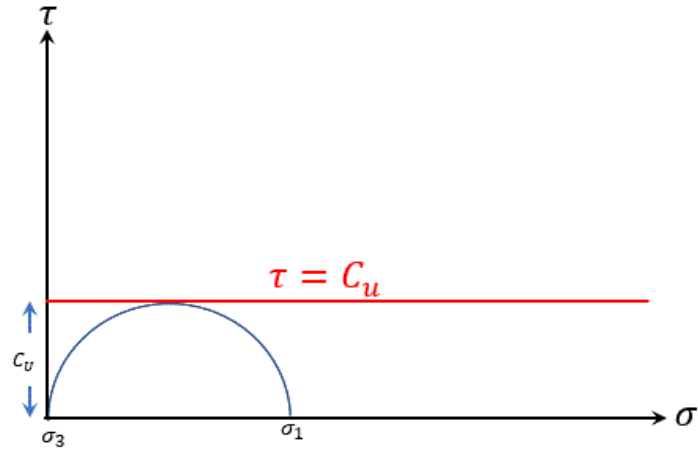
gerilmeyi dikkate alınarak " c_u " drenajsız kohezyon değerin elde edilmesi mümkündür. İçsel sürtünme açısı " ϕ " genellikle sıfır olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi yenilme zarfı yataydır. Bu deney genellikle, doymun kohezyonlu zeminler için yapılmaktadır. Deney sonuçları doymun ince daneli zeminlerde çevre basıncının etkisinden bağımsızken doymun olmayan zeminlerde çevre basıncı sonuçları etkiler.



Şekil 4.4. UU doymun zeminde Mohr daireleri ve yenilme zarfı.

4.5.1.2. Serbest basma deneyi (UCS)

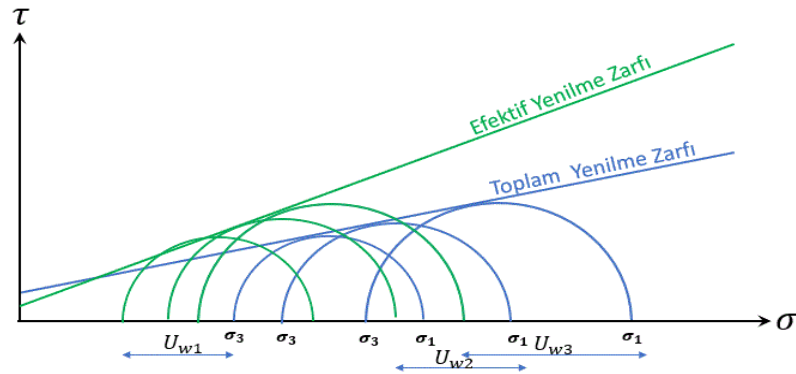
Bu deney türü konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyinin (UU) özel bir halidir. Bu deneyde, numunenin su ile bir teması olmadığından vanaların olup olmaması önemli değildir. Kısaca UU deneyinden tek fark çevre basıncının sıfır olmasıdır. Bu nedenle, Mohr çemberi orijinden başlar ve sadece bir Mohr çemberi elde edilir (Birden fazla deney olursa ortalama alınır). Teorik olarak UU deneyinden elde edilen c_u değeri serbest basma deneyinden elde edilen c_u ile aynı olmalıdır, ancak gerçek durum bu değildir, çevre basıncı etkisinden dolayı serbest basma deneyinden elde edilen c_u değeri UU deneyinden elde edilenden biraz daha düşüktür (Jackson ve Dhir, 1996). Burada da, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi yenilme zarfı yataydır.



Şekil 4.5. UCS deneyi Mohr dairesi ve yenilme zarfı.

4.5.1.3. Konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (CU)

Konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli hücre kesme deneyinde, zeminin çeşitli gerilmeler altındaki durumunu temsil etmek adına numuneye kesmeden önce konsolidasyon basıncı verilmektedir. Bu deneyin UU deneyinden en önemli farkı numunenin konsolidasyona bırakılması ve kesme sırasında boşluk suyu basıncı ölçümüdür. Dolayısıyla, kayma direnci parametreleri hem toplam gerilmeler cinsinden hem de efektif gerilmeler cinsinden elde edilebilmektedir (Şekil 4.6.).

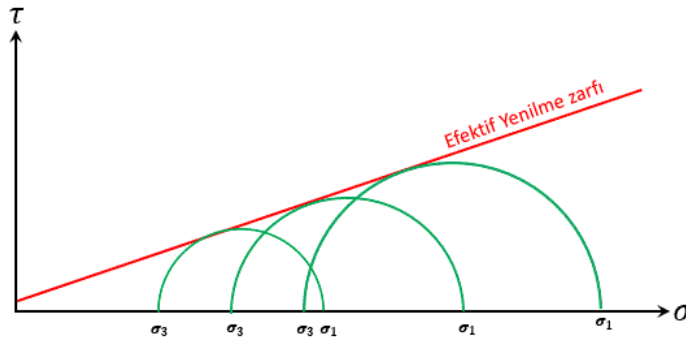


Şekil 4.6. CU deneyi toplam ve efektif Mohr yenilme zarfları.

4.5.1.4. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi (CD)

Konsolidasyonlu drenajlı (CD) deney, zeminin farklı gerilmeler altındaki durumunu yansıtmak adına numunenin kesmeden önce konsolide edildiği ve kesme sırasında drenaja müsaade edildiği üç eksenli hücre kesme deneyi çeşididir. Kesme sırasında ek boşluk suyu basınçlarının oluşmaması için çok yavaş kesme hızıyla yapılan bir deneydir. Bu nedenle tamamlanması zaman almaktadır. Bu deneyde boşluk suyu

basınçları ölçülmez. Dolayısıyla kayma direnci parametreleri sadece efektif gerilmeler cinsinden elde edilebilmektedir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. CD deneyi yenilme zarfları.

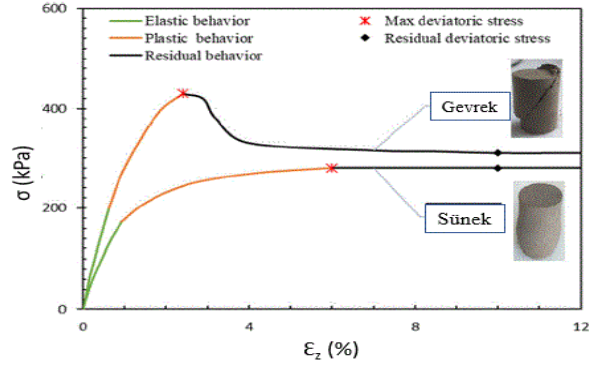
Sonuç olarak, üç eksenli hücre kesme deneyinde inşaat mühendisliği analizlerinde karşılaşılan kritik durumları temsil etmek üzere iki temel aşama vardır: Bunlar kesme öncesinde konsolidasyonun ve kesme sırasında drenajın olup olmadığıdır. Bu iki aşama Tablo 4.1’de özetlenmiştir.

Tablo 4.1. Üç eksenli deneyi konsolidasyon ve drenaj koşulları.

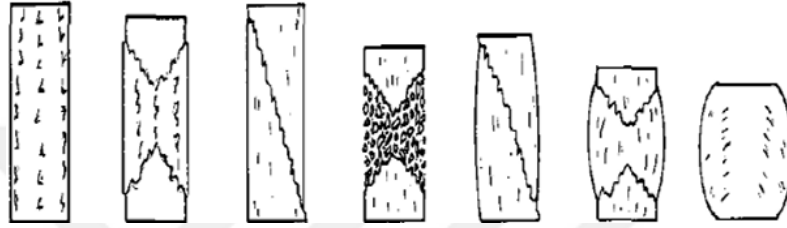
Kesmeden önce	Kesme sırasında	Sembol	Kayma direnç parametreleri
Konsolidasyon yok	Drenajsız	UU	C_u, ϕ_u
Konsolidasyon yok	Drenajsız	CU	C_u, ϕ_u, c', ϕ'
Konsolidasyon var	Drenajlı	CD	c', ϕ'

4.5.1.5. Göçme modları ve yenilme aşamaları

Bir gerilme altında bulunan zemin numunesinde diğer malzemelerde olduğu gibi, gerilme belli bir sınırı aştıktan sonra yenilme meydana gelmektedir. Yenilme durumu, zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine göre farklı şekilde gerçekleşebilir. Zeminlerde yenilme aşamaları ve farklı göçme şekilleri sırasıyla Şekil 4.8 ve 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Zemin yenilme aşamaları (Driss ve ark, 2023).



Şekil 4.9. Zemin göçme modları (Driss ve ark, 2023).

4.5.2. Arazi deneyleri

Bir zeminin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için, laboratuvar yanında sahada da deneyler yapılmaktadır. Killi zeminlerde drenajlı koşulları laboratuvarda temsil etmek daha kolaydır. İnce daneli zeminlerde drenajsız durumu incelemek için ve iri daneli zeminlerde hem drenajlı hem de drenajsız durumu temsilen laboratuvarda ve sahada iki ayrı şekilde olmak üzere deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Drenajsız kayma mukavemetinin ya doğrudan saha deneyleriyle ya da laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen ampirik ilişkiler ile belirlenmesi mümkündür. Geoteknik mühendisliği alanındaki arazi deneyleri olarak günümüzde en çok kullanılan deneyler şunlardır (Erol ve Çekinmez, 2014);

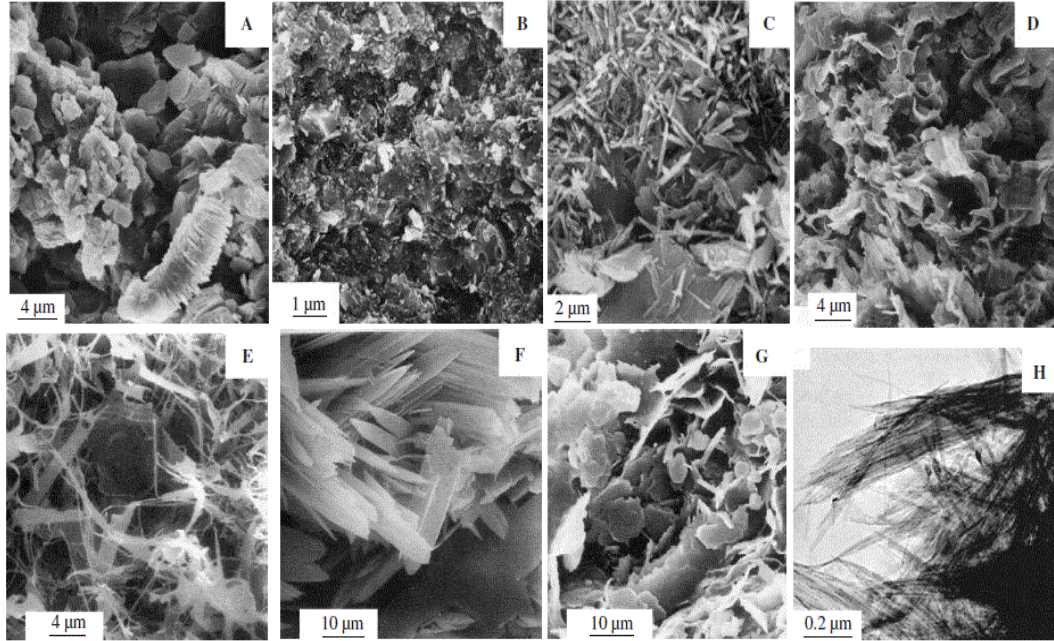
- Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)
- Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)
- Presiyometre Deneyi (PMT)
- Dilatometre Deneyi (DMT)
- Arazi Veyn Deneyi (FVT)



5. KİLLİ ZEMİNLER VE ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ

5.1. Killi Zeminler

Genel olarak kil mineralleri hidratlı alüminyum silikat veya hidratlı silikatlar olarak tanımlanırlar. Bazı türleri alüminyum (Al) yerine değişen miktarlarda magnezyum (Mg) veya demir (Fe) içerir (Özdemir ve ark, 2023). Kil minerali kavramı ve literatür geçmişi 1930'ların ortalarına kadar gitmektedir. Bu konseptte göre, killer temel olarak kil mineralleri olarak anılan küçük bir mineral grubunun mikrokristalin parçacıklarından oluşmaktadır. Şekil 5.1'de çeşitli parçacık morfolojisine sahip bazı kil minerallerinin transmisyon elektron mikrografları görüntüleri sunulmaktadır (Bergaya ve Lagaly, 2006).



Şekil 5.1. Çeşitli parçacık morfolojisine sahip bazı kil minerallerinin transmisyon elektron mikrografları görüntüleri (Bergaya ve Lagaly, 2006).

Kilin yapısı yapışkan ve plastik olduğu gibi, sıkıştırıldığında yapısındaki suyu dışarı atabilen, kurduğunda büzülen ve ıslandığında şişebilen ince daneli bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. BS410 standardına (1986) göre, ince daneli zeminlerin 0,02 mm'den daha küçük dane boyutuna sahip olanlarının mühendislik davranışı büyük

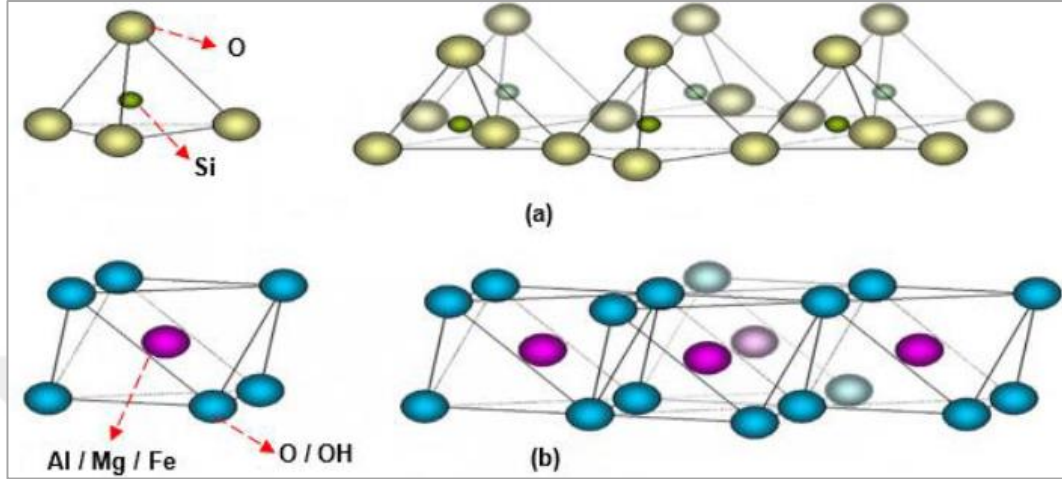
ölçüde içerdikleri suya (su muhtevası) bağlıdır. Kilin kıvamı, sadece içindeki su miktarı artırılarak çok katı kıvamdan viskoz sıvı kıvamına kadar geniş bir aralıkta değiştirebilir. Buna göre dayanım, yük-deformasyon ilişkisi ve sıkıştırma gibi mühendislik özelliklerindeki değişimler, en başta daneleri oluşturan minerallerin kristal yapısına, su içeriğine ve arazide bulunduğu gerilmelerin koşullarına bağlıdır. Zeminlerin mühendislik özellikleri, zemin boşlukları ve su içeriği kaynaklı kıvama bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir (Özaydın, 2016).

Başka bir kaynağa göre de kil; hidratlı magnezyum ve alüminyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir. Islatıldığında genel olarak hacim artışı göstermektedir. Kurutulduğu zaman ise hacmi azalır ve çoğunlukla çatlama görülür. Islakken çamur halinde şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahipken, pişirildiği zaman dayanımında büyük artışlar gösteren bir katıya dönüşmektedir. Kilin, başka minerallere göre en önemli farkı su ile karıştırıldığında çamur oluşturmastır (Önalp, 2018).

Kil, birçok geoteknik probleminin giderilmesinde kullanılmaktadır. Dolgu barajlarda ve çöp depolama sahası tabanında geçirimsizlik sağlama, gölet için su tutma ve kazı sırasında kendini koruyamayan zemin için viskoz çamur şeklinde etkin destek sağlama gibi amaçlarla kullanımı örnek olarak verilebilir. İri daneli zeminlere düşük oranda eklendiğinde bağlayıcı görevi görür, ancak kil aynı zamanda istenmeyen bir malzeme olarak da karşımıza çıkmaktadır (Önalp, 2018).

Kil mineralleri, kayaların fiziksel ve kimyasal parçalanması, ayrışması ve bozulmasıyla oluşan son derece ince levha benzeri kristal yapılardır (Tunç, 2002). Zeminlerin mühendislik özellikleri mineral yapılarına bağlıdır. Zeminlerin mineral bileşimine genel olarak bakıldığında iri zeminler (çakıl, kum) ve silt silikatlardan oluşurken kil ise kuvars minerallerindendir. Kil mineralleri, alümina-silikat hidratlardan ve diğer mekanik iyonlardan (magnezyum, demir, potasyum vb.) oluşmaktadır. Çok küçük kil mineralleri (boyut olarak 2 mikron veya daha küçük), X-ışınları (SEM, FE-SEM) veya termal analiz ile görülebilmektedir. Kil mineralleri Mg, Fe, Al, Si, O minerallerinin farklı katmanlarında farklı düzenlerde oluşmaktadır. Ayrıca bu katmanlar arasında zayıf veya güçlü bağlar oluşmakta ve katmanlar arasında su veya diğer iyonlar, özellikle Al ve Si minerallerinin katman sayısı ve dizilişi kil minerallerinin özelliklerini, yani katmanlar arasındaki bağ kuvvetini belirlemektedir (Cemil, 2007). Genel olarak, kil mineralleri iki farklı temel yapısından (Silika ve Alüminyum) oluşmaktadır. Şekil 5.2'den görülebileceği gibi birinci temel yapıda

tetragonal şeklinin ortasında bir tane Silika ve kenarlarında 4 Oksijen, ikincide ise Oktedragonal şeklinin ortasında bir tane Alüminyum ve kenarlarında 6 Oksijen bulunmaktadır (Jeffries, 1956; Özdemir ve ark, 2023). Bazı kil Mineralleri Tablo 5.1’ de gösterilmiştir.



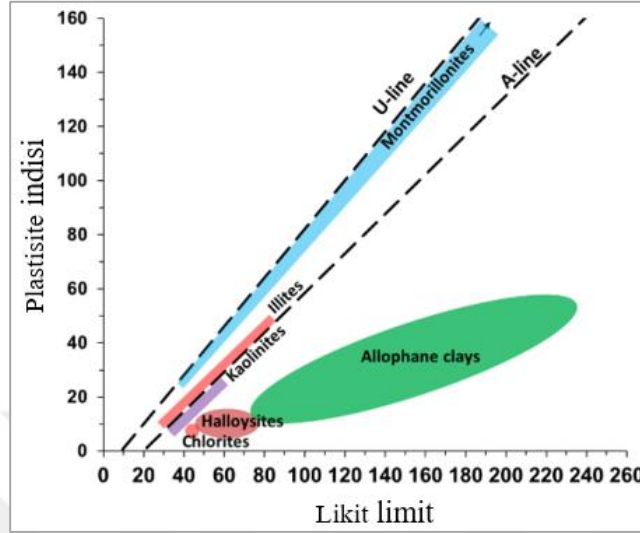
Şekil 5.2. (a) Silika Tetrahedron yapısı, (b) Alüminyum Oktahedron yapısı (Özdemir ve ark, 2023).

Tablo 5.1. Bazı kil minerallerinin ağırlığa göre kimyasal bileşimi (Bostancı, 2020).

Kil mineralleri (%)	Kaolinit	Montmorilloni Nontronit	İllit	Vermikülit	Klorit
SiO ₂	45-48	42-55	50-56	33-37	22-35
Al ₂ O ₃	40-38	0-28	18-31	7-18	12-24
Fe ₂ O	-	0-30	2-5	3-12	0-15
TiO ₂	-	0-0,5	0-0,8	0-0,06	-
CaO	-	0-3	0-2	0-2	0-2
MgO	-	0-2,5	1-4	20-28	12-34
K ₂ O	-	0-0,5	4-7	0-2	0-1
Na ₂ O	-	0-3	0-1	0-0,04	0-1

Şekil 5.3’te gösterildiği üzere, Casagrande plastisite kartında bazı kil mineralleri A çizgisinin üzerinde, bazıları ise A çizgisinin altındadır. Bunun nedeni, Halloysit ve Allofan gibi bazı kil minerallerinin, plastisite üretmede etkisiz hale getirecek şekilde

suyu tutabilmesidir (Okkels, 2019). Kil mineralleri Casagrande tarafından tanımlanmıştır. U çizgisi altında Montmorillonit bulunurken A çizgisinin üstünde illit ve altında ise Kaolinit bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Casagrande plastisite kartında kil mineralleri bölgeleri (Okkels, 2019).

Kil ve silt (ince daneli zeminler) birbirine benzese de onları birbirinden ayırmanın gözlemsel bir yolu vardır. Silt içeren zeminler suya atıldığında daha çabuk dağılırken kil daha yavaş dağılmaktadır. Bu nedenle, ıslak kil yavaş kururken ıslak silt çabuk kurumaktadır. Kil ve silti birbirlerinden ayırmak için plastisite kartını kullanmak gerekmektedir.

5.2. Zeminlerin İyileştirilmesi

Geoteknik mühendisliğinde en çok karşılaşılan problemlerden biri, genellikle yapıdan aktarılan gerilmeleri taşıyamayan zayıf zeminlerdir. Bununla birlikte, şehirlerin genişlemesiyle ve inşaat sahalarının yeterli olmaması nedeniyle, bu tür zeminlerin bulunduğu sahaların değerlendirilmesine önemli bir ihtiyaç vardır. Maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle, yüksek kaliteli malzemelerin kullanılması yerine mevcut zayıf zeminlerin iyileştirilmesi tercih edilmiştir. Ancak genel olarak, bu zeminlerin yüksek su muhtevaları veya düşük işlenebilirliği, inşaat projeleri için zorluklar oluşturmaktadır.

Zayıf olan bu zeminlerin mühendislik performansını iyileştirmek için çeşitli stabilizasyon yöntemleri ortaya çıkmıştır. Kolay uygulanabilirliği ve hızlı oluşu açısından katkı malzemeleri ile stabilizasyon bu yöntemler arasında oldukça yaygınlık

kazanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında yapıları güvenli ve ekonomik olarak inşa edilebilmek için sağlam bir zemin ortamı bulunması esastır. Aksi takdirde, sahada bulunan zemin koşullarının iyileştirilmesi gerekebilir. Başarılı bir zemin iyileştirme projesi için mühendislerin zemin davranışını bilmeleri, zemin-yapı etkileşimini anlamaları, çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulanabilirliği hakkında yorum yapabilmeleri ve ekipman ve maliyetler hakkında kapsamlı bir anlayışa sahip olmaları gerekir. Ayrıca mühendislik alanındaki tasarım ve uygulamada deneyim de önemli avantaj sağlayabilmektedir (Selçukhan ve Ekinci, 2021).

Zeminlerin kayma direnci parametrelerinin yükseltilebilmesi için kimyasal veya fiziksel yöntemlerin kullanılması zemin iyileştirmesi veya güçlendirmesi olarak tanımlanabilmektedir. Literatürde iyileştirme terimi, stabilizasyon, güçlendirme ve tedavi gibi farklı başlıklar altında tanımlansa da aynı amaçla uygulandığı düşünülmektedir (Arslan, 2021; Charles, 2002; Han, 2015). Zemin iyileştirme üç şekle ayrılabilir: zemin içerisinde değişik malzemeler kullanarak zemini güçlendirme (taş kolon, jet-grout, geosentetikler vb.), zemin içerisindeki boşlukların mekanik araçlarla azaltılması (kompaksiyon, vibroflotasyon) ve zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması (enjeksiyon, çimento, kireç vb.) (Keskin, 2015).

İyileştirme genel olarak, zeminin birim hacim ağırlığını, ısıl iletkenliğini, şişme veya büzülme davranışını, dane dağılım yapısını ve permeabilitesini değiştirmeyi ifade eden bir terimdir (Önalp ve Sert, 2016).

Son zamanlarda atık malzemeler zemin iyileştirmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerden kaynaklanan çevre kirliliği günümüzün ciddi sorunlarından biridir. İnşaat sektöründen kaynaklanan atık malzemelerin neden olduğu kirliliğin azaltılması amacıyla bu malzemelerin çeşitli alanlarda kullanılması konusunda birçok çalışma yapılmıştır (Vural, 2019).

5.2.1. Zemin iyileştirilmesinin amaçları

Zeminlerin iyileştirilmesinde, genel olarak aşağıdaki amaçlara ulaşılması hedeflenmektedir (Ural ve ark, 2020).

- Zeminin kayma direncini artırmak,
- Oturmaları minimize etmek,
- Konsolidasyonu hızlandırmak,

- Sıvılaşma riskini azaltmak,
- Şev ve dolguların stabilitesini sağlamak,
- İstinat duvarlarını sağlamlaştırmak.

5.2.2. Zemin iyileştirme yöntemleri

Bir zemin iyileştirme yöntemi seçilirken çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar; zemin tipi, yeraltı suyu durumu, hedeflenen iyileştirmenin türü, gerekli malzeme, ekipman ve işgücünün temini, proje ölçeği, iyileştirme maliyeti, inşaat programı, etrafındaki yapılar ve çevre koşullarıdır.

Sıkıştırma ile iyileştirme

Zemin sıkıştırma yöntemi, zeminin yüksek enerjili darbelerle sıkıştırılmasını veya zemine titreşimli çubukların gönderilmesini içerir. Zemin taşıma kapasitesini artırmak veya oturma potansiyelini azaltmak amacıyla inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu işlem zeminin özelliklerini değiştirerek daha sağlam bir temel oluşturmak amacıyla uygulanmaktadır. Sıkıştırma veya titreşim etkisi, zeminlerin dane boyutlarına bağlı olarak değişebilir. İnce daneli zeminlerde, sıkıştırma uygun görülürken iri danelerde titreşim tercih edilmektedir.

Katkı maddeleri ile iyileştirme

Zeminlerin içine değişik katkı maddeleri (Çimento, kireç, uçucu kül, bitüm ve fiber gibi) karıştırılarak bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Birden fazla mineral katkı maddesinin zemin boşluklarındaki su ile reaksiyona girmesi zemini güçlendirmeye veya geçirgenliğini azaltmaya yaramaktadır. Yeraltındaki kimyasal reaksiyonlar yaklaşık 1 yıl sürebilmektedir (Ekinci ve ark, 2020). Çimento stabilizasyonu kohezif zeminlerin kayma direnci özelliklerini arttırmak için iyi bir seçenek olup, birçok zemin iyileştirme tekniği arasında en çok kullanılan yöntemlerden biridir (Kılıç, 2008).

Zemin derinliğine göre iyileştirme

Zemin iyileştirme yöntemleri, uygulama derinliğine göre derin zemin iyileştirme ve yüzeysel zemin iyileştirme olarak ikiye ayrılabilir (Önalp ve Sert, 2016).

5.2.2.3.1. Yüzeysel iyileştirme

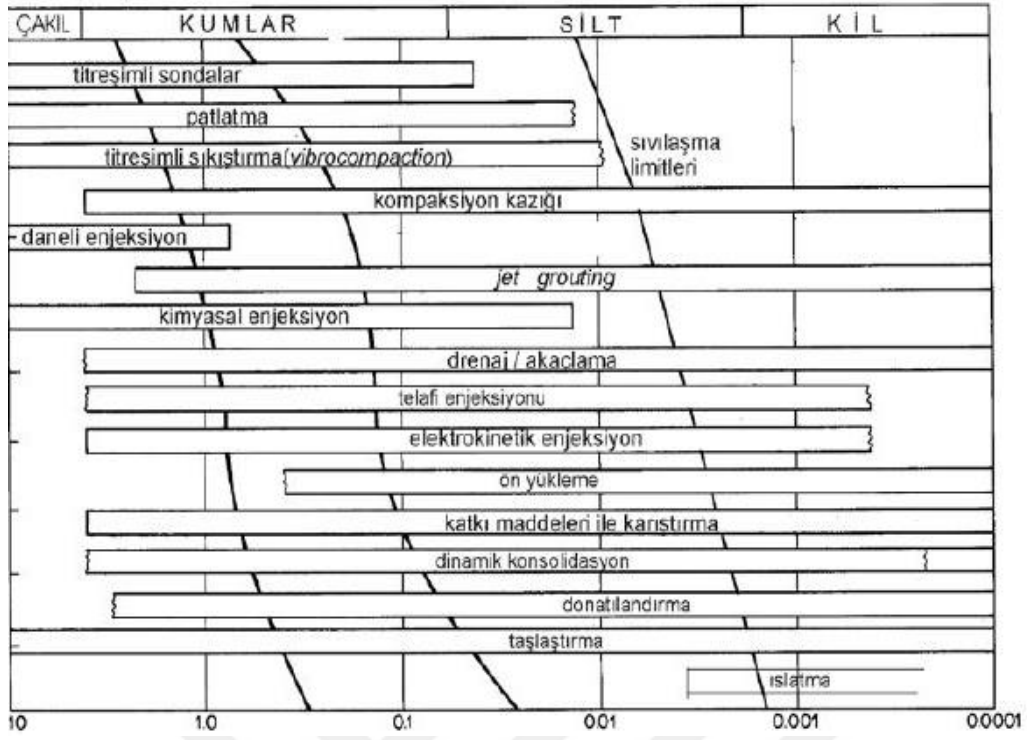
Derin zemin iyileştirme yöntemlerinin gerekli olmadığı durumlarda kullanılan yöntemdir (Önalp ve Sert, 2016). Genellikle üst yapı yükünün fazla olmadığı binalarda ve yolların yapımında kullanılır. Derin zemin iyileştirme ile karşılaştırıldığında maliyetinin daha düşük olması nedeniyle birçok yüzey zemin iyileştirme yöntemi ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerden bazıları zemine çeşitli katkı maddeleri eklenerek uygulanırken bazıları ise herhangi bir madde eklenmeden uygulanmaktadır.

5.2.2.3.2. Derin iyileştirme

Günümüzde, bilim ve teknolojinin gelişmesi ve bilimsel araştırmaların artmasıyla birlikte birçok derin zemin iyileştirme yöntemi ortaya çıkmıştır. Derin zemin iyileştirme için kullanılan yöntemler zemini oluşturan danelerin çapı ile ilgilidir. Temel derin zemin iyileştirme yöntemleri; dinamik sıkıştırma, titreşimli sıkıştırma, ön sıkıştırma, kum drenler, vakumla su emme, sıkıştırılmış kazıklar, kireç kazıkları, jet grout ve patlatma yöntemi şeklinde tanımlanabilmektedir.

Dane boyutlarına göre zemin iyileştirme

Zemin İyileştirme Teknik Komitesi tarafından oluşturulan sınıflandırmalar, zemin davranışındaki değişikliklere, kohezif ve kohezif olmayan zeminlerin farklı durumlarda nasıl tepki verdiğine ve katkı maddelerinin kullanılıp kullanılmadığına dayanmaktadır (Selçkhan ve Ekinci, 2021). Zeminlerin dane boyutuna göre iyileştirme yöntemlerinin uygulama kapsamı Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Zeminlerin dane boyutlarına göre iyileştirme yöntemleri (Mitchell, 1981).

6. MALZEMELER VE YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan doğal zeminin ve katkı maddelerinin (olivin ve kum) özellikleri, numunelerin karışımları, numunelerin hazırlanması ve deneylerin yapılması hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca deneylerin yapım yöntemleri de anlatılmıştır. İlk grup deneylerde doğal zemine katkı maddesi olarak olivin ve kum katılmış olup, katkı maddelerinin oranları kuru ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25'tir. Karşılaştırmalı bir çalışma yürütülmesi amacıyla olivinin dane dağılımına benzeyen bir kum kullanılmıştır. İkinci grup deneylerde ise, bu katkı maddelerine ilave olarak Potasyum hidroksit (KOH) gelmiştir. Potasyum hidroksit varlığında olivin ve kum, doğal zemine ilk seri deneylerdeki oranlarda ilave edilmiş ve 1 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 gün olarak belirlenen kür süreleri sonunda numunelerin kayma dirençlerinin değişimleri konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (UU) ile belirlenmeye çalışılmıştır.

6.1. Malzemeler

6.1.1. Doğal zemin

Bu çalışmada, Kocaeli (Türkiye) ilinden getirilen düşük plastisiteli killi bir zemin kullanılmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere alınan numune 4.75 mm açıklığa sahip elekten (No.4) geçirilmiştir. 40 No'lu elekten geçen kısım ile ise likit limit, plastik limit ve piknometre deneyleri yapılmıştır. %4 kum ve %96 ince daneli malzeme içeren doğal zemin, birleşik zemin sınıflandırma sistemine (ASTM D-4318) göre düşük plastisiteli kil (CL), TS 1500 (2000) standardına göre ise orta plastisiteli kil (CI) olarak sınıflandırılmıştır. Zeminin fiziksel özellikleri Tablo 6.1' de gösterilmektedir.

6.1.2. Olivin

Olivin malzemesi Türkiye'nin Elâzığ ilinde bulunan Yıldırım Holding fabrikasından atık bir malzeme olarak temin edilmiştir. Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) analizleri tarafından tespit edilen kimyasal özellikleri ve dane özgül ağırlığı Tablo 6.2' de verildiği gibidir. Temin edildiği durumda büyük partikül boyutlarına sahip olan olivin, zemin ile arasındaki kimyasal yüzey reaktivitesini arttırmak amacıyla zemine

eklenmeden önce daha küçük dane boyutlarına indirgenmiştir. Kimyasal bir değişikliğe izin verilmeden uygulanan boyut küçültme işlemi sonrasında 212 µm'lik elekten geçen malzemeler katkı malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tablo 6.1. Kil zeminin fiziksel özellikleri.

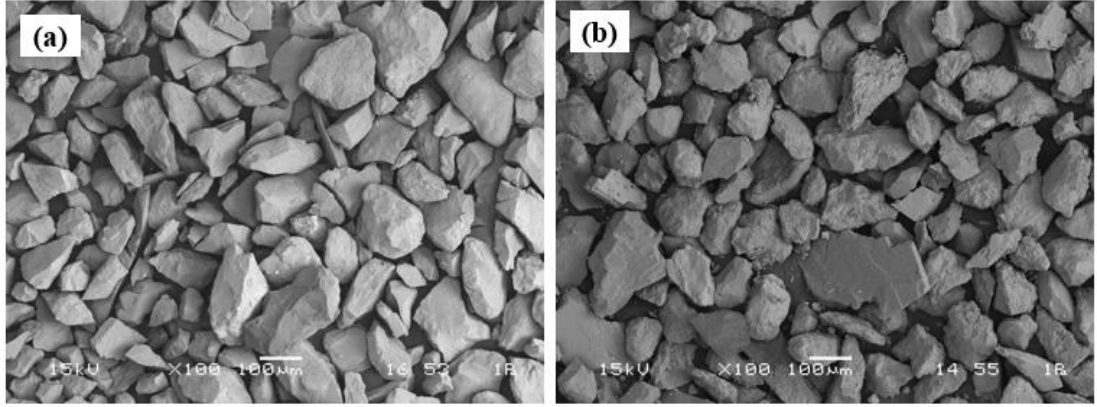
Özellik	Birim	Değer	Standard
İnce Dane Oranı (FC)	%	96	BS 410; 1986
Kil Dane Oranı (C)	%	8	BS 410; 1986
Likit Limit (LL)	%	39	ASTM D 4318; 2000
Plastik Limit (PL)	%	17	ASTM D 4318; 2000
Plastisite İndisi (PI)	%	24	ASTM D 4318; 2000
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık	kN/m ³	17,83	ASTM D 4647; 2006
Optimum Su Muhtevası (w _{opt})	%	17,50	ASTM D 4647; 2006
Dane Özgül Ağırlığı (Gs)	—	2,70	ASTM D 854; 2006

Tablo 6.2. Doğal zemin, olivin ve kumun kimyasal (EDS analizi) ve fiziksel özellikleri.

Özellik	Birim	Doğal zemin	Olivin	Kum
Mg	%	2,74	35,86	2,63
Si	%	28,19	24,58	30,92
O	%	39,10	35,77	40,25
Fe	%	4,77	3,79	11,41
K	%	1,85	-	0,96
Ca	%	6,94	-	3,08
Ti	%	0,57	-	0,77
C	%	3,40	-	0,46
Al	%	11,82	-	9,54
Yoğunluk	g/cm ³	2,70	3,30	2,70

6.1.3. Kum

İlk durumda silt içeriği fazla bir malzeme olan kum öncelikle 75 μm 'lik elek üzerinde yıkanarak ince dane oranı azaltılmıştır. Sonra olivinın dane dağılım eğrisine benzer sonuç veren bir kum haline getirilmek üzere ikinci aşamada, 212 μm 'lik elekten geçirilerek iri olan daneleri de ayrılmıştır. Sonuç olarak 212 μm boyutundan küçük danelere sahip bir kum elde edilmiştir. Deneylerde kullanılan olivin ve kuma ait danelerin SEM görüntüsü Şekil 6.1'de gösterilmektedir.

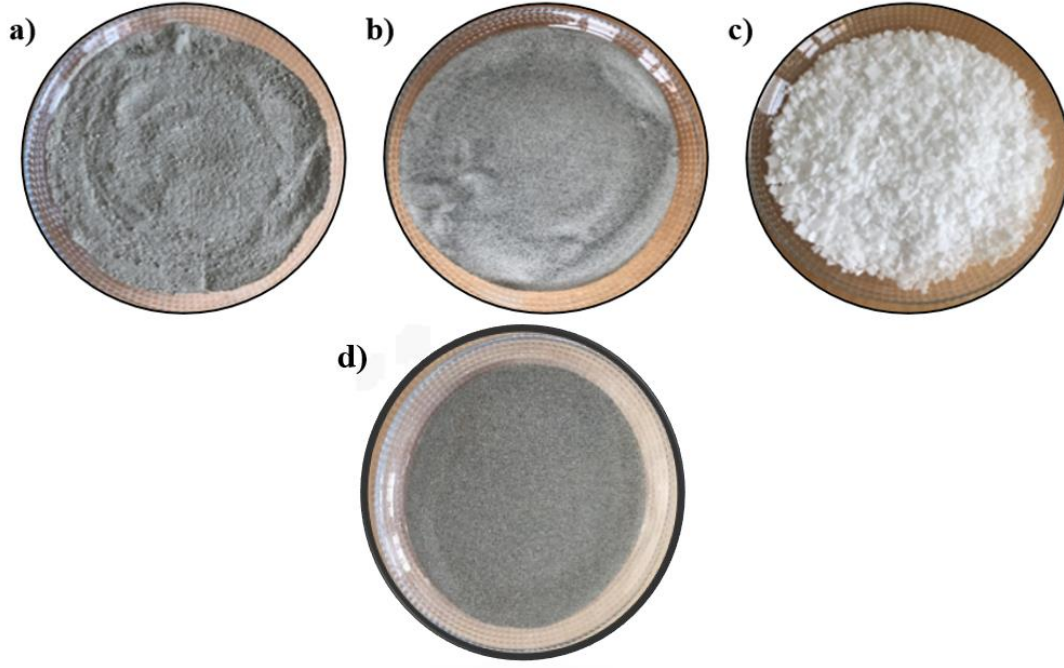


Şekil 6.1. Elek sonrası malzemelerin SEM görüntüsü, (a) olivin, (b) kum.

6.1.4. Potasyum hidroksit

Bu çalışmada, aktivatör olarak, iyi bilinen aktivitesi nedeniyle Potasyum hidroksit (KOH) seçilmiştir. Potasyum hidroksit, beyaz ile hafif sarı renkte ve küçük granül halinde bulunan alkali bir bileşiktir. Potasyum hidroksit, potasyum klorürün elektrolizinden elde edilmektedir. Su veya polar çözücülerle karıştırıldığında ekzotermik bir reaksiyon oluşmaktadır.

Çalışmada kullanılan tüm malzemelerin görüntüsü Şekil 6.2'de sunulmaktadır.



Şekil 6.2. Malzemeler, (a) zemin, (b) olivin, (c) potasyum hidroksit (KOH), (d) Kum.

6.2. Yöntem

Bu çalışmada kullanılan doğal zemin, olivin ve kuma ait karışım oranları Tablo 6.3’ te verilmiştir. Ayrıca karışımlar üzerinde yürütülen her bir deneyin hangi yöntemle yapıldığı açıklanmıştır. Zemin sınıflandırılması amacıyla yapılan elek analizi, plastik limit ve likit limit (Casagrande ve koni düşürme yöntemi) deneyleri yanında hidrometre ve piknometre deneyleri ile ilgili sonuçlar ortaya konmuştur. Öncelikle doğal zemin ve değişen yüzdelerde olivin veya kum (ağırlıkça: %10, %15, %20 ve %25) içeren numuneler üzerinde kompaksiyon deneyi yapılarak optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklar bulunmuştur. Değişen olivin veya kum yüzdelerine karşılık gelen optimum su muhtevaları dikkatine alınarak numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, farklı kür süreleri (1 gün, 14 gün ve 28 gün, 56 gün ve 90 gün) sonunda, farklı çevre basınçları altında (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyine (UU) tabi tutulmuş ve her bir numunenin kayma dayanımı belirlenmiştir. Olivin ve kum danelerinin ilavesinin Potasyum hidroksit varlığında ve yokluğunda zeminin kayma direncine yaptığı etkinin görülebilmesi amacıyla bu karşılaştırmalı çalışma yürütülmüştür. Son aşamada, salt Potasyum hidroksitin (KOH) etkisinin görülebilmesi amacıyla da, doğal zemine sadece KOH eklenerek hazırlanan numuneler aynı farklı

evre basınçları ve kr süreleri altında konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyine (UU) tabi tutulmuştur.

6.3. Çalışmanın Varsayımları

- Tüm karışım numuneleri, kendilerine ait optimum su muhtevalarıyla ve tek kalıpta hazırlanmıştır.
- Sıkıştırma enerjisi, Proctor enerjisi eřleniēidir.
- Numunenin uzunluēunun çapına oranı $2 \pm 0,1$ alınmıştır.
- Olivin ve kum yüzdeleri kuru aēırlıka %10, %15, %20 ve %25 alınmıştır.
- Potasyum Hidroksit (KOH), 10 molaritelik olarak hazırlanmıştır.
- Kr süresi: 1, 14, 28, 56 ve 90 gündür.
- Tüm numuneler, kr süresi boyunca, sabit ortam sıcaklıēında bekletilmiştir.
- Kayma direnci parametreleri, drenajsız durumda elde edilmiştir.

Tablo 6.3. Numunelerin karışım oranları.

N ⁰	Karışım Simgesi	Numune Tanımı	Kil Oranı (%)	Olivin Oranı (%)	Kum Oranı (%)	KOH Molarite (mol/L)
1	NS	Doēal zemin (kil)	100	-	-	-
2	NS-KOH	Doēal zemin (kil+KOH)	100	-	-	10
3	S-OL-10	%90 kil ve %10 olivin karışımı	90	10	-	-
4	S-OL-15	%85 kil ve %15 olivin karışımı	85	15	-	-
5	S-OL-20	%80 kil ve %20 olivin karışımı	80	20	-	-
6	S-OL-25	%75 kil ve %25 olivin karışımı	75	25	-	-
7	S-OL-KOH-10	KOH, %90 kil ve %10 olivin karışımı	90	10	-	10
8	S-OL-KOH-15	KOH, %85 kil ve %15 olivin karışımı	85	15	-	10
9	S-OL-KOH-20	KOH, %80 kil ve %20 olivin karışımı	80	20	-	10
10	S-OL-KOH-25	KOH, %75 kil ve %25 olivin karışımı	75	25	-	10
11	S-SA-10	%90 kil ve %10 kum karışımı	90	-	10	-
12	S-SA-15	%85 kil ve %15 kum karışımı	85	-	15	-
13	S-SA-20	%80 kil ve %20 kum karışımı	80	-	20	-

Tablo 6.3. (Devamı) Numunelerin karışım oranları.

N ⁰	Karışım Simgesi	Numune Tanımı	Kil Oranı (%)	Olivin Oranı (%)	Kum Oranı (%)	KOH Molarite (mol/L)
14	S-SA-25	%75 kil ve %25 kum karışımı	75	-	25	-
15	S-SA-KOH-10	KOH, %90 kil ve %10 kum karışımı	90	-	10	10
16	S-SA-KOH-15	KOH, %85 kil ve %15 kum karışımı	85	-	15	10
17	S-SA-KOH-20	KOH, %80 kil ve %20 kum karışımı	80	-	20	10
18	S-SA-KOH-25	KOH, %75 kil ve %25 kum karışımı	75	-	25	10

S: Doğal zemin, NS: %100 Doğal zemin, OL: Olivin, SA: Kum, KOH: Potasyum hidroksit.

6.4. Deneyler

6.4.1. Sınıflandırma deneyleri

Zemin problemlerini çözmek için, bir zeminin sınıflandırılması ilk adımdır. Zeminlerin sınıflandırılmasında, karşımıza iki ana grup çıkmaktadır. Bu iki grup zemin mekaniğinde iri ve ince daneli zeminler olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, sınıflandırma için TS1500/2000 ve ASTM D-4318 standartları kullanılmıştır.

Kullanılan zeminin sınıflandırılmasına yönelik olarak kıvam limitlerini ve dane dağılım oranlarını belirlemek için doğal zemin üzerinde likit limit ve plastik limit deneyleri, elek analizi ve hidrometre deneyleri yürütülmüş, ayrıca özgül ağırlığın tayini için piknometre deneyleri yapılmıştır.

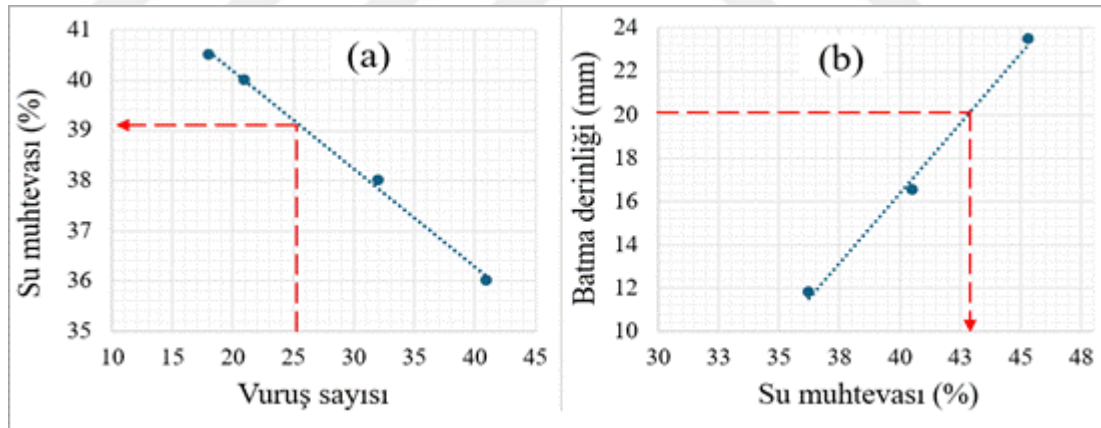
6.4.1.1. Likit limit ve plastik limit deneyleri

Atterberg limitleri deneyleri, zemin numunelerinin likit limit ve plastik limit değerlerini bulmayı ve ince daneli numuneleri sınıflandırmayı hedeflemektedir. Likit limit, plastik zeminin akışkan duruma geçtiği andaki su içeriğidir. Daneler arası yapışma ve çekme özelliği olmayan kum ve çakıl gibi iri daneli zeminlerde bu özellik görülmemektedir. Zeminin likit limiti, iki yaygın yöntemle (Düşen koni penetrasyon yöntemi ve Casagrande yöntemi) belirlenebilir (Şekil 6.3. ve Şekil 6.4.). Casagrande yönteminde, açılan 2 mm genişlikteki oluğun 13 mm boyunca 25 vuruşta kapanmasını

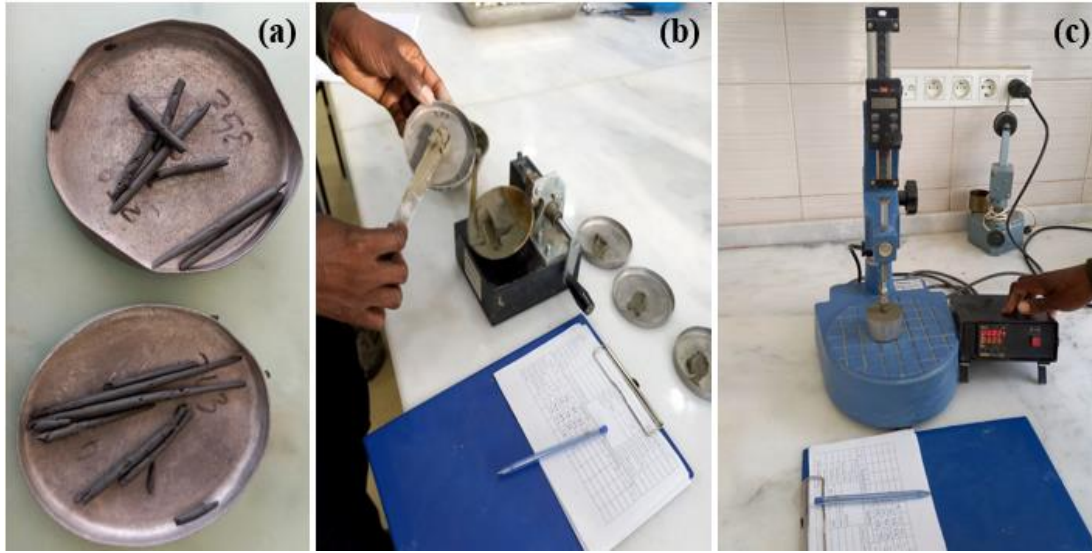
sağlayan su muhtevası likit limit olarak tariflenir. Düşen koni yönteminde ise, 20 mm penetrasyona karşılık gelen su muhtevası likit limit olarak verilmektedir.

Plastik limit, kohezif zeminlerde yoğurma sırasında numune yüzeyinde çatlakların oluştuğu andaki su muhtevası olarak tanımlanmıştır. Numuneyi 3 mm kalınlığa getirene kadar buzlu camın üzerinde yuvarlama işlemleri devam eder, bu sırada numunede çatlamanın oluşup oluşmadığına bakılır. Eğer 3 mm çapa inmiş numunede çatlama yoksa, yuvarlama işlemine numune çatlayana kadar devam edilir. 3 mm kalınlığına inen numunede çatlak tespit edildiğinde numune tartılır, ağırlığı deney kağıdına yazılır ve etüve bırakılır. 24 saat sonra tekrar tartılarak su muhtevası hesaplanır. Bu hesaplanan su muhtevası plastik limit olarak belirlenmiş olur. Bu çalışmada iki deney yapılarak ortalama değer alınmıştır.

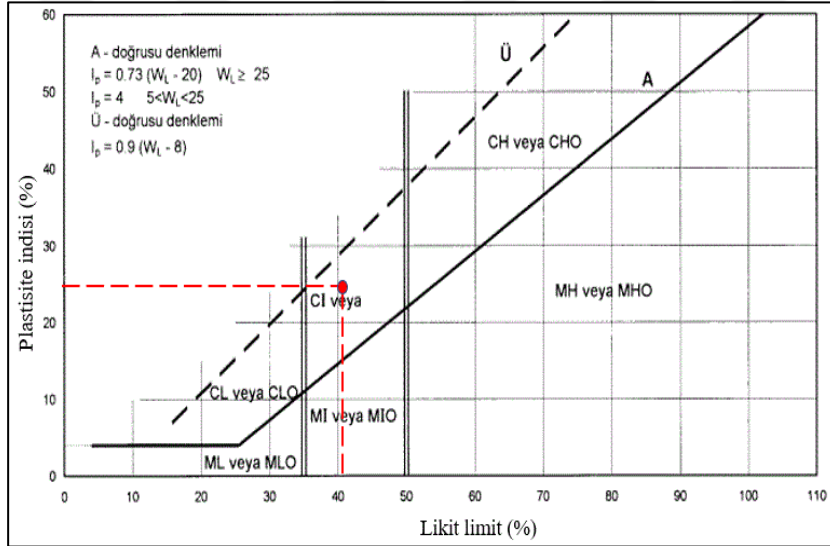
Tez çalışmasında kullanılan zemin ince daneli olduğundan sınıflandırma için plastisite kartına bakılmıştır. Likit limit, 35 ile 50 arasında ve plastisite indisi 24 olduğundan deneylerde kullanılan kil orta derecede plastik olarak kabul edilmektedir. Şekil 6.5'te gösterildiği gibi plastisite kartı yardımıyla zemin sınıfının TS100 (2000)'e göre orta plastisiteli kil (CI) olduğu bulunmuştur.



Şekil 6.3. Likit limit tayini, (a) Casagrande yöntemi, (b) Düşen koni yöntemi.



Şekil 6.4. Kıvam limiti deneyleri, (a) Plastik limit, (b) Casagrande likit limit, (c) Düşen koni likit limit.

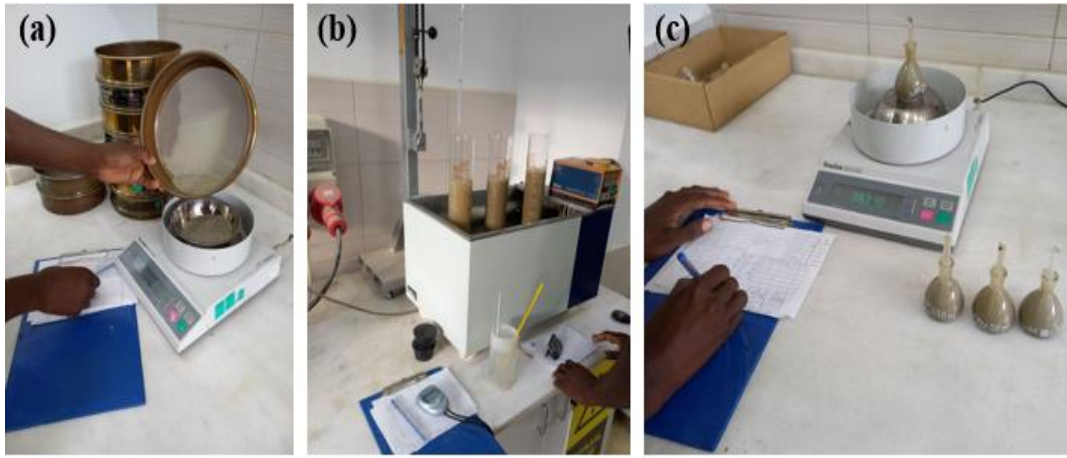


Şekil 6.5. Plastisite kartında zemin bölgesi gösterimi.

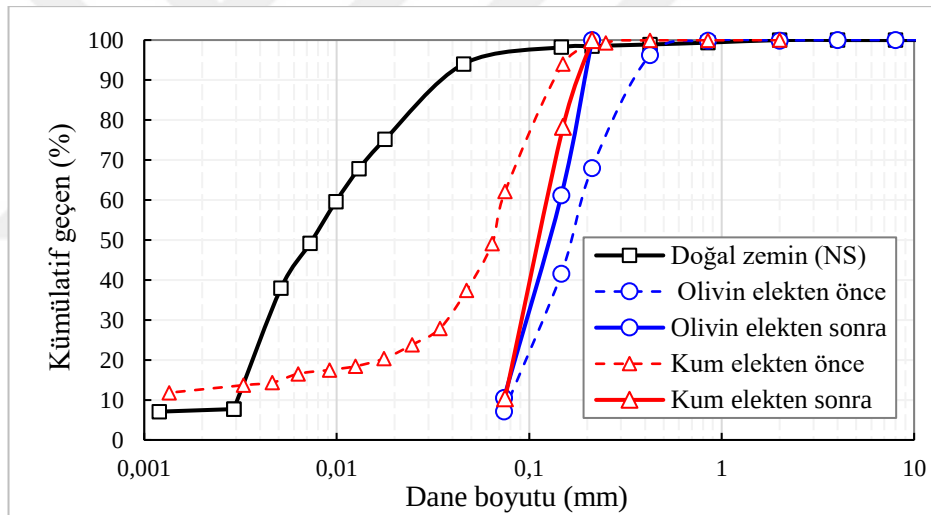
6.4.1.2. Elek, hidrometre ve piknometre deneyleri

Elek analizi, bir malzemenin dane boyutu dağılımını belirlemek için kullanılan bir laboratuvar deneyidir. Bu deney, malzemedeki farklı boyutlardaki danelerin oranlarını belirlemek için yapılmaktadır. Numuneler, bir dizi elekten geçirilir ve dane boyutu dağılımı, her bir elek üzerinde kalan malzemenin ağırlığı ölçülerek hesaplanır. Hidrometre deneyi ise küçük boyutlu zeminler için ($D < 0,075$ mm) su içinde (çöktürme analizi) yapılan bir deneydir. Burada, kil ve silt oranlarını ayırmak için yapılmıştır. Piknometre deneyi, zeminin özgül ağırlığının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Deneylere ait görseller Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Şekil 6.7'de ise eleme öncesi ve

sonrasında olivin ve kuma ait olan dane dağılım eğrileri doğal zeminin dane dağılım eğrisi ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Numune üzerinde deneyler: (a) Elek analizi, (b) Hidrometre deneyi, (c) Piknometre deneyi.



Şekil 6.7. Doğal zemin, olivin ve kumun dane boyutu dağılım eğrileri.

6.4.2. Kompaksiyon deneyi

Kompaksiyon, zeminin tabakalar halinde serilmesi ve içindeki boşlukların sıkıştırılarak azaltılması işlemidir. Bu çalışmada, ilk önce karşılaştırma amacıyla klasik Proctor ve Proctor'un eşdeğeri olan Harvard minyatür kompaksiyon aleti ile doğal zemin üzerinde sıkıştırma uygulanmıştır. Sonrasında karışımlardan hazırlanan numuneler sadece Harvard minyatür kompaksiyon aleti kullanılarak sıkıştırılmıştır. Harvard minyatür kompaksiyonda, her numune için optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlemek için 600 gr numune alınmış ve

numuneler farklı oranlarda su (%5, %10, %15 ve %20) ile homojen duruma gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra karışım, dört eşit tabaka oluşturacak şekilde kalıba yerleştirilmeye çalışılmıştır. Sıkıştırma esnasında, standart Proctor enerjisine denk gelecek şekilde kalıbın hacmi esas alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, 1.51 kg ağırlığındaki tokmak 310 mm yükseklikten her bir tabakaya serbest bir şekilde düşürülerek 10 vuruş uygulanmıştır. Dördüncü tabakada ise sıkıştırmanın efektif olabilmesi açısından yaka takılarak son 10 vuruş tamamlanmıştır. Toplam 40 vuruş tamamlandıktan sonra sıkıştırılan numunede gerekli ölçümler yapılmıştır. Optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının tespiti amacıyla farklı su muhtevalarında da aynı işlemler uygulandıktan sonra aynı prosedür olivin ve kum katkılı karışımlar için tekrar edilmiştir. Şekil 6.8, 6.9 ve 6.10’ da sırasıyla doğal zemin, olivin katkılı zemin ve kum katkılı zemine ait kompaksiyon deney sonuçları gösterilmektedir. Kompaksiyon hesaplama aşamaları, Denklem (6.1), Denklem (6.2), Denklem (6.3) ve Denklem (6.4)’deki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\left(\frac{kN}{m^3}\right) = \frac{M_{(Kalıp+numune)}(gr) - M_{(Kalıp)}(gr)}{V_{(Kalıp)}(cm^3)} * 9.81 \quad (6.1)$$

$$w (\%) = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (6.2)$$

$$\frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{(Kap+yaş numune)} - M_{(Kap+kuru numune)}}{M_{(Kap+kuru numune)} - M_{(Kap)}} \quad (6.3)$$

$$\gamma_k \left(\frac{kN}{m^3}\right) = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (6.4)$$

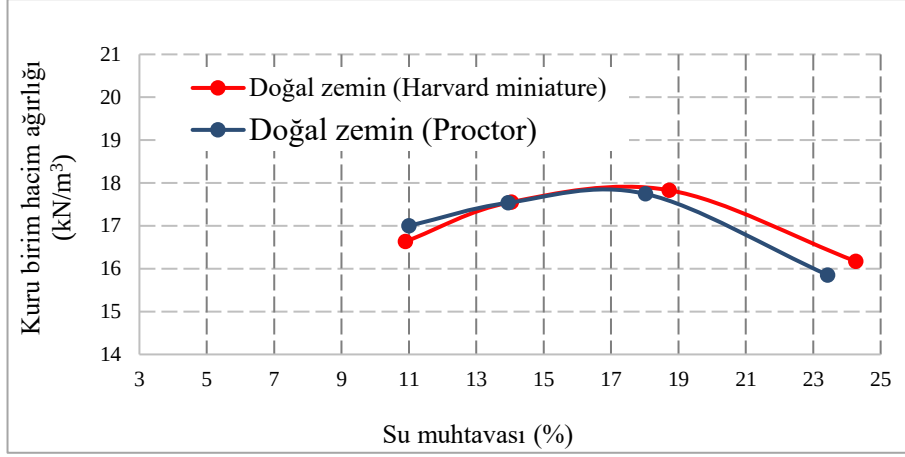
γ_n : Zeminin yaş birim hacim ağırlığı

γ_k : Zeminin yaş birim hacim ağırlığı

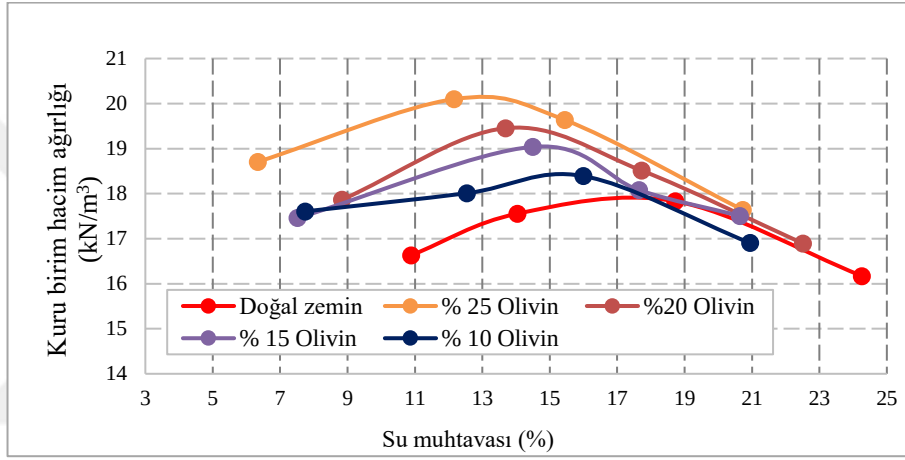
w: Su muhtevası

M_w : Zeminin içindeki su kütlesi

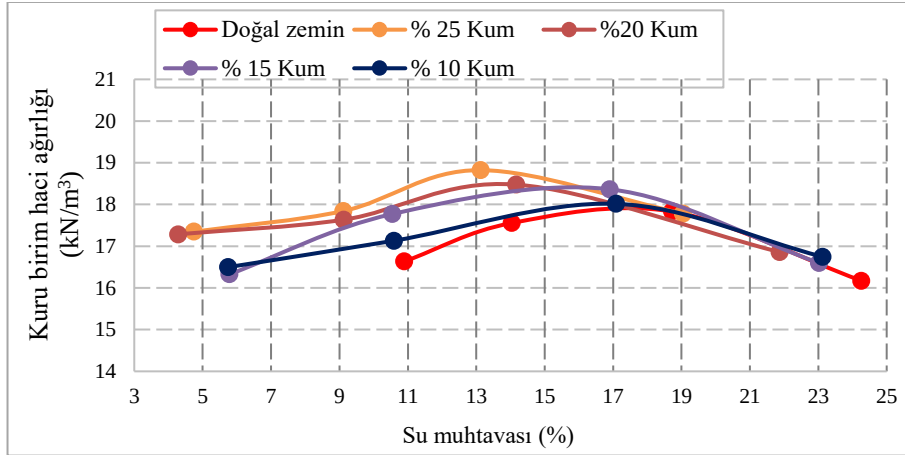
M_s : Daneilerin kütlesi



Şekil 6.8. Doğal zemin kompaksiyon eğrisi.



Şekil 6.9. Olivin katkısının kompaksiyona etkisi.



Şekil 6.10. Kum katkısının kompaksiyona etkisi.

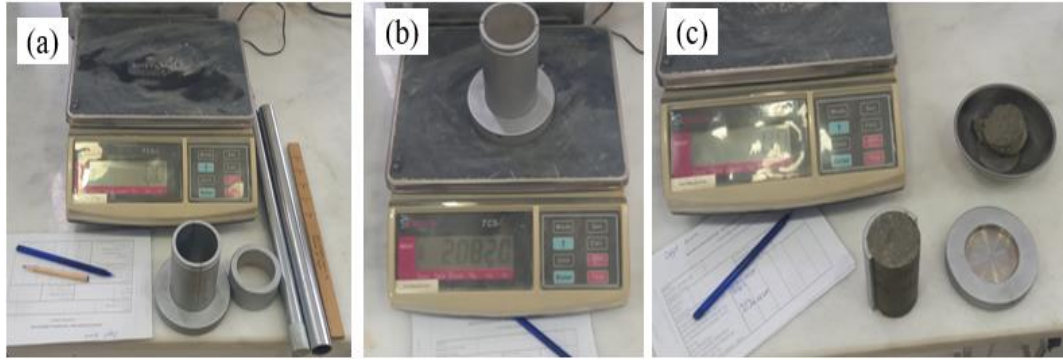
Harvard minyatür kompaksiyon enerjisi uygulandığında olivin ve kum oranları artıkça maksimum kuru birim hacim ağırlıkları yükselirken optimum su muhtevaları azalmakta ve buna bağlı olarak zeminin mukavemeti artmaktadır. Olivin katkılı

karişımlarda olivin oranı arttııkça (ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25) doğal zemin numunelere kıyasla, kuru birim hacim ağırlıktaki (MDD) artış sırasıyla %2,97, %6,78, %9,14 ve %12,73 ve optimum su muhtevalarındaki (OWC) azalma sırasıyla %8,57, %14,29, %20 ve %25,71 olmuştur. Kum katkılı karişımlarda ise, doğal zemin numunelere kıyasla farklı kum yüzdeleriyle (ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25) kuru birim hacim ağırlıktaki (MDD) artış sırasıyla %1,07, %2,97, %3,65 ve %5,55 ve optimum su muhtevalarındaki (OWC) azalma sırasıyla %2,86, %8,57, %20 ve %25,71 olmuştur. Kompaksiyon deneylerine ait sonuçlar Tablo 6.4'te sunulmuştur.

Tablo 6.4. Kompaksiyon deneyi verileri.

Numune	Olivin oranı (%)	Kum oranı (%)	OWC (%)	MDD (kN/m ³)	OWC'daki Azalma (%)	MDD'daki artış (%)
NS	-	-	17,5	17,83	-	-
S-OL-10	10	-	16	18,39	8,57	3,14
S-OL-15	15	-	15	19,04	14,29	6,79
S-OL-20	20	-	14	19,46	20,00	9,14
S-OL-25	25	-	13	20,10	25,71	12,73
S-SA-10	-	10	17	18,02	2,86	1,07
S-SA-15	-	15	16	18,36	8,57	2,97
S-SA-20	-	20	14	18,48	20,00	3,65
S-SA-25	-	25	13	18,82	25,71	5,55

Genel olarak MDD'deki artışın sebebi, olivinin hem yüksek özgül ağırlığı (3,3) hem de partikül boyutları ile açıklanabilmektedir. Kumda ise, özgül ağırlık (2,7) doğal zeminin özgül ağırlığına eşit olduğu için değişim sadece partikül boyutları ile açıklanabilmektedir. Olivin ve kirecin kompaksiyona etkilerinin incelendiğinde benzer bir çalışmada, kireçli numunelerde kuru birim hacim ağırlıklarının doğal zeminden daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir (Emmanuel ve ark, 2019). Bu düşüşün sebebi, boşlukları dolduran düşük yoğunluklu kireçtir. OWC'deki azalma, olivin ve kumun doğal zemine kıyasla daha düşük su emme kapasitesinden kaynaklanmaktadır. (Emmanuel ve Anggraini 2020; Fasihnikoutalab ve ark, 2017).

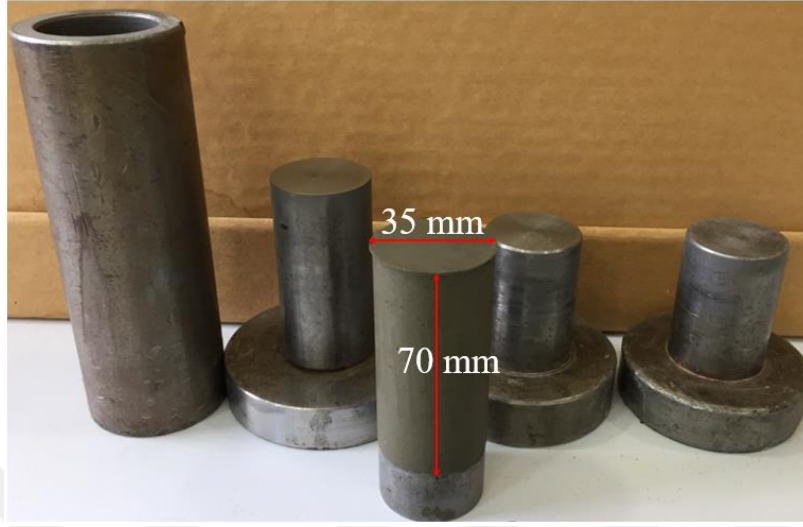


Şekil 6.11. Harvard minyatür kompaksiyon aleti: (a) Parçalar, (b) Sıkıştırılmış numune tartımı, (c) Su muhtevası numunesi alınması.

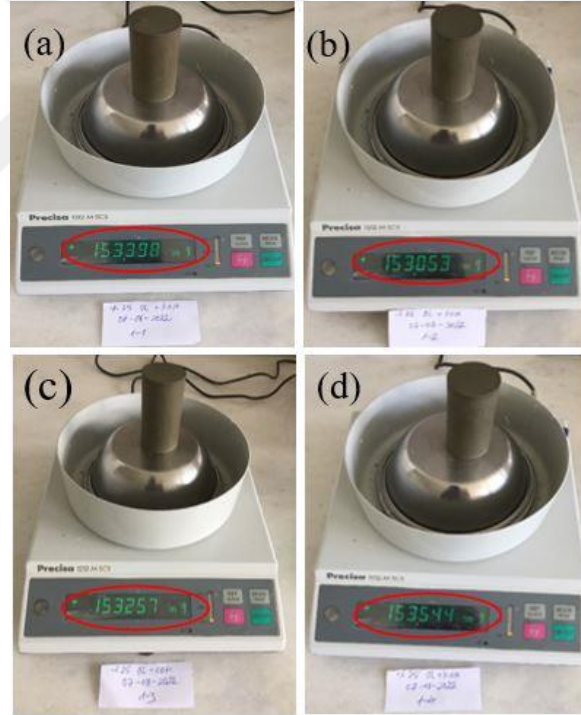
6.4.3. Karışımların bileşimi ve numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada, doğal kil, olivin ve kum ile karıştırılmış kil ve olivin + KOH ile karıştırılmış kil numuneleri üzerinde deneyler yapılmıştır. “NS” ile işaretlenmiş karışımlar doğal zemin numunelerini, “S-OL” ile işaretlenmiş karışımlar zemin ve sadece olivin ile işlenmiş numuneleri, “S-OL-KOH” ile işaretli olanlar ise olivin ve potasyum hidroksit (KOH) ile işlenmiş numuneleri temsil edilmektedir. Kompaksiyon deneyi sonucunda doğal kil ve her bir karışım için elde edilen farklı maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerleri esas alınarak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, doğal zeminin kum veya olivin ile karıştırılarak KOH aktivasyonlu ve aktivasyonsuz olmak üzere hazırlanmasıyla iki farklı grupta incelenmiştir. Ayrıca numuneler 1, 14, 28, 56 ve 90 gün olmak üzere farklı kür sürelerinde sabir sıcaklıktaki bir ortamda bekletilmişlerdir. Yürütölmüş çalışmalara göre (Bondar ve ark., 2011; Cristelo ve ark, 2012), numunelerde kullanılacak KOH konsantrasyonu 10 Molarite olarak belirlenmiştir. Karışımlar, çapı 3.5 cm ve yüksekliği de 7 cm olan bir özel kalıp içerisinde kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su muhtevaları dikkate alınarak hazırlanmıştır (Şekil 6.12.). Bu kalıbın seçilme sebebi numunelerin birbirine eşdeğer olarak hazırlanabilmesi ihtimalinin Proctor yöntemiyle hazırlananlara göre daha yüksek olmasıdır. Şekil 6.13’te hazırlanan numunelerin birbirine çok yakın ağırlıkta olduğu görülebilmektedir. Ayrıca numune doğrudan deney numunesi boyutunda numune veren kalıp içine sıkıştırıldığından örselenme etkisi de ortadan kaldırılmıştır. Bu kalıbın hacmi küçük olduğundan, standart Proctor enerjisinin sabit kalması adına ve tabaka sayısının 1’de tutulmasından dolayı, vuruş sayısı 25’ten 6’ya düşürülmüştür.

$$E \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Tokmak ağırlığı (kg)} * \text{düşüş mesafesi (m)} * \text{tabaka sayısı} * \text{vuruş sayısı}}{\text{Kalıbın hacmi (m}^3\text{)}} \quad (6.5)$$



Şekil 6.12. Özel kalıpla numune sıkıştırılması.



Şekil 6.13. Eşdeğer numune ağırlıkları (a) 153,398 g, (b) 153,053 g, (c) 153,257 g, (d) 153,544 g.

Alkali aktivatör (KOH), 10 Molariteli bir konsantrasyonda damıtılmış su içinde çözüldükten sonra hazırlanan solüsyon, olivin ve zemin karışımına eklenmeden önce soğumaya bırakılmıştır. Aktivasyonlu olarak test edilecek numunelere (S-OL-KOH, S-SA-KOH ve NS-KOH), optimum su muhtevaları kadar solüsyon sıvısı eklenerek

karişımlar sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Aktivasyonsuz olarak test edilecek numuneler ise, doğal zemin, olivin ve doğal zemin, kum ve doğal zemin (NS, S-OL, S-SA) karişımlarının optimum su muhtevaları dikkate alınarak sıkıştırılmıştır. Başlangıçtaki su muhtevalarında herhangi bir değişiklik olmaması için, numuneler kr süresi boyunca, plastik bir saklama kutusunda bekletilmiş ve daha öncesinde iki adet plastik torbaya konulmuştur. Tüm numuneler, kr süresi boyunca ortam sıcaklığında kürlenmiştir. şekil 6.14'te bu süreç fotoğraflarla gösterilmektedir.

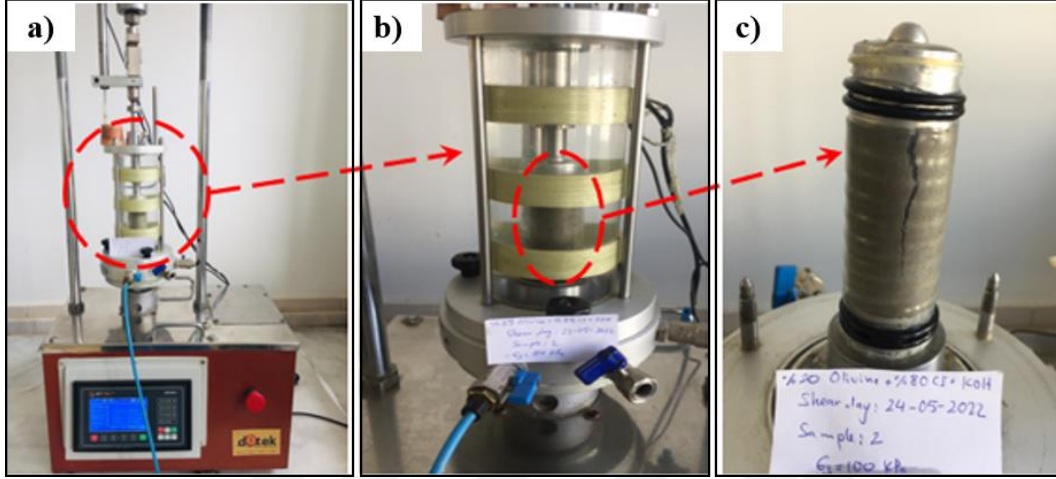


şekil 6.14. Numunelerin hazırlama prosedürü: (a) Numunenin olivinle karişımı, (b) Potasyum hidroksit zltisinin hazırlanması, (c) Elektrikli kariştırıcı ile kariştırma, (d) Numunenin hazırlanması (e) Numunelerin muhafaza edilmesi.

6.4.4. Üç eksenli hücre kesme deneyi (UU)

Üç eksenli hücre kesme deneyi (UU), zeminlerin konsolidasyonsuz drenajsız kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için uygulanan bir deneydir. Bu parametreleri belirlemek için, bir numunenin vre basıncı katkısıyla göçmeden dayanabileceği en büyük düşey gerilme seviyesine ulaşması gerekmektedir. Bu çalışmada, bütün numuneler üzerinde UU deneyi yapılmıştır. İlk olarak, doğal zemin numuneleri 100

kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa çevre basınçlarında ve 0.8 mm/dk kesme hızında UU deneylerine tabi tutulmuştur. Daha sonra farklı kür sürelerinde bekletilmiş (1 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 gün), olivin/kum ve zemin karışımları için aktivatörlü ve aktivatörsüz deneyler yine aynı çevre basınçlarında yürütülmüştür. Şekil 6.15'te UU deney cihazı ve bir deney numunesine ait görüntüler sunulmuştur.



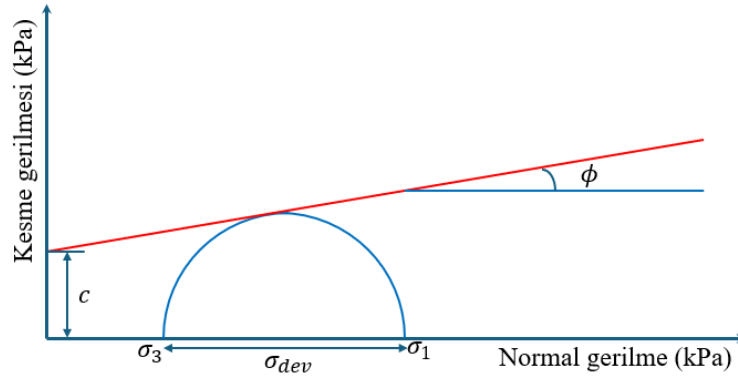
Şekil 6.15. UU deneyi; a) Test cihazı, b) Deney numunesi, c) Yenilme anı.

Bu deney sonucunda drenajsız kayma direnci Denklem (6.6)'daki gibi hesaplanır:

$$\tau_f = c_u + \sigma \tan \phi_u \quad (6.6)$$

Denklemde τ_f : drenajsız kayma direnci, σ : normal toplam gerilme, c_u : kohezyon, ϕ_u : kayma mukavemeti açısı olmaktadır. Birinci terim, daneler arasındaki elektriksel çekim gücü, ikinci terim ise danelerin arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Drenajsız kayma direnci parametreleri herhangi bir zemin için, arazideki zeminin durumuna ve yükleme şartlarına göre değerlendirilmelidir. Bu çalışmada, hızlı yükleme yapılmış, drenajsız şartlar uygulanmıştır.

Bu deneyde, malzemenin içindeki kesme kuvvetlerini ölçmeye yönelik bir deviatör gerilme hesaplandıktan sonra Mohr daireleri çizilerek kayma direnci parametreleri elde edilmektedir (Şekil 6.17).



Şekil 6.16. Mohr-Coulomb yenilme kriterinden kayma direnci parametreleri elde edilmesi.

Üç eksenli hücre kesme deneyinde (UU) büyük asal gerilme denklem (6.7), denklem (6.8), denklem (6.9), denklem (6.10) ve denklem (6.11)'deki gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_1 (kPa) = \sigma_3 + \sigma_{dev} \quad (6.7)$$

$$\sigma_{dev} (kPa) = \frac{P}{A} \quad (6.8)$$

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (6.9)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.10)$$

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6.11)$$

σ_1 (kPa): Büyük asal gerilme

σ_3 (kPa): Küçük asal gerilme

σ_{dev} (kPa): Deviator gerilme

P (kN): Numune üzerine uygulanan yük

A (m²): Numune kesit alanı

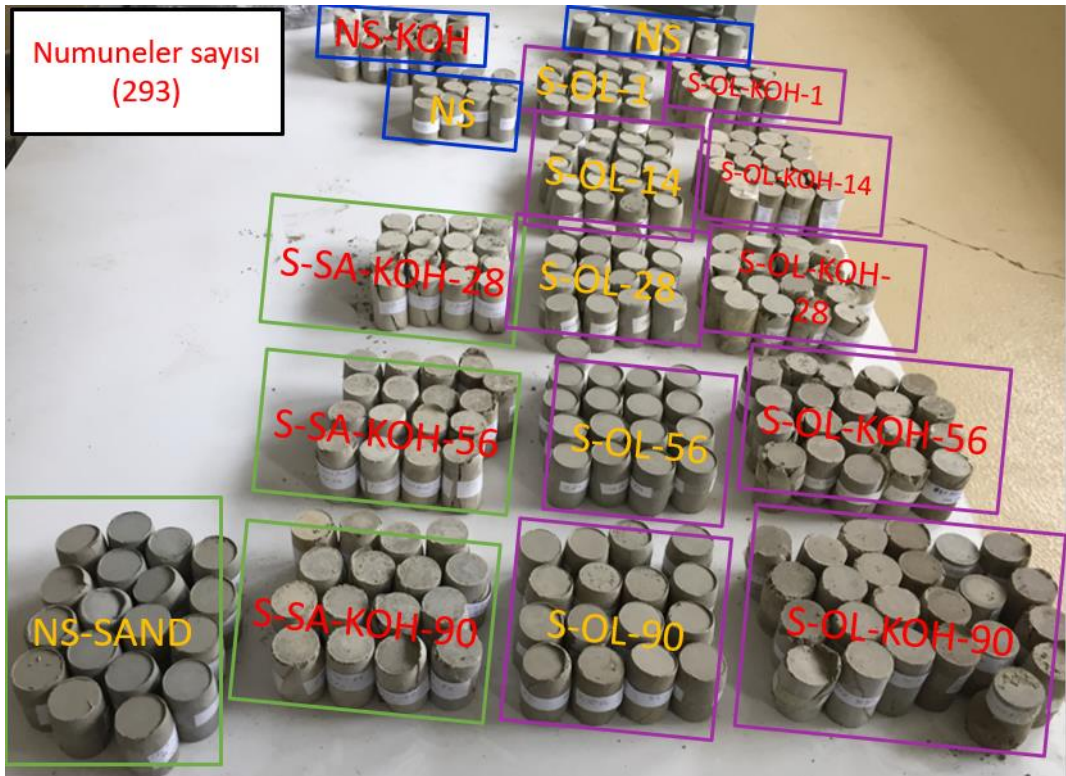
A₀ (m²): Numune ilk alanı

ε (birimsiz): Düşey şekil değiştirme

L_0 (m): Numune ilk uzunluğu

D (m): Numune ilk çapı

Bu tez çalışmasında toplam 293 adet numuneye ait deney sonucu değerlendirilmiştir. Üzerinde UU deneyi yapılan tüm numunelerin toplu gösterimi Şekil 6.17’ de sunulmuştur.



Şekil 6.17. UU deneyi yapılan tüm numunelerin toplu görüntüsü.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Olivin ile işlenmiş düşük plastisiteli killi bir zemin hem KOH aktivasyonlu hem de aktivasyonsuz olmak üzere iki farklı durumda deneylere tabi tutulmuştur. Öncelikle düşük plastisiteli bir kilin drenajsız kayma dayanımının arazi koşullarının temsili açısından farklı çevre basınçları etkisi altında belirlenmesi hedeflenmiştir. Ek olarak, iyileştirme sürecinin hızlandırılması amacıyla potasyum hidroksit (KOH) bir aktivatör malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda, kullanılan zeminin stabilizasyonu için farklı oran (%10, %15, %20 ve %25) ve kür süresi (1 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 gün) altında deneylerin yürütülmesi amaçlanmıştır. Bu aşamada, aktivatör etkisinin görülebilmesi için, potasyum hidroksitin (KOH) hem yokluğunda hem de varlığında deneyler yürütülmüştür. İkinci aşamada, iyileştirme etkisinin sadece olivin danelerine özgü bir durum olup olmadığını görebilmek için, olivin daneleri ve olivine eşdeğer dane dağılımına sahip bir kum arasında karşılaştırmalı bir çalışma da ek olarak yapılmıştır. Üçüncü aşamada, potasyum hidroksitin (KOH) bir aktivatör mü yoksa stabilizatör mü olduğunun değerlendirilmesi için doğal zemine sadece potasyum hidroksit (KOH) eklenerek numuneler hazırlanmış ve diğerleriyle aynı kür süreleri dikkatine alınarak deneyler yapılmıştır. Drenajsız kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi için farklı 4 çevre basıncı (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) altında üç eksenli hücre kesme deneyleri (UU) yürütülmüştür.

7.1. Birinci Aşama

7.1.1. Deviatör gerilmeler ve şekil değiştirmelerin değerlendirilmesi

Doğal zemin (NS), olivin ile işlenmiş zemin (S-OL) ve olivin + KOH ile aktifleştirilmiş zemin (S-OL-KOH) numuneleri üç farklı kombinasyondan oluşmaktadır. Bu aşamaya ait deney sonuçları Tablo 7.1, Tablo 7.2 ve Şekil 7.1'den Şekil 7.14'e kadar gösterilmektedir.

Tablo 7.1. Doğal zemin ve olivin katkılı numunelerde maksimum deviatör gerilmeler.

		$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa		$\sigma_3=400$ kPa		$\sigma_{d,max}$ (Ort) (kPa)
	Kür (gün)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	
Numune	1	169	18,59	179	17,14	184	17,17	173	19,94	176,25
NS	1	198	20,00	189	20,00	207	20,00	198	20,00	198,00
S-OL-10	14	213	19,97	218	17,14	305	15,69	281	20,00	254,25
	28	235	20,00	243	15,64	267	15,64	273	15,71	254,50
	56	279	15,71	278	17,14	284	20,00	288	20,00	282,25
	90	226	18,57	319	18,57	231	18,57	300	20,00	269,00
	1	225	20,00	256	18,57	220	20,00	239	20,00	235,00
S-OL-15	14	285	18,54	312	20,00	316	17,14	314	14,28	306,75
	28	234	17,06	235	14,40	249	20,00	234	14,18	238,00
	56	260	18,47	276	19,91	294	19,77	292	19,83	280,50
	90	261	14,22	353	18,65	318	18,57	288	20,00	305,00
	1	246	20,00	251	20,00	270	20,00	350	20,00	279,25
S-OL-20	14	293	17,14	327	18,57	339	17,14	357	19,97	329,00
	28	262	15,71	283	15,71	282	17,19	264	14,34	272,75
	56	365	20,00	371	17,14	370	17,24	383	20,00	372,25
	90	327	20,00	320	12,85	317	18,57	373	18,57	334,25
	1	399	20,00	380	20,00	382	20,00	379	20,00	385,00
S-OL-25	14	332	17,14	372	17,14	416	18,57	453	19,52	393,25
	28	385	15,67	401	15,64	323	18,57	373	15,67	370,50
	56	368	17,14	409	19,94	403	20,00	385	19,94	391,25
	90	407	14,34	424	20,00	440	20,00	442	18,57	428,25
	1	259	7,10	302	7,08	307	7,14	327	11,36	298,75
S-OL-KOH-10	14	293	4,97	310	5,68	297	5,68	319	5,68	304,75
	28	553	4,26	551	4,29	566	2,84	581	4,25	562,75
	56	811	2,50	936	2,85	1000	2,84	1006	2,84	938,25
	90	808	4,27	893	4,29	960	4,30	1022	4,27	920,75

Tablo 7.1. (Devamı) Doğal zemin ve olivin katkılı numunelerde maksimum deviatör gerilmeler.

Numune	Kür (gün)	$\sigma_3=400$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_{d,max}$ (Ort) (kPa)
		$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	
S-OL-KOH-15	1	234	9,97	273	9,96	287	12,80	299	14,22	273,10
	14	306	4,97	332	4,97	322	5,68	344	4,97	326,00
	28	439	2,84	741	2,85	710	2,81	761	2,12	662,75
	56	884	2,13	1050	2,84	1011	2,85	1023	2,85	992,00
	90	851	2,86	1008	4,27	1112	4,26	1111	4,27	1020,5
S-OL-KOH-20	1	287	6,27	331	8,1	359	7,13	404	7,36	345,25
	14	403	5,14	449	5,71	483	7,14	517	7,14	463,00
	28	645	2,14	775	2,82	877	2,84	852	4,26	787,25
	56	1050	2,82	1226	4,11	1258	2,84	1321	4,12	1213,75
	90	810	3,56	921	4,27	1065	4,27	1114	4,27	977,78
S-OL-KOH-25	1	360	5,68	388	6,11	440	7,10	439	5,71	406,75
	14	423	4,29	501	4,29	505	4,00	503	3,56	483,00
	28	722	2,14	786	1,85	877	2,86	936	2,14	830,25
	56	755	4,29	876	4,76	971	5,71	1057	4,28	914,68
	90	843	2,84	1055	2,83	1100	2,85	1218	4,24	1054,36

Tablo 7.2. Olivinli numunelerin maks. deviatör gerilme artış oranı (%) ve kayma direnci parametreleri.

Numune	Kür (gün)	Çevre basıncı (kPa)				c_u (kPa)	ϕ_u (°)
		100	200	300	400		
NS	1	-	-	-	-	88	0
S-OL-10	1	17,16	5,59	12,50	14,45	99	0
	14	26,04	21,79	65,76	62,43	127	0
	28	39,05	35,75	45,11	57,80	128	0
	56	65,09	55,31	54,35	66,47	141	0
	90	33,73	78,21	25,54	73,41	134	0

Tablo 7.2. (devamı) Olivinli numunelerin maks. deviatör gerilme artış oranı (%) ve direnci parametreleri.

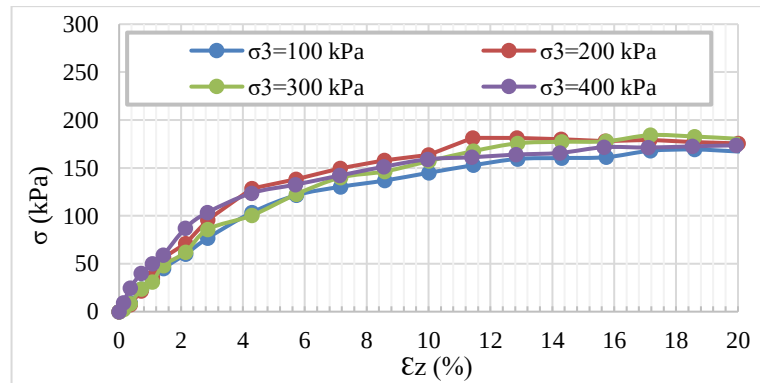
Numune	Kür (gün)	Çevre basıncı (kPa)				c _u (kPa)	φ _u (°)
		100	200	300	400		
S-OL-15	1	33,14	43,02	19,57	38,15	118	0
	14	68,64	74,30	71,74	81,50	156	0
	28	38,46	31,28	35,33	35,26	119	0
	56	53,85	54,19	59,78	68,79	140	0
	90	54,44	97,21	72,83	66,47	153	0
S-OL-20	1	45,56	40,22	46,74	102,31	100	6,84
	14	73,37	82,68	84,24	106,36	122	6,16
	28	55,03	58,10	53,26	52,60	136	0
	56	115,98	107,26	101,09	121,39	186	0
	90	93,49	78,77	72,28	115,61	145	4,29
S-OL-25	1	136,09	112,29	107,61	119,08	193	0
	14	96,45	107,82	126,09	161,85	128	9,2
	28	127,81	124,02	75,54	115,61	185	0
	56	117,75	128,49	119,02	122,54	196	0
	90	140,83	136,87	139,13	155,49	190	3,14
S-OL-KOH-10	1	53,25	68,72	66,85	89,02	125	3,72
	14	73,37	73,18	61,41	84,39	140	1,72
	28	227,22	207,82	207,61	235,84	240	4,19
	56	379,88	422,91	443,48	481,50	300	14,21
	90	378,11	398,88	421,74	490,75	290	15,37
S-OL-KOH-15	1	38,19	52,32	56,23	72,68	100	5,71
	14	81,07	85,47	75,00	98,84	146	3,09
	28	159,76	313,97	285,87	339,88	190	15,28
	56	423,08	486,59	449,46	491,33	320	14,21
	90	403,55	463,13	504,35	542,20	300	17,22

Tablo 7.2. (Devamı 2) Olivinli numunelerin maks. deviatör gerilme artış oranı (%) ve kayma direnci parametreleri.

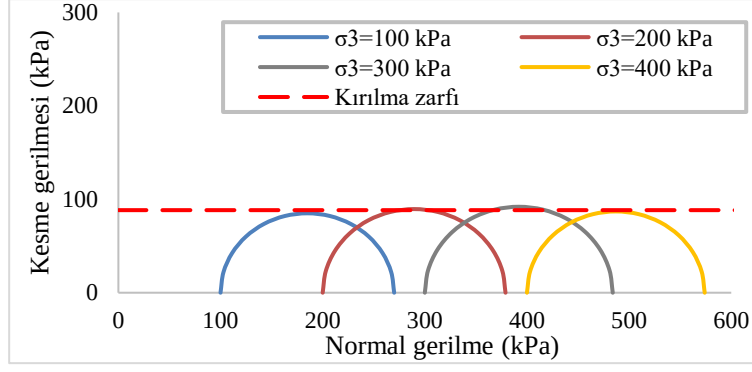
Numune	Kür (gün)	Çevre basıncı (kPa)				c_u (kPa)	ϕ_u (°)
		100	200	300	400		
S-OL-KOH-20	1	69,82	84,92	95,11	133,53	110	8,53
	14	138,46	150,84	162,50	198,84	150	10,20
	28	281,66	332,96	376,63	392,49	200	17,57
	56	521,30	584,92	583,70	663,58	340	19,63
	90	379,46	414,55	479,06	544,14	270	18,78
S-OL-KOH-25	1	113,02	116,76	139,13	153,76	143	8,08
	14	150,30	179,89	174,46	190,75	170	9,09
	28	327,22	339,11	376,63	441,04	255	15,11
	56	346,59	389,36	427,45	511,27	240	19,12
	90	399,06	489,61	498,05	604,17	270	20,56

Deviatör gerilme değerlerinin düşmeye başladığı anda veya şekil değiştirme %20'ye ulaştığında kırılma meydana geldiği kabul edilerek elde edilen deviatör gerilmeler ve onlara karşılık gelen kırılma şekil değiştirme oranları her deney için Tablo 7.1'de verilmiştir. Tablo 7.2'de ise katkılı numunelerin doğal numunelere göre maks. deviatör gerilme artış oranları (%) ve kayma direnci parametreleri sunulmuştur.

NS numunelerde kırılma anında şekil değiştirme %17,14 ile %19,94 arasında ve maksimum deviatör gerilmeler 169 kPa ve 184 kPa arasında bulunmaktadır. Kırılma yüzeyi gözlemlenmemiş ve numuneler sünek davranış göstermişlerdir.

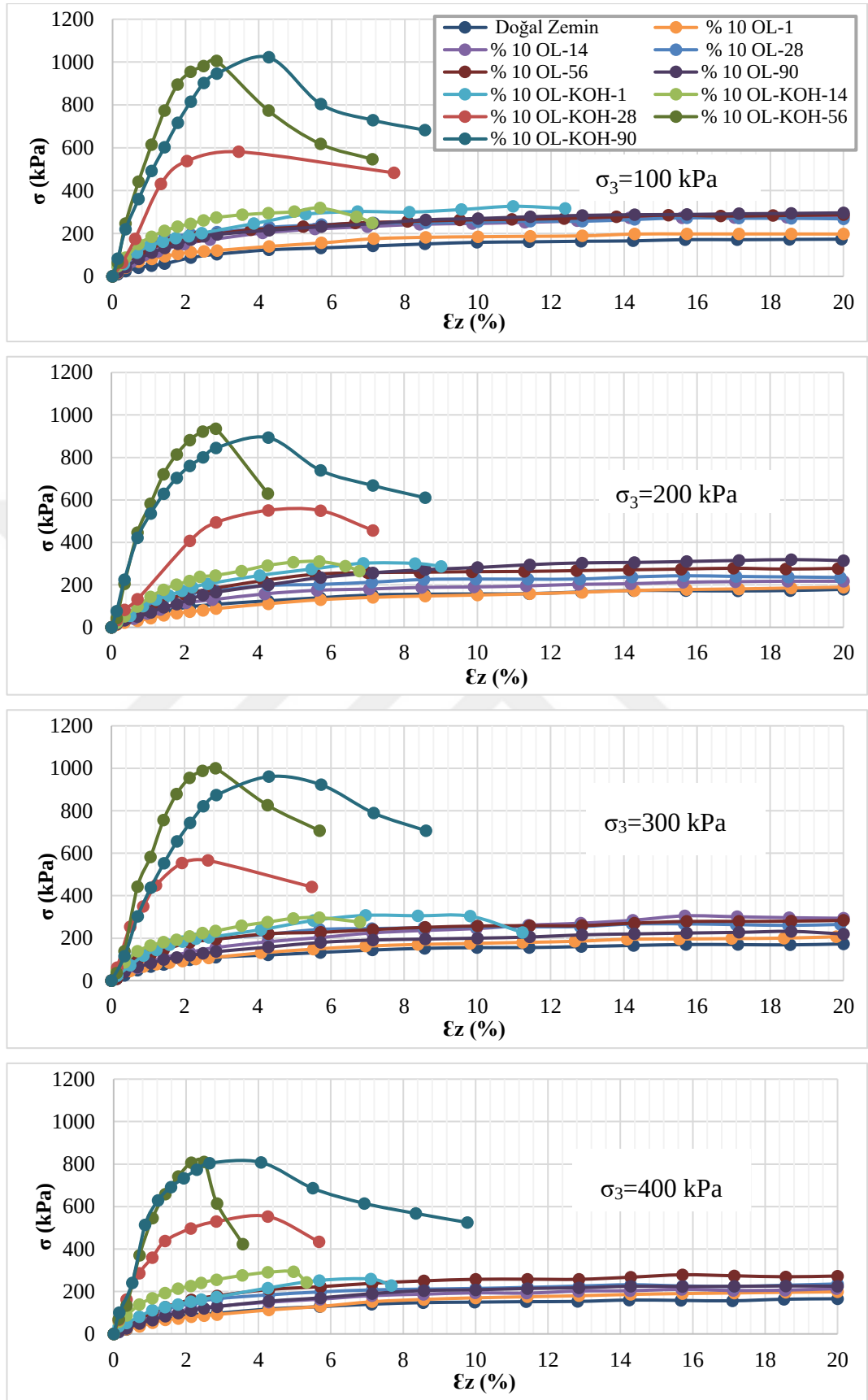


Şekil 7.1. Doğal zeminde gerilme-deformasyon eğrileri.



Şekil 7.2. Doğal zemin yenilme zarfları.

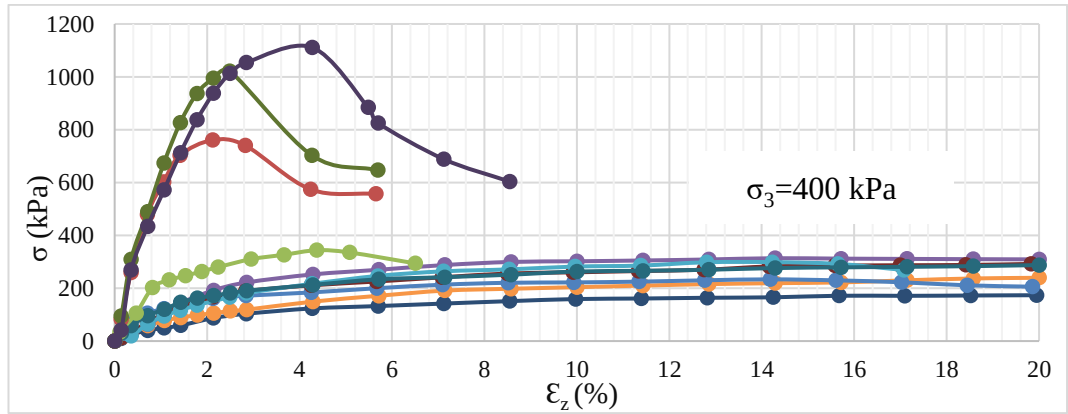
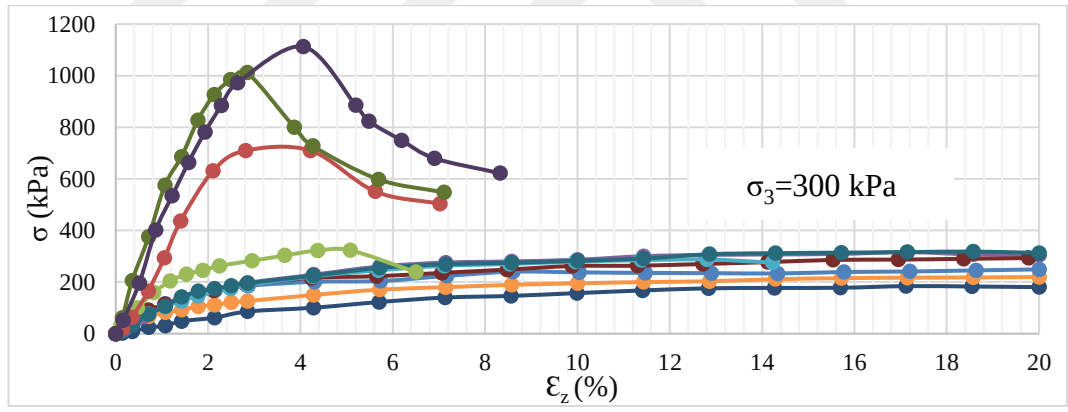
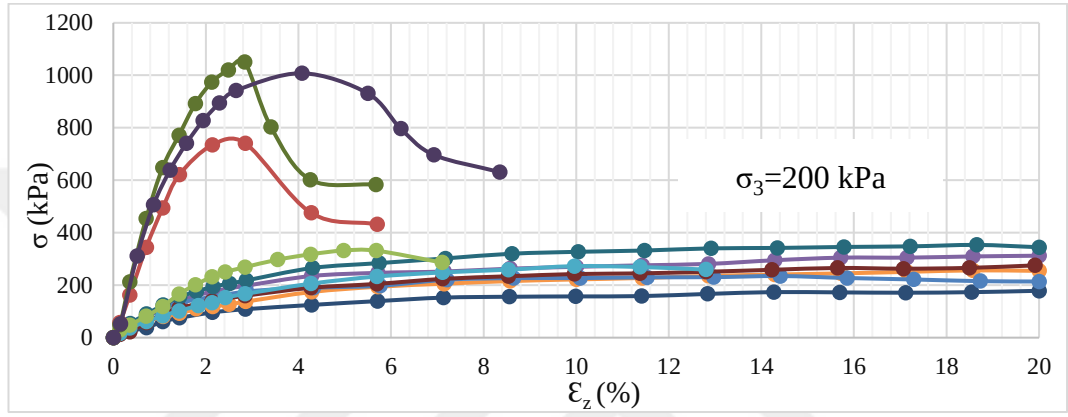
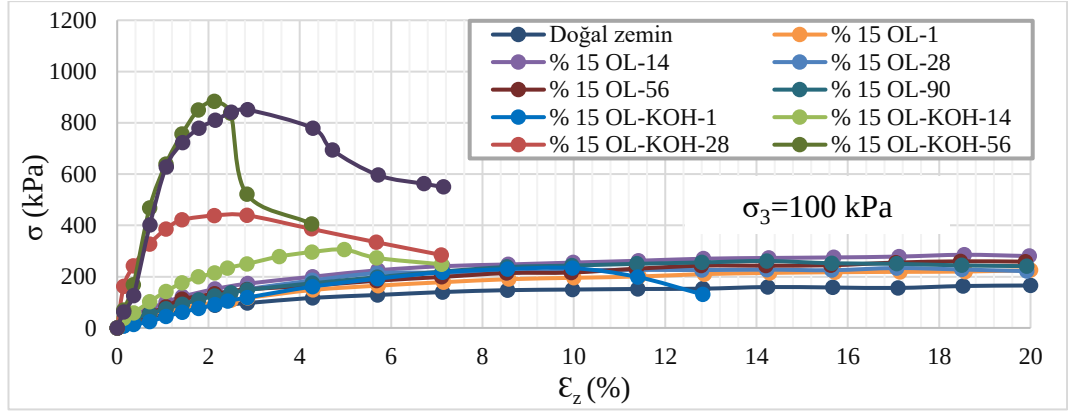
S-OL-10 numuneleri, doğal zemine benzer şekilde davranışlar gösterirken, dayanımlar zaman içerisinde hemen hemen sabit kalmıştır. S-OL-10 numunelerinin 1 günlük kür süresi sonunda, kırılma anında şekil değiştirmeler %20 olarak ve maksimum deviator gerilmeler 189 kPa ve 207 kPa arasında elde edilmiştir. 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %15,69 ve %20 arasında, maksimum deviator gerilmelerin 213 kPa ve 305 kPa arasında olduğu görülmüştür. 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %15,64 ve %20 arasında, maksimum deviator gerilmelerin 235 kPa ve 273 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %15,71 ve %20 arasında, maksimum deviator gerilmelerin 278 kPa ve 288 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %18,57 ve %20 arasında, maksimum deviator gerilmelerin 226 kPa ve 319 kPa arasında değiştiği Şekil 7.3'te görülmektedir.



Şekil 7.3. %10 olivin ve %10 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

S-OL-KOH-10 (KOH varlığında) numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmeler %9,96 ve %14,22 arasında, maksimum deviatör gerilmeler 234 kPa ve 299 kPa arasında elde edilmiştir. 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,97 ve %5,68 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 306 kPa ve 344 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,12 ve %2,85 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 439 kPa ve 761 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,13 ile %2,85 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 884 kPa ve 1050 kPa arasında, 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,86 ile %4,27 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 851 kPa ve 1112 kPa arasında değiştiği Şekil 7.3' te görülmektedir. KOH varlığında, 1 ve 14 günlük kür süreleri sonunda deney sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüş ve bu durum kimyasal etkilerin henüz gözlenmediği şeklinde yorumlanmıştır. Kür süresi 28 güne geldiğinde maksimum deviatör gerilmelerde büyük artış değerlerine ulaşılırken kırılma anındaki şekil değiştirmelerde tam tersine azalma meydana gelmiştir. Kür süresi 56 ve 90 gün olduğunda dayanım artışı ve şekil değiştirmeler hemen hemen sabit kalmıştır.

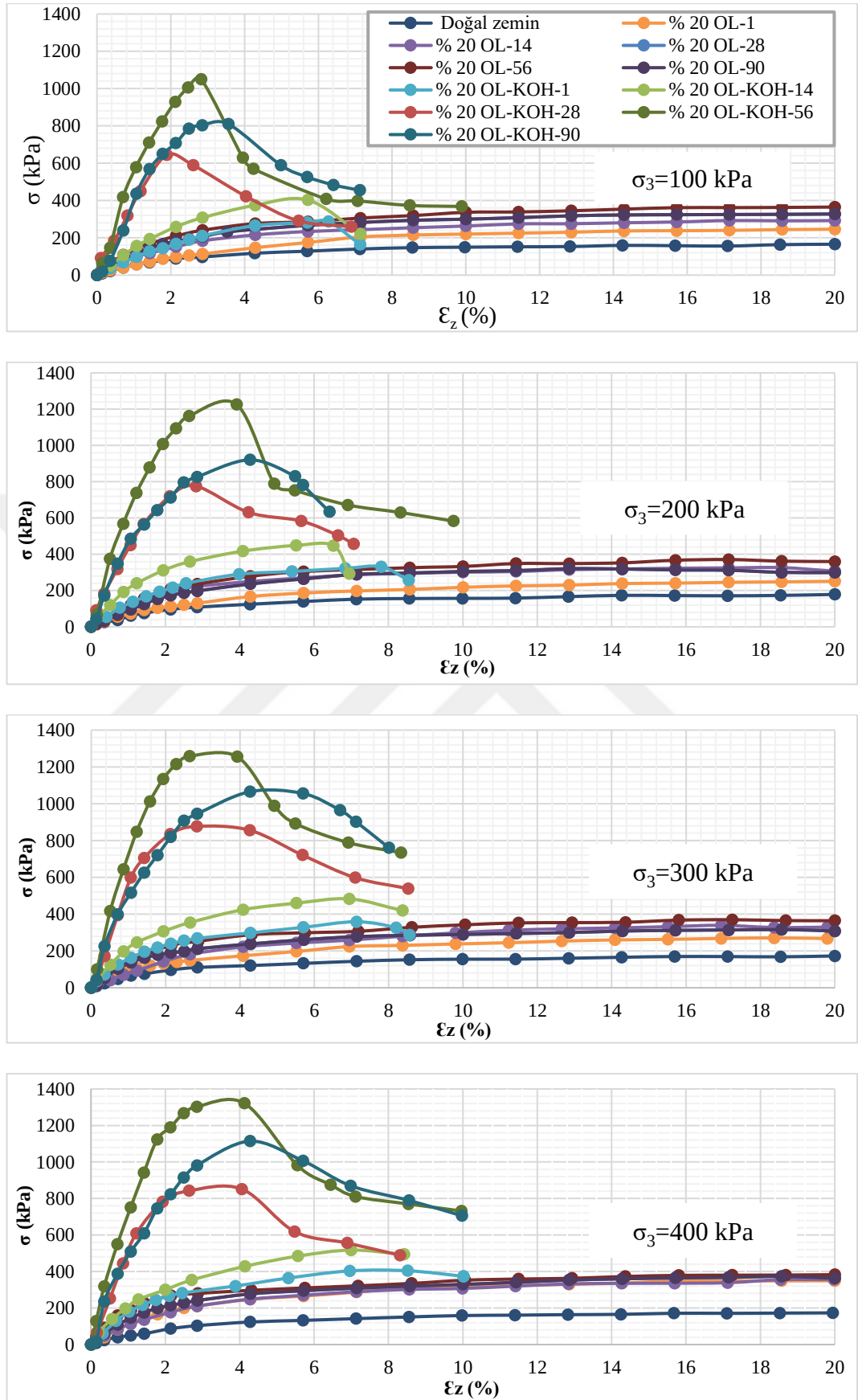
S-OL-15 numunelerinde 1 günlük kür süresi sonunda, kırılma anında şekil değiştirmelerin %20'de, maksimum deviatör gerilmelerin 220 kPa ve 256 kPa arasında olduğu görülmüştür. 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %14,28 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 285 kPa ve 316 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %14,18 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 234 kPa ve 249 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %18,47 ve %19,91 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 260 kPa ve 294 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %14,22 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 261 kPa ve 353 kPa arasında değiştiği Şekil 7.4' te görülmektedir.



Şekil 7.4. %15 olivin ve %15 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

S-OL-KOH-15 (KOH varlığında) numunelerinin 1 günlük kür süresi sonunda yürütülen UU deneylerinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %7,10 ve %11,36 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 259 kPa ve 327 kPa arasında elde edildiği görülmektedir. 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,97 ve %5,68 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 293 kPa ve 319 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,84 ve %4,29 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 551 kPa ve 581 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,50 ve %2,85 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 811 kPa ve 1006 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,27 ve %4,30 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 808 kPa ve 1022 kPa arasında değiştiği Şekil 7.4' te görülmektedir. KOH varlığında, bu seri numunelerde de 1 ve 14 günlük kür sürelerinin sonuçlarında, S-OL-KOH-10 numunelerine benzer şekilde birbirine yakın ve henüz tam sertleşme derecesine ulaşılmadığını gösterir sonuçlar elde edilmiştir. Kür süresi 28 güne geldiğinde maksimum deviatör gerilmelerde büyük artış değerlerine ulaşılırken şekil değiştirmelerde tam tersine azalma gelmiştir. Bu seri numunelerde de kür süresi 56 ve 90 günlerde dayanım artışı ve şekil değiştirmeler hemen hemen sabit kalmıştır.

S-OL-20 numunelerinde 1 günlük kür süresi sonunda, kırılma anında şekil değiştirmelerin %20 olduğu ve maksimum deviatör gerilmelerin 246 kPa ve 350 kPa arasında elde edildiği görülmektedir. 14 günlük kür süresi sonunda şekil değiştirmelerin %17,14 ve %19,97 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 293 kPa ve 357 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %14,34 ve %17,19 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 262 kPa ve 283 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %17,14 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 365 kPa ve 383 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %12,85 ve %20 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 317 kPa ve 373 kPa arasında değiştiği Şekil 7.5' te görülmektedir.

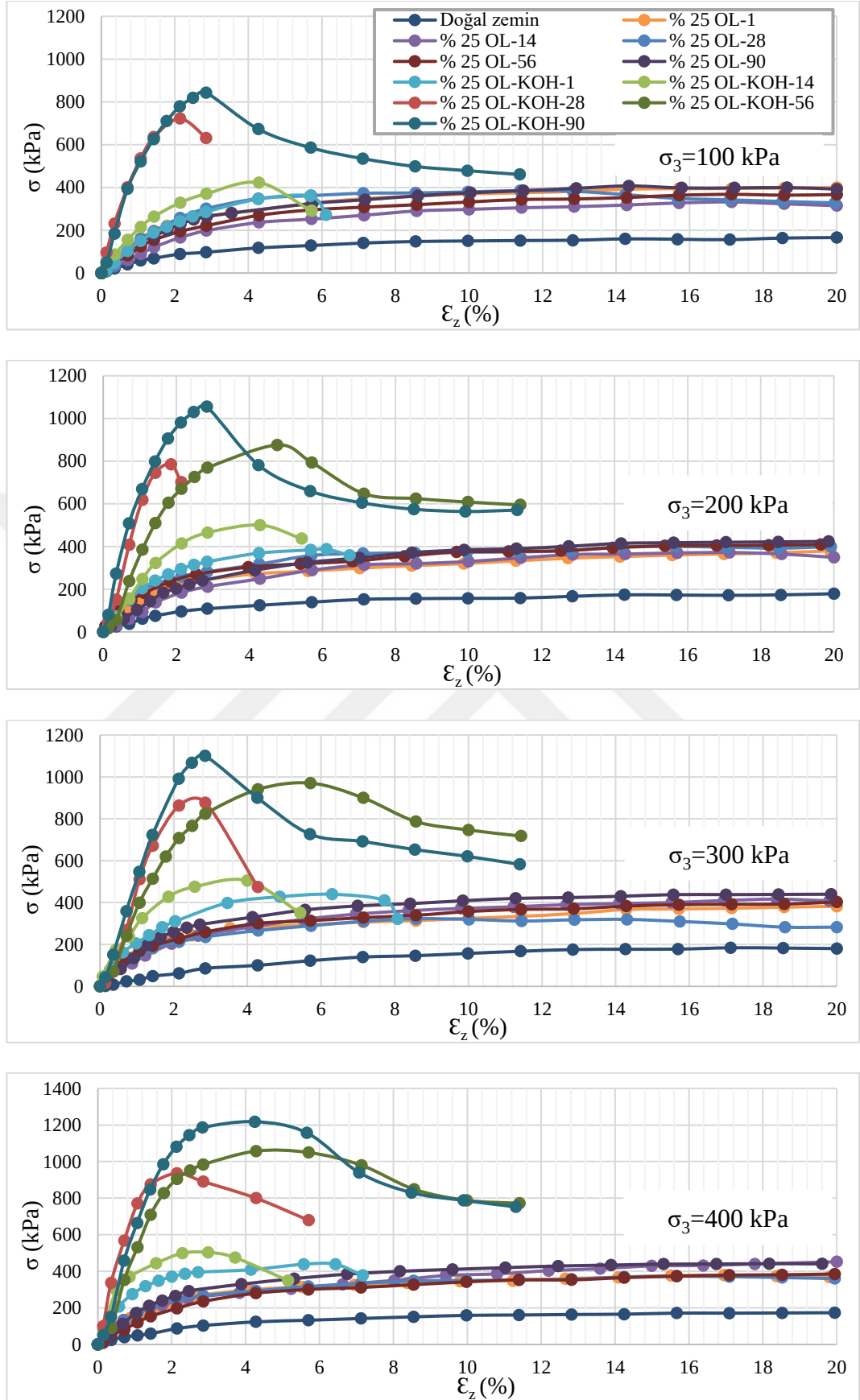


Şekil 7.5. %20 olivin ve %20 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

S-OL-KOH-20 (KOH varlığında) numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %6,27 ve %8,10 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 287 kPa ve 404 kPa arasında, 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %5,14 ve %7,14 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 403 kPa ve 517 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,14 ve %4,26 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 645 kPa ve 877 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,82 ve %4,12 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 1050 kPa ve 1321 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %3,56 ve %4,27 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 810 kPa ve 1114 kPa arasında değiştiği Şekil 7.5' te görülmektedir.

S-OL-25 numunelerinde 1 günlük kür süresi sonunda kırılma anında şekil değiştirmeler %20 olarak ve maksimum deviatör gerilmeler 379 kPa ve 399 kPa arasında elde edilmiştir. 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %17,14 ve %19,52 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 332 kPa ve 453 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %15,64 ve %18,57 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 323 kPa ve 401 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %17,14 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 368 kPa ve 409 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %14,34 ve %20 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 407 kPa ve 442 kPa arasında değiştiği Şekil 7.5' te görülmektedir.

S-OL-KOH-25 (KOH varlığında) numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %5,68 ve %7,10 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 360 kPa ve 439 kPa arasında, 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin %3,56 ve %4,29 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 423 kPa ve 505 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %1,85 ve %2,86 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 722 kPa ve 936 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,28 ve %5,71 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 755 kPa ve 1057 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,83 ve %4,24 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 843 kPa ve 1218 kPa arasında değiştiği Şekil 7.6' da görülmektedir.



Şekil 7.6. %25 olivin ve %25 olivin+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

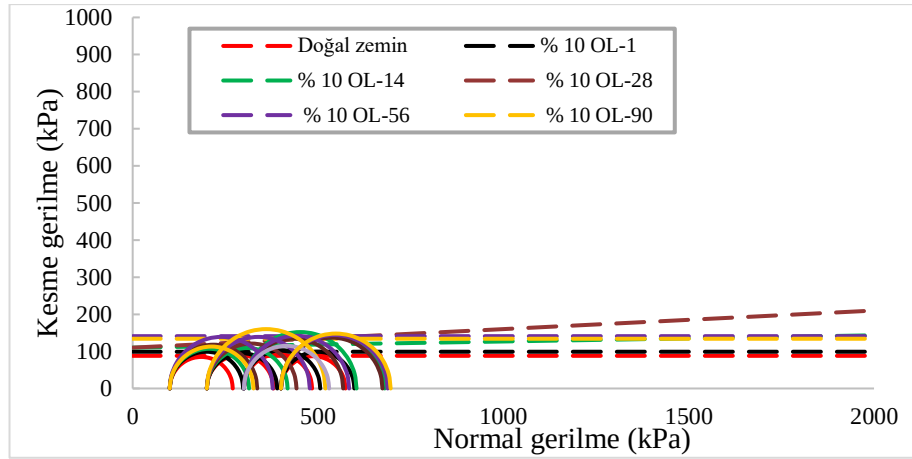
Genel olarak, olivin ile işlenmiş numunelerin (S-OL) dayanımının, potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilen numunelere (S-OL-KOH) göre zamanla artış göstermedikleri ve sadece olivinin danelerinin etkisiyle direnç artışına katkı verdikleri gözlemlenmiştir. Potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilen numunelerin (S-OL-KOH) ise dirence hem olivin daneleriyle hem de zamanla oluşan kimyasal bağlarla katıldıkları tespit edilmiştir. Doğal zemin (NS) ve olivin ile işlenmiş zemin (S-OL) karışımlarında tüm numuneler sünek bir davranış gösterirken KOH ile aktifleştirilmiş olivin içeren (S-OL-KOH) tüm karışımlara ait numuneler gevrek bir davranışa sahiplerdir. Bu iki davranışa benzer durum önceki çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Fasihnikoutalab ve ark., 2016; Driss ve ark, 2023).

NS numunelerinin deviatör gerilme değerleri, S-OL numunelerinin deviatör gerilme değerlerinden daha düşüktür. Bunun sebebi, kuru yoğunluğun artmasına neden olan olivin danelerinin katılımıdır. S-OL-KOH numunelerinin deviatör gerilme değerleri ise S-OL numunelerinin deviatör gerilme değerlerinden daha yüksektir. Bunun sebebi ise KOH'nin varlığında, olivinin kil danelerini çimentolayarak başka bir malzemeye dönüştürmesidir. Kimyasal etkiler hakkında XRD analizi bölümünde detaylı bir şekilde bilgi verilecektir.

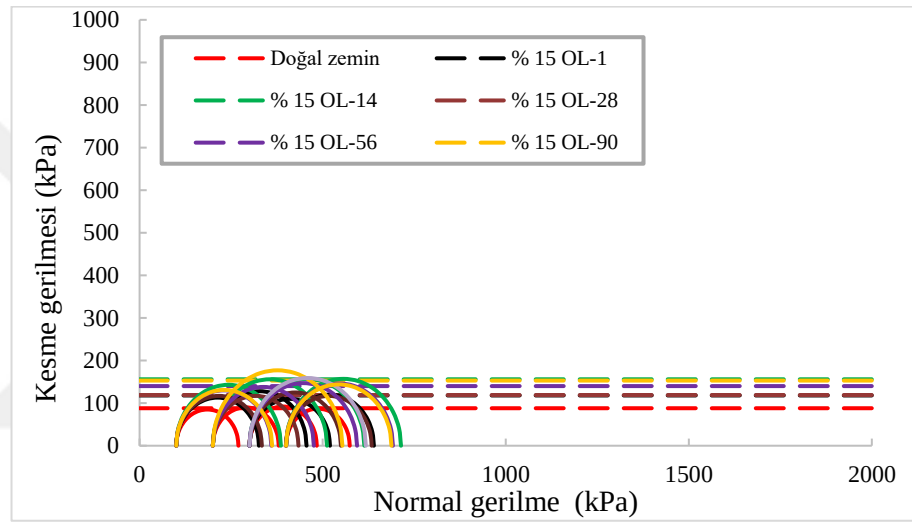
7.1.2. Kayma direnci parametrelerinin değerlendirilmesi

Olivin katkısının farklı oranları için deneylerde elde edilen Mohr daireleri kür zamanına bağlı olarak Şekil 7.7 ve Şekil 7.14 arasında sunulmuştur. Bununla birlikte, Tablo 7.2'de numunelerin maksimum deviatör gerilme artış oranları ve Mohr dairelerinden çıkarılan kayma direnci parametreleri de gösterilmiştir.

Doğal halde (NS), kohezyon 88 kPa ve içsel sürtünme açısı sıfır olarak gözlemlenmiştir. KOH yokluğunda, doğal zemine %10 olivin eklediğinde ve farklı kür süreleri (1, 14, 28, 56 ve 90 gün) dikkate alındığında, doğal zemine göre içsel sürtünme açısı sabitken kohezyon değerlerinde artış (sırasıyla 99, 127, 128, 141 ve 134 kPa) görülmüş fakat zaman içerisinde kohezyon değerlerinde önemli bir değişim meydana gelmediği gözlemlenmiştir (Şekil 7.7.). Bu artış, doğal zemin ve olivin arasındaki kimyasal reaksiyonla değil, maksimum kuru yoğunluktaki artış ve zemin yapısındaki değişimle açıklanabilir. KOH yokluğunda, %15 olivin katkısı doğal zemine eklediğinde % 10 olivin katkısına göre hemen hemen aynı sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7.8.).

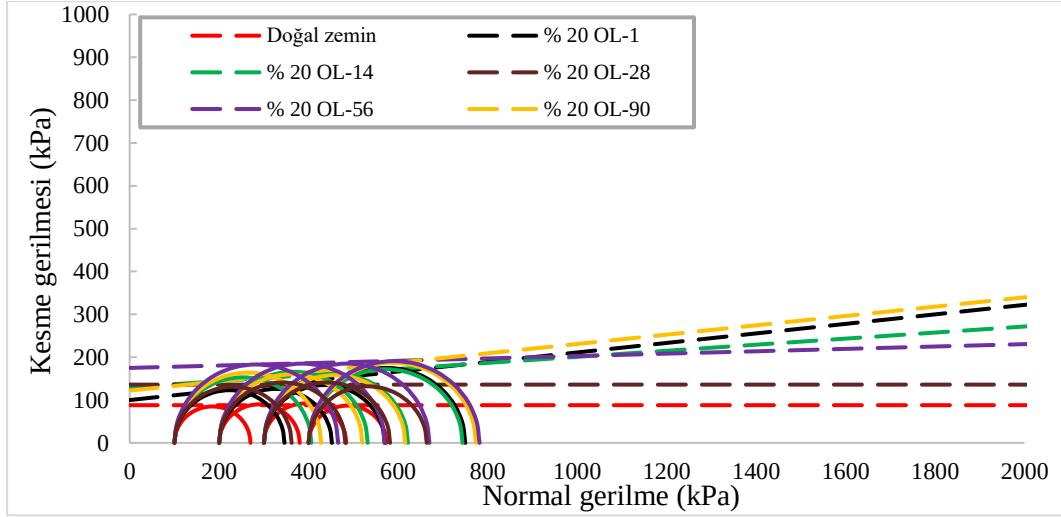


Şekil 7.7. %10 olivin katkısı için yenilme zarfları.

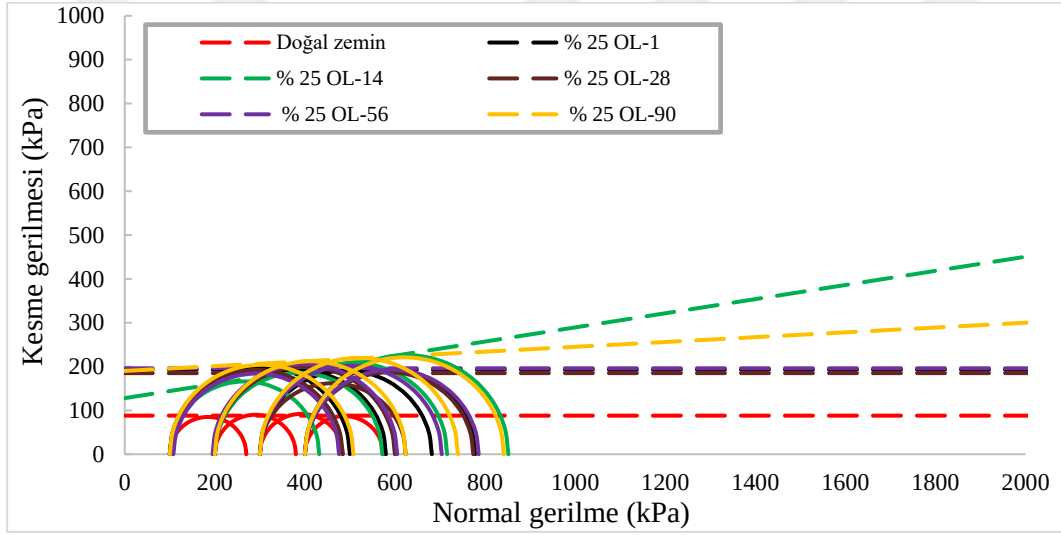


Şekil 7.8. %15 olivin katkısı için yenilme zarfları.

KOH yokluğunda, doğal zemine % 20 olivin eklendiğinde ve farklı kür süreleri (1, 14, 28, 56 ve 90 gün) dikkatine alındığında, doğal zemine göre içsel sürtünme açısı (sırasıyla 6,840, 6,160, 0, 0 ve 4,290) ve kohezyon değerlerinde (sırasıyla 100, 122, 136, 186 ve 145 kPa) artış görülmüş fakat zaman içerisinde kohezyon değerlerinde önemli bir değişim meydana gelmediği gözlemlenmiştir (Şekil 7.9). KOH yokluğunda, doğal zemine %25 olivin eklendiğinde ise % 20 olivin katkısına göre hafif artış fark edilmiştir. Bu artış, maksimum kuru yoğunluktaki artış ve iri dane oranının artışı ile açıklanabilir (Şekil 7.10).



Şekil 7.9. %20 olivin katkısı için yenilme zarfları.

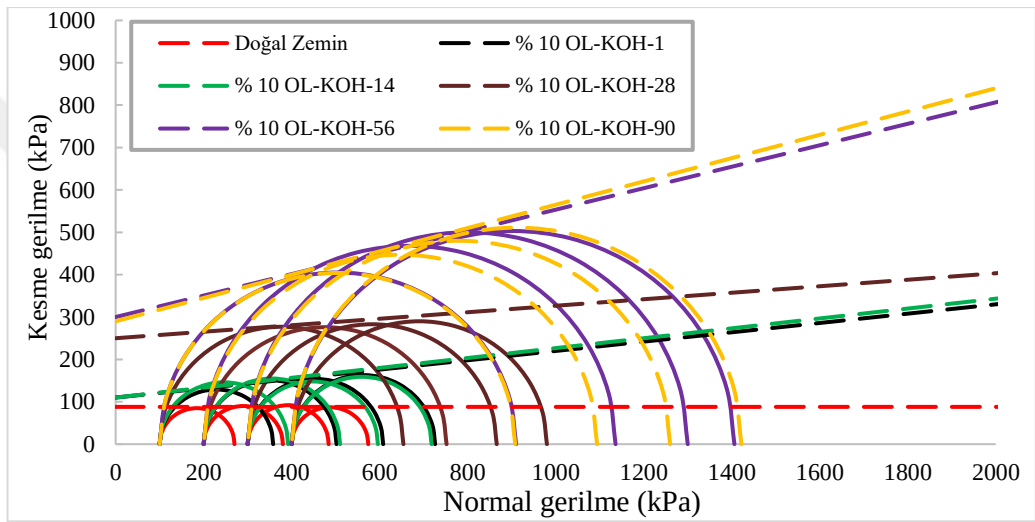


Şekil 7.10. %25 olivin katkısı için yenilme zarfları.

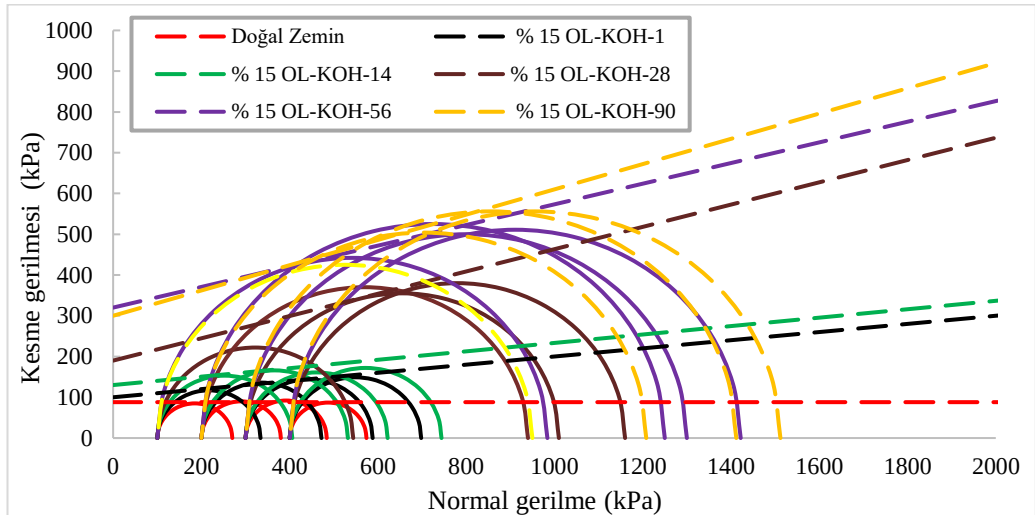
Genel olarak, olivin katkısının oranı arttıkça dayanım da artmış fakat kür süresi arttığında kayma parametrelerinde bir artış gözlenmemiştir. Bu durum, sadece olivin kullanıldığında zaman içerisinde çimentolaşma oluşumunu sağlayacak kimyasal reaksiyonların gerçekleşmediği şeklinde yorumlanmıştır.

KOH varlığında, hem kohezyon (c_u) hem de içsel sürtüne açısı (ϕ_u) artmıştır. Doğal zemine %10 olivin katkısı eklediğinde ve farklı kür süreleri (1, 14, 28, 56 ve 90 gün) dikkatine alındığında, doğal zemine göre içsel sürtünme açısında (sırasıyla 3,720, 1,720, 4,190, 14,210 ve 15,370) ve kohezyon değerlerinde (sırasıyla 125, 140, 240, 300 ve 290 kPa) artış görülmüştür. Bunun yanında 56 gün ve 90 günlük kür sürelerinde hem kohezyon hem de içsel sürtünme açısı değerlerinin hemen hemen sabit kaldıkları

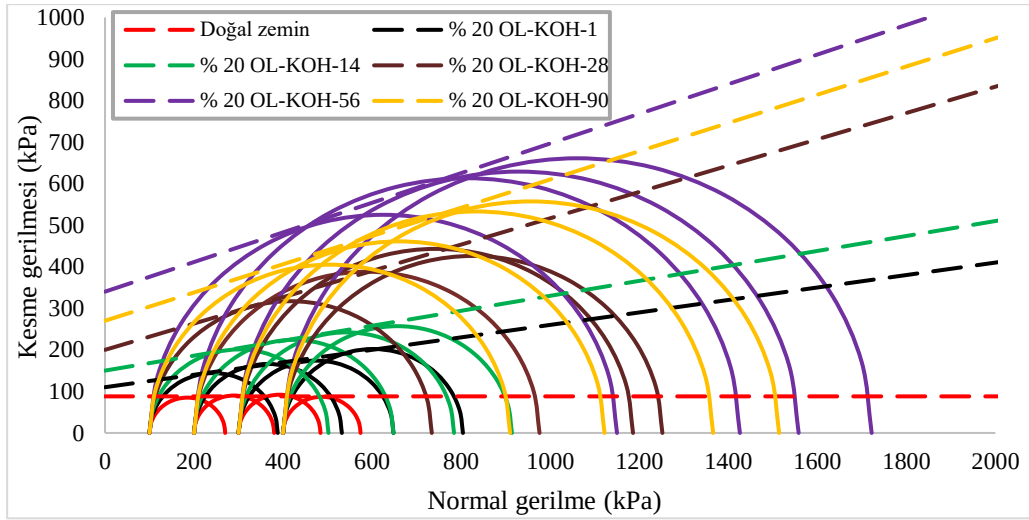
gözlemlenmiştir (Şekil 7.11). Olivin katkısı %10, %15, %20 ve %25 olduğunda kür süresi uzadıkça dayanımının arttığı, fakat 56 gün ve 90 gün arasında kayma direnci parametrelerindeki artışların küçük olduğu ve içsel sürtünme açılarının değerlerinin de olivin oranı artıkça arttığı görülmüştür (Şekil 7.12-14). Maksimum dayanıma %20 olivin için 56 günde ulaşılmış olup, kohezyon doğal halde 88 kPa'dan 340 kPa'a ve içsel sürtünme açısı ise 0'dan 19.630' ye kadar yükselmiştir. Bu çalışmada, olivin katkısı ile stabilize edilen kilin kayma parametrelerindeki değişimleri önemli ölçüde etkileyen üç faktörün olduğu açıkça anlaşılmıştır. Bu faktörler olivin içeriği, KOH varlığı ve kür süresidir.



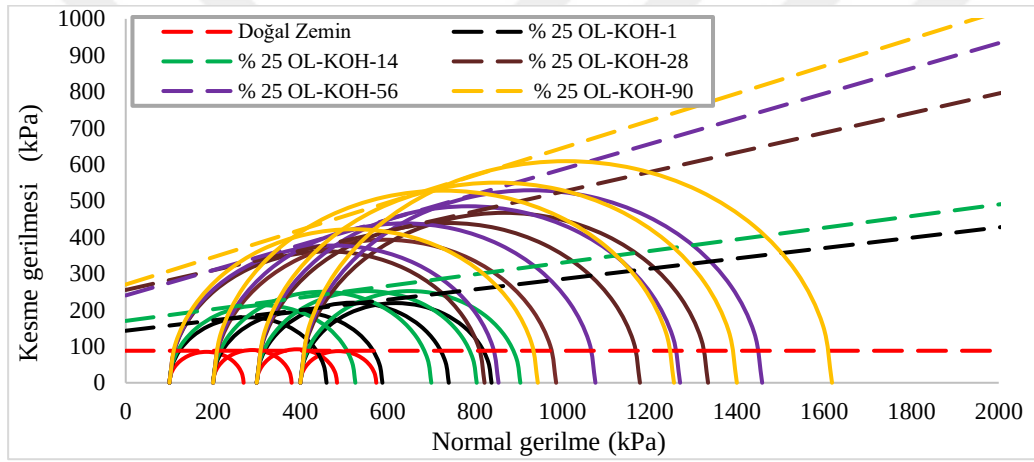
Şekil 7.11. %10 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.



Şekil 7.12. %15 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.



Şekil 7.13. %20 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.



Şekil 7.14. %25 olivin+KOH katkısı için yenilme zarfları.

Sivapullaiah ve ark, (2000) çalışmalarında, kayma direnci parametrelerindeki değişimlerin nedenlerini açıklamışlar ve partikül flokülasyonunun sürtünme açısı değerini artırdığını, partikül çimentolaşmasının ise kohezyon değerini artırdığını söylemişlerdir.

Olivinle ilgili önceki çalışmalarda UCS deneyi kullanıldığından, çevre basıncı olmamasından dolayı kayma direncinin içsel sürtünme açısı kısmının uzun vadede değişiklikleri gözlemlenememiştir.

Bu çalışmada, olivin katkısının tek başına zaman içerisinde kayma direncini sürekli artırmaya yeterli gelmediği, KOH ile aktive edildiğinde ise hem kohezyon (c_u) hem de içsel sürtünme açısı (ϕ_u) değerlerinin kür süresiyle arttığı ortaya konmuştur. Kayma direnci açısından, drenajsız durumda içsel sürtünme açısının (ϕ_u) değişiminin kür

süresine bağlı olarak uzun vade için ortaya konması, bu çalışmanın önceki çalışmalara getirdiği önemli bir katkıdır.

Olivin ve potasyum hidroksit (KOH) kullanımından önce ve sonra numunelerin yenilme modları 56 günlük kür süresi ve farklı çevre basınçları için Tablo 7.3'te gösterilmektedir.

Tablo 7.3. Doğal numunelerde ve 56 günlük numunelerde kırılma modları.

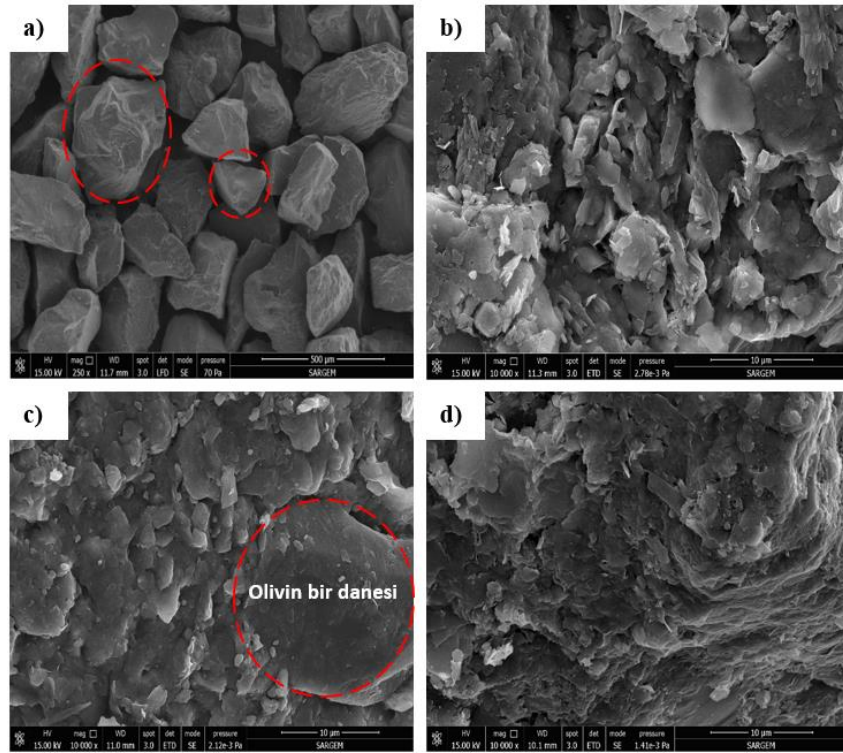
Çevre basıncı	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
NS				
S-OL-56				
S-OL-KOH-56				

Doğal numunelerde (NS) ve sadece olivin katkılı numunelerde (S-OL) artan gerilme ile numune boyundaki kısalma ve çaptaki artış gözlemlendiğinde silindir şeklindeki numunelerde kırılma yüzeyi görülmediği ve numunelerde yüzde %20 deformasyona ulaşıncaya kadar deneye devam edildiği görülmektedir. Bu numunelerin davranışı sünek davranış olarak gözlemlenmiştir. Öte yandan, KOH ile aktive edilmiş olivin katkılı numunelerde (S-OL-KOH) ise yükleme artışı ile bariz bir şekilde kırılma yüzeyleri gözlemlenmiş ve bunlar silindirik şekillerini korumuşlardır. Bu numunelerde kırılma anındaki şekil değiştirme oranları çok daha düşük olmakta ve numuneler

gevrek davranış göstermektedir. Benzer davranışlar, kireçle stabilize edilmiş bir killi zeminin konsolidasyonsuz drenajsız kayma mukavemeti davranışına doğal puzolanın etkisi konulu bir çalışmada da gözlemlenmiştir (Driss ve ark., 2023).

7.1.3. FE-SEM analizi

Doğal zemin (NS), %20 olivin ile işlenmiş kil (S-OL) ve olivin + KOH ile aktive olan numunelerin (S-OL-KOH) 28 günlük kür süresi sonrasında elde edilen mikrografik görüntüleri Şekil 7.15'te gösterilmiştir. Boyutları 60 ila 600 µm değişmekte olan köşeli daneli saf olivinin ilk hali Şekil 7.15a'da verilmiştir. Olivinin köşeli daneleri ile içsel sürtünme açısını arttırması ve dolayısıyla direnci arttırıcı yönde etki etmesi muhtemeldir. Şekil 7.15b'de verilen doğal zeminde, büyük ölçüde değişen boşlukların, süreksizliklerin ve gevşek bir yapının varlığı görülmektedir. Şekil 7.15c'de ise kil daneleri tarafından sarılmış bir olivin tanesi görülmektedir. Olivin ile işlenmiş kilin, doğal zemine kıyasla daha az boşluklar ve süreksizlikler içerdiği; bununla birlikte daha sıkı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.15d'de gösterilen olivin ile işlenmiş ve KOH aktive edilmiş kilde, sadece olivin ile işlenmiş kile kıyasla boşluklar ve süreksizlikler hemen hemen aynıdır. Burada en önemli fark, KOH varlığında kimyasal bağların oluşmuş olmasıdır. S-OL ve S-OL-KOH numunelerinin görüntüleri, gözlemlenen mekanik özelliklerle tutarlı, büyük boşluklar içermeyen kompakt bir morfoloji göstermektedir. Nitekim, S-OL-KOH numunesinde, olivinde bulunan MgO, KOH ile kimyasal reaksiyona girdiği için magnezyum hidroksit $Mg(OH)_2$ üretimine yol açarak işlenmiş zeminin mekanik özelliklerinin performansını yükseltmiştir (Fasihnikoutalab ve ark., 2017). Önceki çalışmalarda da, benzer durumlar gözlemlenmiştir (Yi ve ark., 2013a; Yi ve ark., 2013b; Zhu ve ark., 2013).



Şekil 7.15. SEM analizi sonuçları a) olivin, b) NS numunesi c) S-OL numunesi, d) S-OL-KOH numunesi.

7.2. İkinci Aşama

Tez çalışmasının deneysel kısmının ikinci aşamasında, direnç artışının olivin danelerine özgü olup olmadığının anlaşılması için benzer dane dağılımına sahip bir kum üzerinde aynı deneyler yapılarak olivin ve kum katkılı numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır. İlk seri deneylerde KOH yokken dirençlerde kür süresine bağlı kayda değer bir artış olmadığı için bu seride sadece kum katılan numunelerde kür süresinin etkisinin incelenmesi için numune hazırlanmamıştır. Bunun yanında KOH varlığında birinci aşamada 14 günlük kür süresinde dikkate değer bir iyileşmenin olmaması nedeniyle bu seride 14 günlük kür süresi için de numune hazırlanmamıştır.

Bu aşamanın sonuçları Tablo 7.4 ve Tablo 7.5 ile, Şekil 7.16'dan Şekil 7.23'e kadar görseller üzerinde sunulmuştur. Tablo 7.4' te bu aşamada her bir kum takviyesi oranı ve kür süresi için UU deneylerinde elde edilen maksimum deviatör gerilmeler ile kırılma anlarındaki birim şekil değiştirmeler sunulmaktadır. Tablo 7.5'te ise kumlu numunelerin maksimum deviatör gerilme artış oranları (%) ve kayma direnci parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 7.4. Kumlu numunelerin Maks. deviatör gerilmeler (kPa).

Numune	Kür (gün)	$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa		$\sigma_3=400$ kPa		$\sigma_{d,max}$ (Ort) (kPa)
		$\sigma_{d,ma}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	
NS	1	169	18,59	179	17,14	184	17,17	173	19,94	176,25
S-SA-10	1	252	20	263	20	260	20	266	20	260,25
S-SA-15	1	267	17,14	277	20	308	20	261	15,71	278,25
S-SA-20	1	317	14,3	365	20	389	20	430	20	375,25
S-SA-25	1	427	19,94	466	20	428	20	511	20	458
	28	486	2,85	608	4,27	662	5,7	651	7,12	602
S-SA-KOH-10	56	666	2,49	729	2,85	835	3,86	838	3,56	767
	90	877	4,29	1062	5,71	1129	5,71	1192	5,71	1065
	28	586	2,84	706	4,26	721	4,29	764	5,71	694
S-SA-KOH-15	56	813	2,85	946	5,71	1051	5,71	1091	5,69	975
	90	998	3,44	1202	4,29	1288	5,71	1448	5,73	1234
	28	779	5,71	847	4,29	923	4,28	971	5,71	880
S-SA-KOH-20	56	955	3,71	1112	4,27	1179	5,71	1231	5,71	1119
	90	1018	3,43	1187	4,29	1267	4,28	1386	4,27	1215
	28	789	4,29	900	2,86	1091	4,29	1159	4,29	985
S-SA-KOH-25	56	1036	3,61	1235	3,7	1350	4,28	1444	4,26	1266
	90	1205	2,87	1388	4,27	1515	4,27	1654	5,71	1441

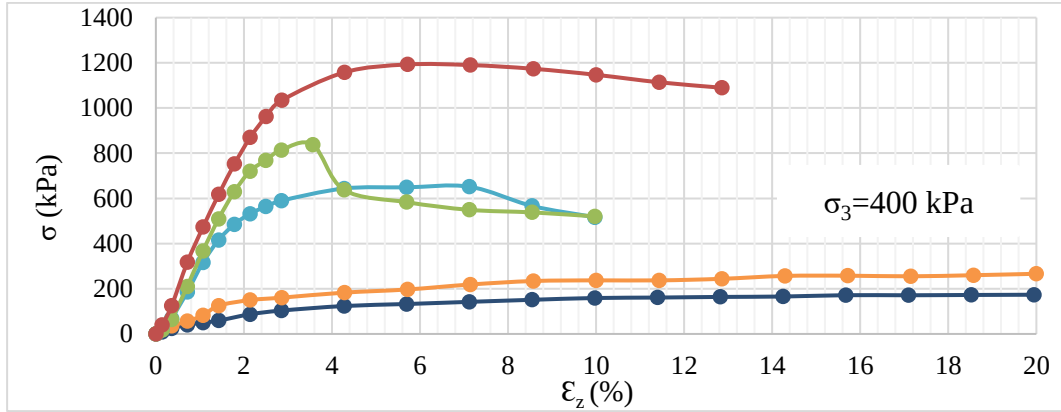
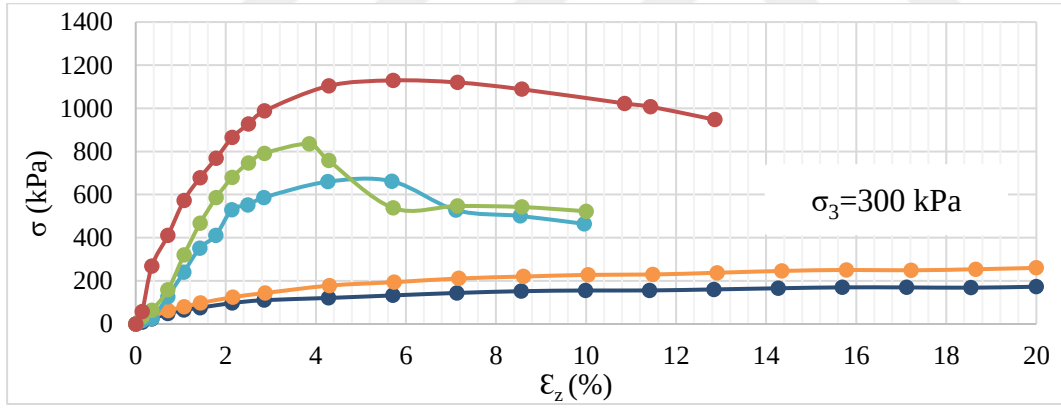
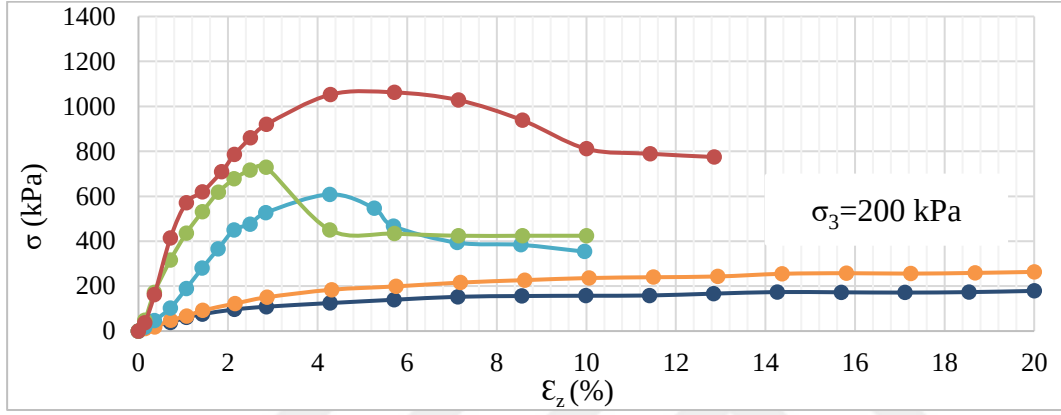
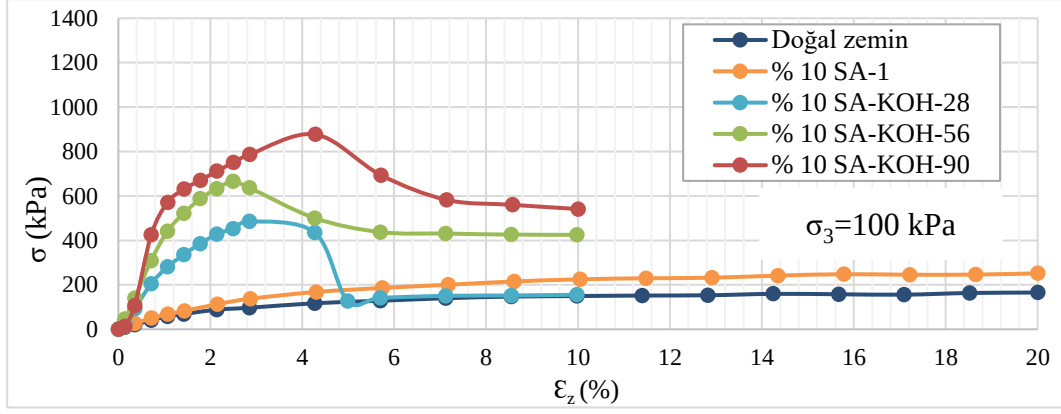
Tablo 7.5. Kumlu numunelerin Maks. deviatör gerilmeler artış oranı ve kayma direnci parametreleri.

Numune	Kür (gün)	Çevre basıncı (kPa)				c_u (kPa)	ϕ_u (°)
		100	200	300	400		
NS	1	-	-	-	-	88	0
S-SA-10	1	49,11	46,93	41,30	53,76	130	0
S-SA-15	1	57,99	54,75	67,39	50,87	139	0
S-SA-20	1	87,57	103,91	111,41	148,55	125	8,53
S-SA-25	1	152,66	160,34	132,61	195,38	177	7,29

Tablo 7.5. (Devamı) Kumlu numunelerin Maks. deviatör gerilmeler artış oranı ve kayma direnci parametreleri.

Numune	Kür (gün)	Çevre basıncı (kPa)				c_u (kPa)	$\phi_u(^{\circ})$
		100	200	300	400		
S-SA-KOH-10	28	187,57	239,66	259,78	276,30	170	14,93
	56	294,08	307,26	353,80	384,39	220	16,41
	90	418,93	493,30	513,59	589,02	280	20,44
S-SA-KOH-15	28	246,75	294,41	291,85	341,62	210	13,74
	56	381,07	428,49	471,20	530,64	250	20,97
	90	490,53	571,51	600,00	736,99	320	22,25
S-SA-KOH-20	28	360,95	373,18	401,63	461,27	260	16,41
	56	465,09	521,23	540,76	611,56	300	20,14
	90	502,37	563,13	588,59	701,16	320	21,80
S-SA-KOH-25	28	366,86	402,79	492,93	569,94	240	21,80
	56	513,02	589,94	633,70	734,68	330	21,55
	90	613,02	675,42	723,37	856,07	390	22,03

S-SA-10 numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %20 olduğu ve maksimum deviatör gerilmelerin 252 kPa ve 266 kPa arasında değiştiği görülmektedir. S-SA-KOH-10 (KOH varlığında) numunelerinin 28 günlük kür süresinde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %2,85 ve %7,12 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 486 kPa ve 662 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,49 ile %3,86 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 666 kPa ve 838 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,29 ve %5,71 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 877 kPa ve 1192 kPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 7.16.).

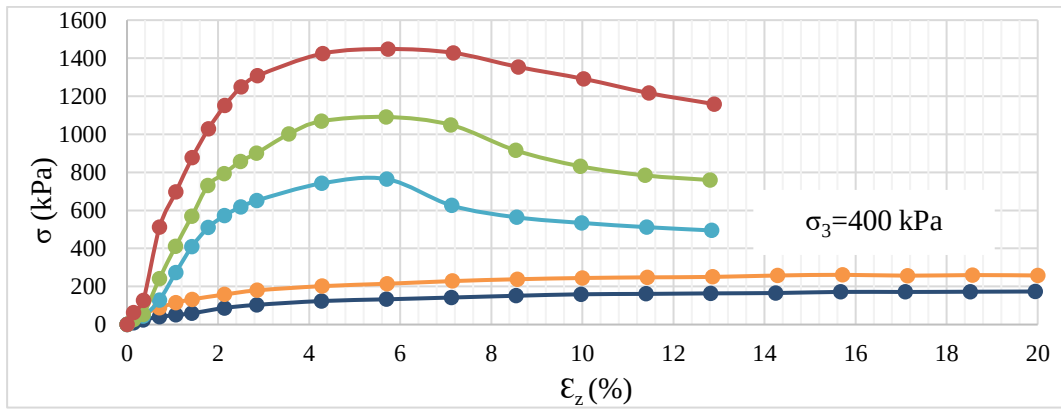
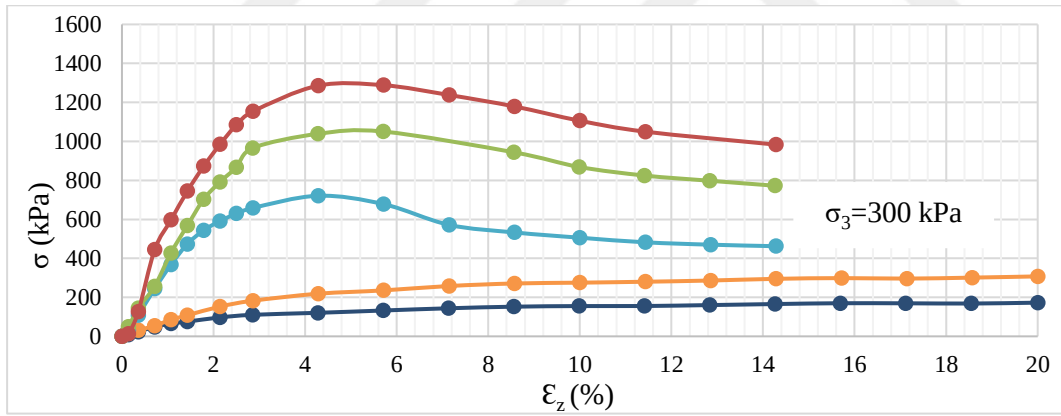
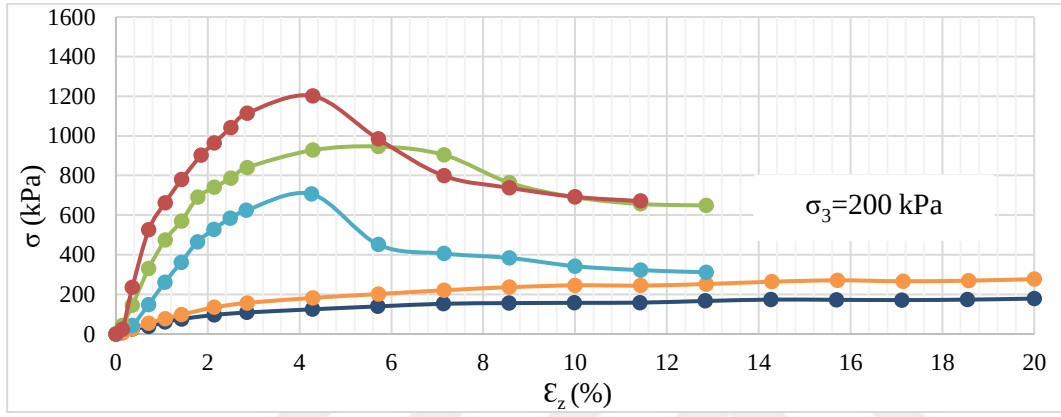
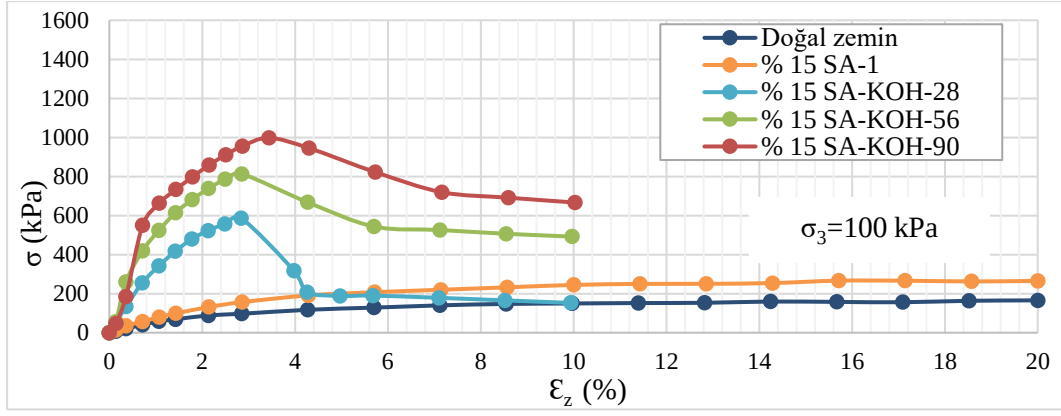


Şekil 7.16. %10 kum ve %10 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

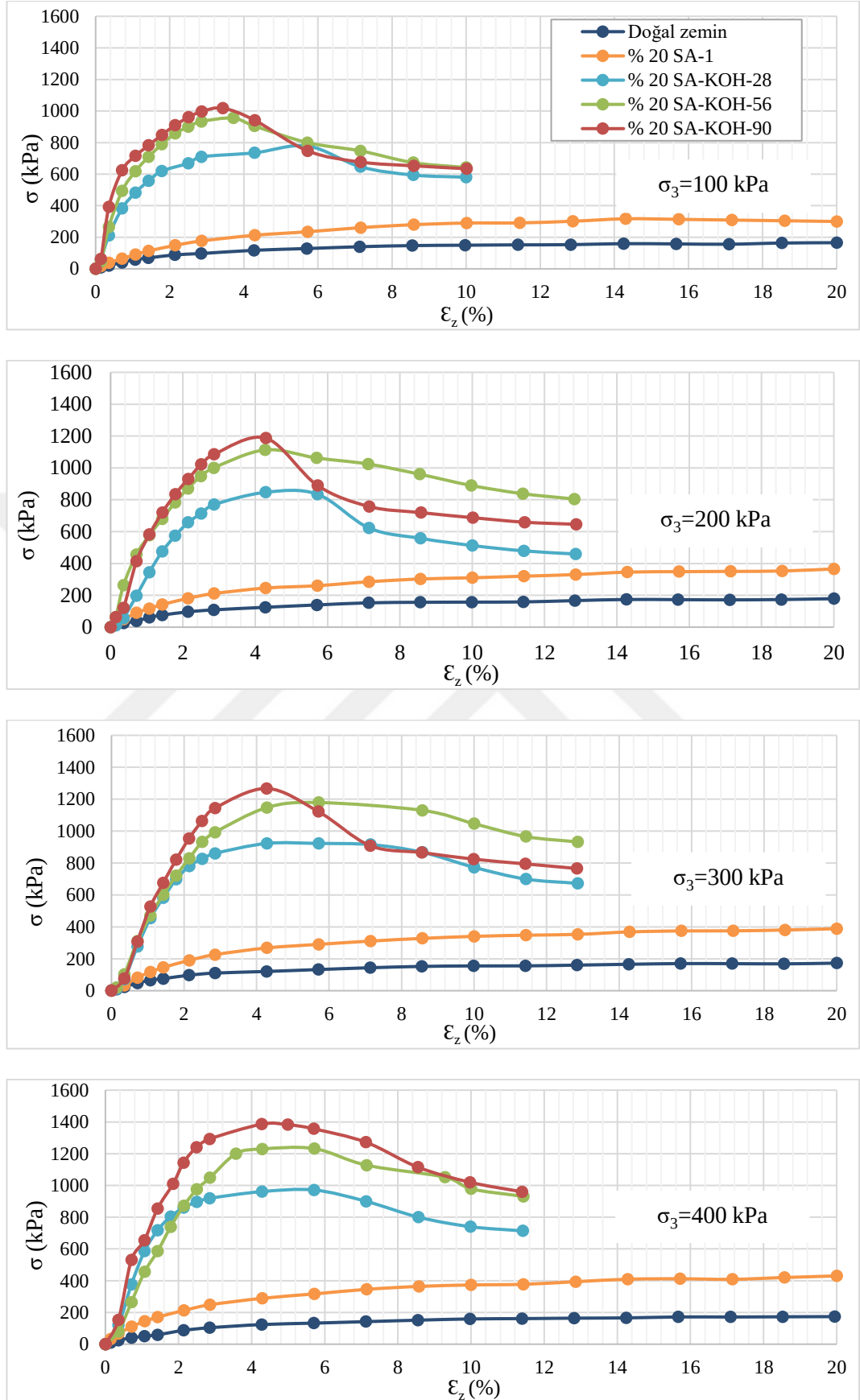
S-SA-15 numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %15,71 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 252 kPa ve 266 kPa arasında değiştiği görülmektedir. S-SA-KOH-15 (KOH varlığında) numunelerinin 28 günlük kür süresinde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %2,85 ve %7,12 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 586 kPa ve 662 kPa arasında, 56 günlüklerde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %2,49 ile %3,86 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 666 kPa ve 838 kPa arasında ve 90 günlüklerde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %4,29 ve %5,71 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 877 kPa ve 1192 kPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 7.17.).

S-SA-20 numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %14,30 ve %20 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 317 kPa ve 430 kPa arasında değiştiği görülmektedir. S-SA-KOH-20 (KOH varlığında) numunelerinin 28 günlük kür süresinde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %4,28 ve %5,71 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 779 kPa ve 971 kPa arasında, 56 günlüklerde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %2,85 ile %5,71 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 955 kPa ve 1231 kPa arasında ve 90 günlüklerde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %3,43 ve %4,29 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 877 kPa ve 1192 kPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 7.18.).

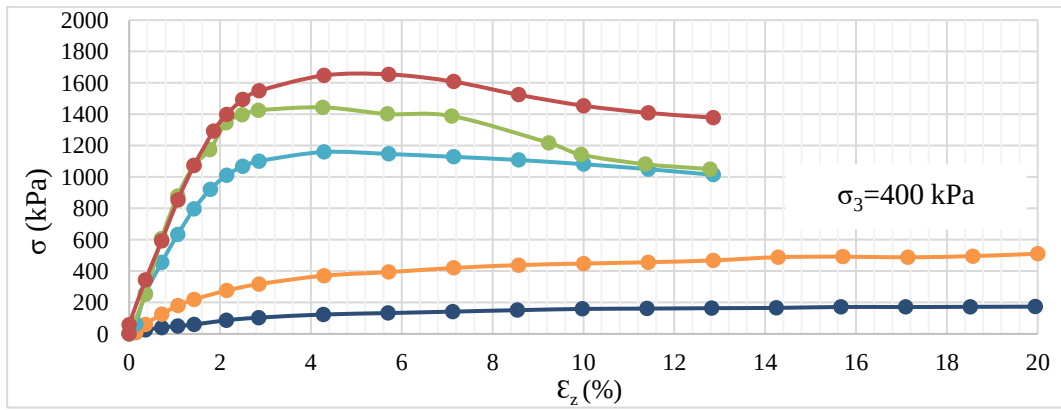
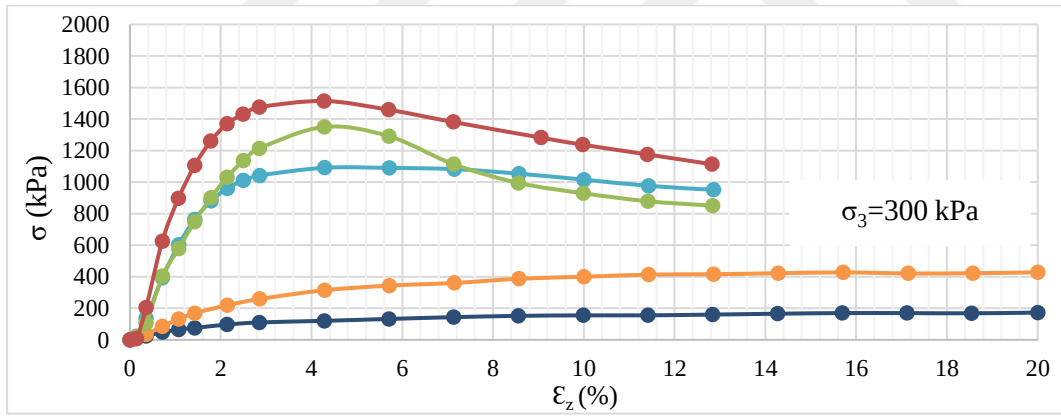
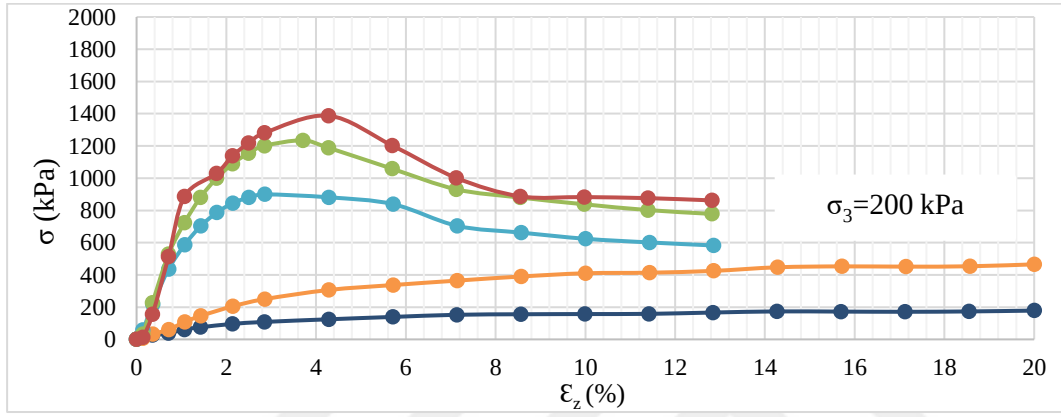
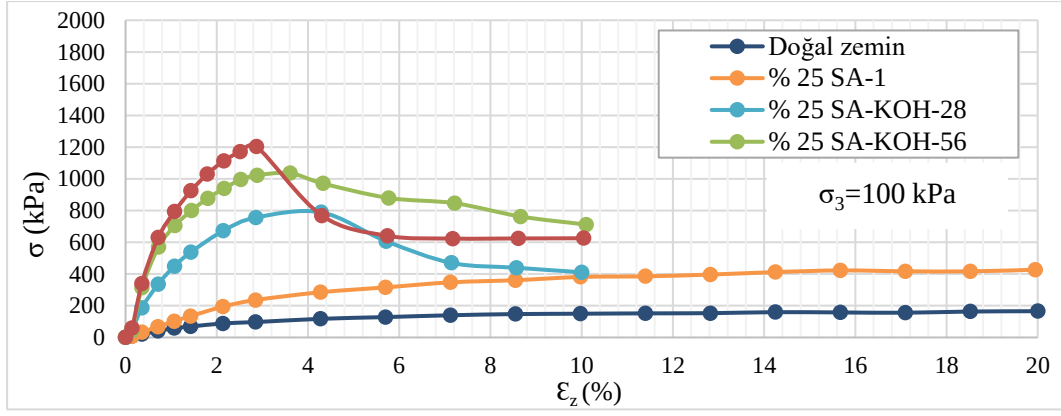
S-SA-25 numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %20 olduğu ve maksimum deviatör gerilmelerin 428 kPa ve 511 kPa arasında değiştiği görülmektedir. S-SA-KOH-25 (KOH varlığında) numunelerinin 28 günlük kür süresinde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %2,86 ve %4,29 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 789 kPa ve 1159 kPa arasında, 56 günlüklerde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %3,61 ile %4,28 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 1036 kPa ve 1444 kPa arasında ve 90 günlüklerde kırılma anındaki şekil değiştirmelerin %2,87 ve %5,71 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 1205 kPa ve 1654 kPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 7.19.).



Şekil 7.17. %15 kum ve %15 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.



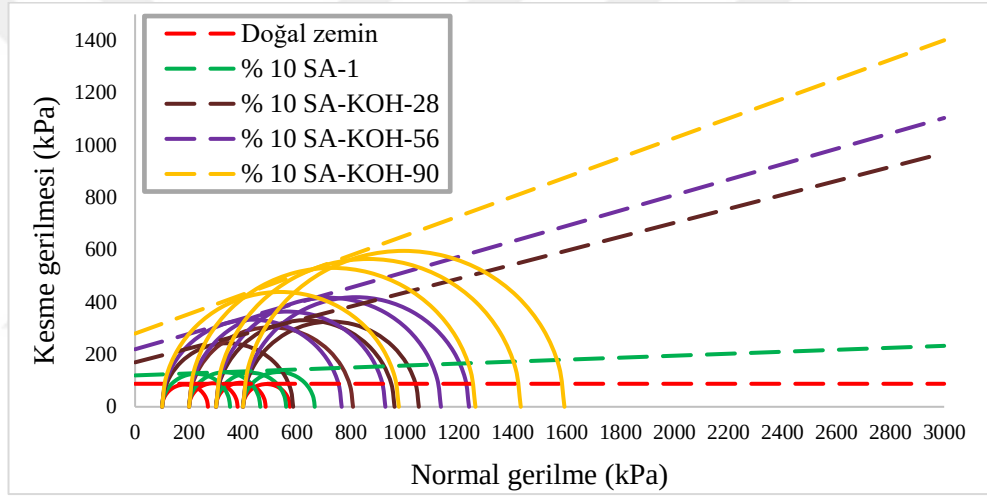
Şekil 7.18. %20 kum ve %20 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.



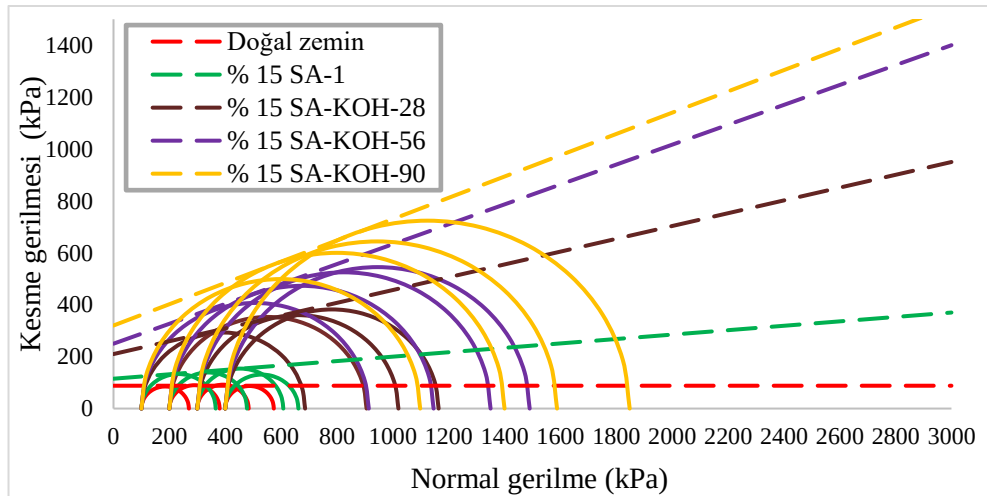
Şekil 7.19. %25 kum ve %25 kum+KOH numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

Genel olarak şekil değiştirmelere bakıldığında, KOH yokluğunda kırılma anlarında birim şekil değiştirmelerin yüksek değerlere ulaşmış olduğu ve maksimum deviator gerilmelerin değerlerinin görece düşük olduğu görülmektedir. Öte yandan KOH varlığında, şekil değiştirmelerin değerleri düşüken maksimum deviator gerilmelerin değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. KOH yokluğunda numunelerin davranışlarının sünek olduğu ve KOH varlığında gevrek davranış görüldüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca, kum oranı ve kür süresi arttıkça dayanım artışı da artmaktadır. Karşılaştırma bölümünde, %25 olivin ve %25 kum arasında bir mukayese yapılmıştır.

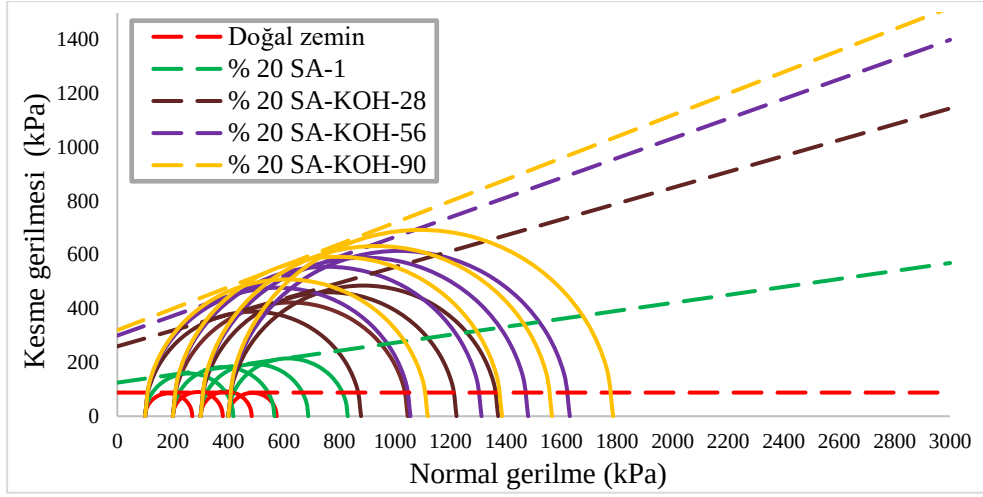
Şekil 7.20 ve Şekil 7.23 arasındaki şekiller her bir kum katkısı oranı için hazırlanmış olup KOH' in yokluğundaki durumda ve KOH varlığındaki durumlardaki Mohr dairelerinin gelişimini kür süresine bağlı olarak göstermektedir.



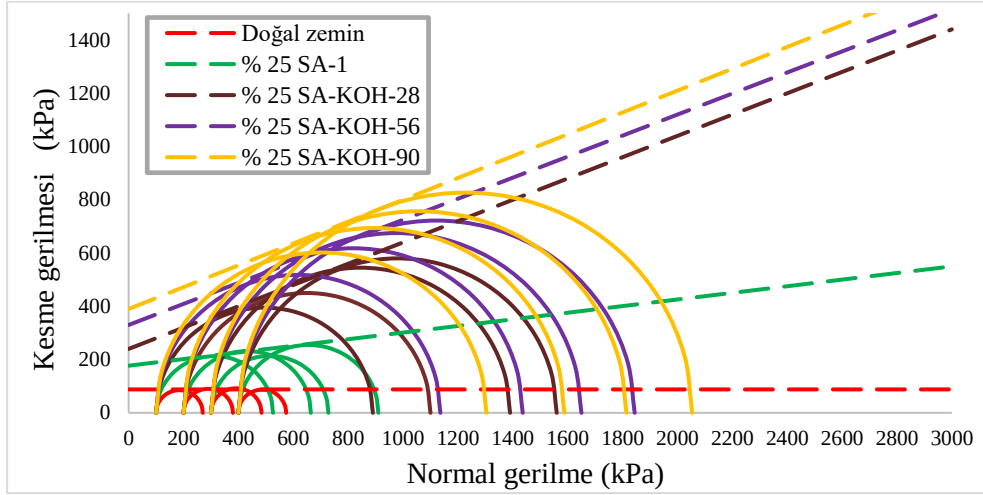
Şekil 7.20. %10 kum katkısı için yenilme zarfları.



Şekil 7.21. %15 kum katkısı için yenilme zarfları.



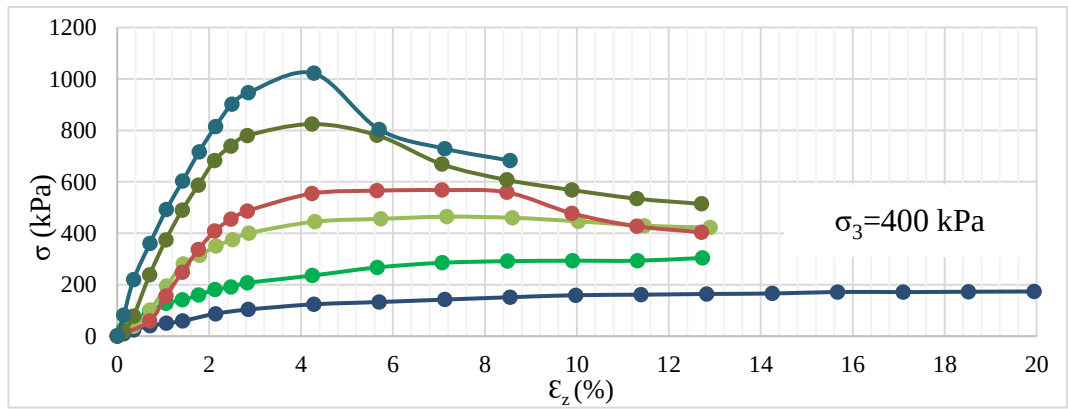
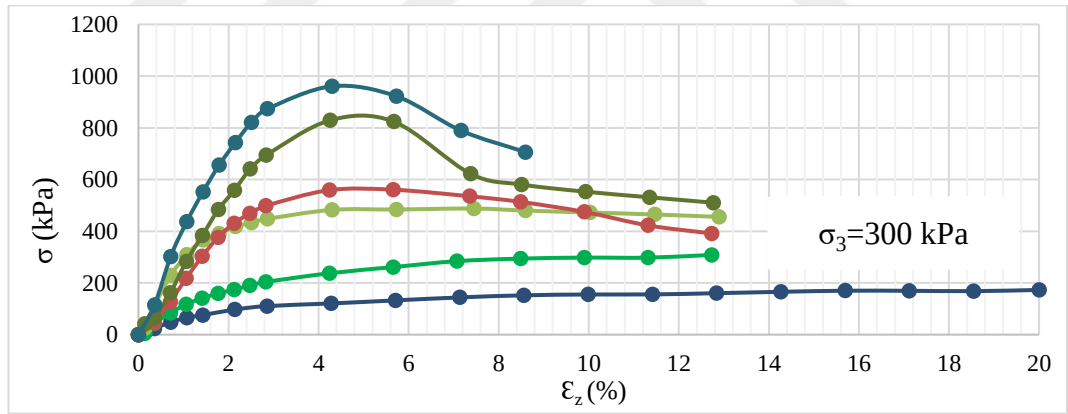
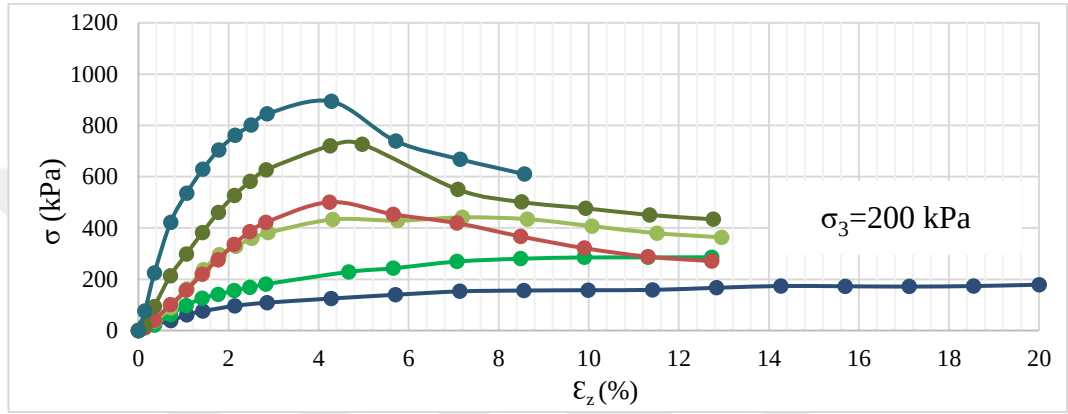
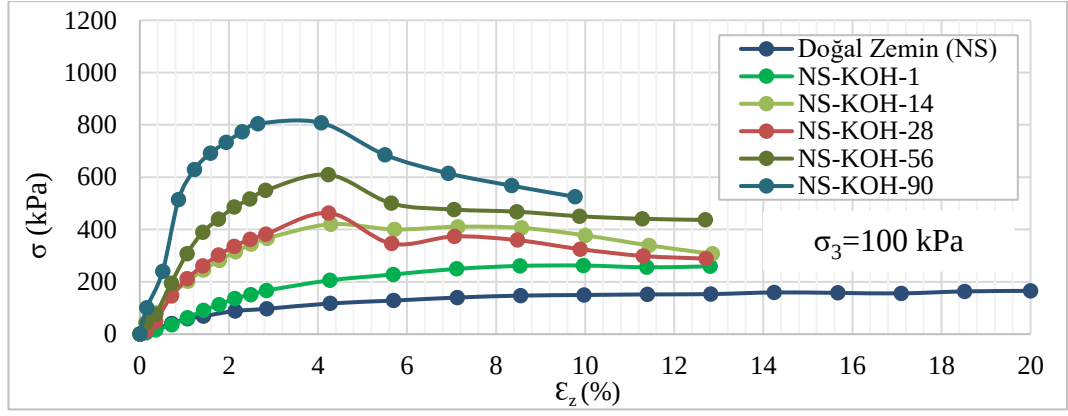
Şekil 7.22. %20 kum katkısı için yenilme zarfları.



Şekil 7.23. %25 kum katkısı için yenilme zarfları.

7.3. Üçüncü Aşama

Tez çalışmasının deneysel kısmının üçüncü ve son aşamasında doğal zemine sadece KOH eklenerek numunelerdeki kayma direnci değişimi kür süresine bağlı olarak araştırılmıştır. Bu aşamada yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 7.24, Şekil 7.25, Tablo 7.6 ve Tablo 7.7’de sunulmuştur. Şekil 7.24’te doğal zemin ve KOH ile karıştırılmış doğal zemin numunelerinin gerilme-deformasyon grafikleri kür süresine bağlı olarak gösterilmektedir. Bu deneylerden elde edilen maksimum deviyör gerilmeler ve kırılma anlarındaki birim şekil değiştirmeler Tablo 7.6’ da sunulmuştur. Deney sonuçlarından elde edilen Mohr daireleri ve kırılma zarfları Şekil 7.25’te verilmektedir. Tablo 7.7’de ise KOH ile iyileştirilmiş zemin numunelerinde meydana gelen direnç artışları ve kayma direnci parametreleri gösterilmektedir.

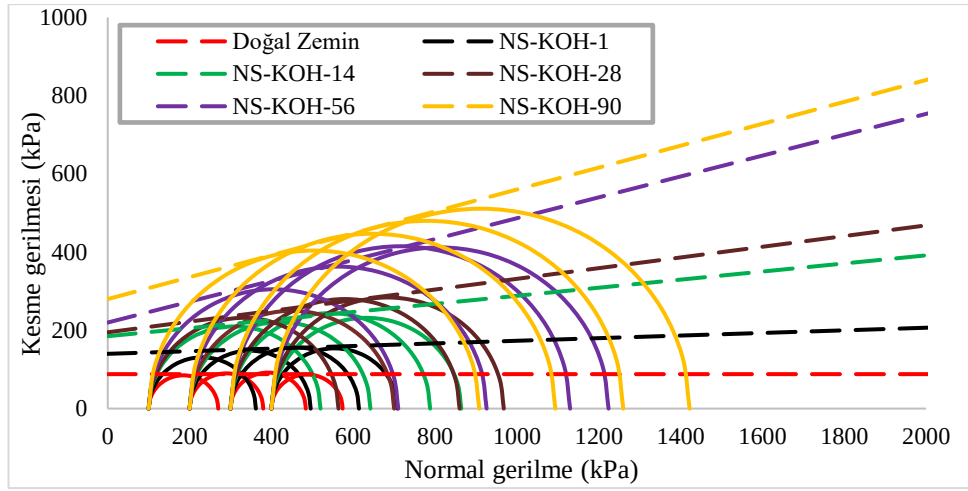


Şekil 7.24. Doğal zemin+KOH (NS+KOH) numunelerinde gerilme-deformasyon eğrileri.

NS-KOH numunelerinin 1 günlük kür süresinde kırılma anında şekil değiştirmelerin %9,96 ve %14,14 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 262 kPa ve 314 kPa arasında, 14 günlüklerde şekil değiştirmelerin 4,29% ve %7,45 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 420 kPa ve 488 kPa arasında, 28 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,24 ve %7,06 arasında, maksimum deviatör gerilmelerin 463 kPa ve 568 kPa arasında, 56 günlüklerde şekil değiştirmelerin %4,23 ve %4,96 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 610 kPa ve 829 kPa arasında ve 90 günlüklerde şekil değiştirmelerin %2,50 ve %4,29 arasında ve maksimum deviatör gerilmelerin 952 kPa ve 1157 kPa arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 7.24).

Numunelerin kür süresi arttıkça kayma direnci açısından hem kohezyonun hem de içsel sürtünme açısının arttığı görülmektedir. Kür süresi 1 günde şekil değiştirmelerin değerlerine bakıldığında numunelerin davranışlarının sünek olduğu, iyileşmenin tam gerçekleşmediği ve direncin doğal zeminin direncinden uzak olmadığı anlaşılmaktadır. Kür süresi 14 ve 28 günde, numunelerin davranışları sünekten gevreğe doğru gitmeye başlamış ve kırılma anında şekil değiştirmelerin değerlerinde azalma ve maksimum deviatör gerilmelerde artış gözlemlenmiştir. Kür süresi 56 ve 90 günde, numunelerin davranışlarının gevrek olduğu, şekil değiştirmelerin değerlerinin de hemen hemen sabit kaldığı ama 90 günlük kür süresinde dirençlerin daha yüksek değerlerde elde edildiği anlaşılmaktadır. Numunelerde KOH katkısının olmadığı durumda (doğal zemin), yük altında danelerin hareket etmesinin kolay olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan KOH varlığında, kür süresi arttıkça kimyasal bağların daha da aktif hale geldiği, sertleşme gerçekleştiği ve danelerin hareketinin zorlaştığı anlaşılmıştır. Buradan kür süresinin zeminin danelerin birbirine yapışma kabiliyetini yüksek seviyeye getirerek doğal zemini zayıf kohezyonlu bir halden daha güçlü kohezyonlu bir malzemeye dönüştürebileceği anlaşılmaktadır. Güçlü kohezif zeminlerin özelliklerinden en önemlisi danelerinin bağlanma gücüdür. Bu bağlanma gücü, zeminlerin basınç veya sürtünme gibi dış kuvvetlere maruz kaldığında kırılmaya karşı direnmesini sağlamaktadır.

Bu üçüncü aşamadan yapılan çıkarım KOH'in bir aktivatör değil, ancak stabilizatör olarak tanımlanabileceğidir. Potasyum hidroksit ile işlenmiş zeminin uzun vadede mukavemetinde önemli bir artış olacağı teyit edilmiştir (Phair, 2001).



Şekil 7.25. Doğal zemin+KOH (NS+KOH) numunelerinde yenilme zarfları.

Tablo 7.6. NS-KOH numunelerinde maksimum deviatör gerilmeler (kPa).

Numune	Kür (gün)	$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa		$\sigma_3=400$ kPa		$\sigma_{d,max}$ (Ort)
		$\sigma_{d,ma}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	
NS	1	169	18,59	179	17,14	184	17,17	173	19,94	176,25
	1	262	9,96	296	14,14	314	14,14	309	14,14	295,41
	14	420	4,29	441	7,19	488	7,45	464	7,16	453,44
NS-KOH	28	463	4,24	501	4,24	561	5,66	568	7,06	523,04
	56	610	4,23	727	4,96	829	4,26	824	4,24	747,52
	90	952	2,50	1055	2,84	1073	4,27	1157	4,29	1059,55

Tablo 7.7. NS-KOH numunelerinde maksimum deviatör gerilme artış oranları ve kayma direnci parametreleri.

Numune	Kür (gün)	Çevre basıncı (kPa)				c_u (kPa)	$\phi_u(^{\circ})$
		100	200	300	400		
NS	1	-	-	-	-	88	0
	1	55,28	65,56	70,71	78,48	140	1,90
NS-KOH	14	148,76	146,48	165,11	168,42	185	5,90
	28	174,06	179,75	204,69	228,12	195	7,78
	56	260,76	306,03	350,65	376,53	220	14,93
	90	463,44	489,54	483,36	568,98	280	15,64

7.4. Dördüncü Aşama (Karşılaştırma)

Karşılaştırma kısmında, sadece %25 olivin katkılı ve %25 kum katkılı olarak hazırlanmış numuneler arasında, KOH varlığında ve yokluğunda dayanıma ait sonuçların mukayesesi yapılmıştır (Şekil 7.26.). Drenajsız kayma direnci parametrelerini belirlemek için doğal zemin (NS), olivinle işlenmiş zemin (S-OL) ve olivin + KOH ile aktifleştirilmiş zemin (S-OL-KOH), kumla işlenmiş zemin (S-SA) ve kum + KOH ile aktifleştirilmiş zemin (S-SA-KOH) numuneleri üç eksenli deneyine (UU) tabi tutulmuştur. Tüm deneyler, Tablo 7.8 ve Tablo 7.9, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’ de verildiği gibi farklı kür süreleri (1, 28, 56 ve 90 gün) için ve farklı çevre basınçları (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.26. Yapılan mukayese numuneleri (%25 olivin ve %25 kum).

Tablo 7.8. Maksimum deviatör gerilmeler ve kırılma anında deformasyonlar.

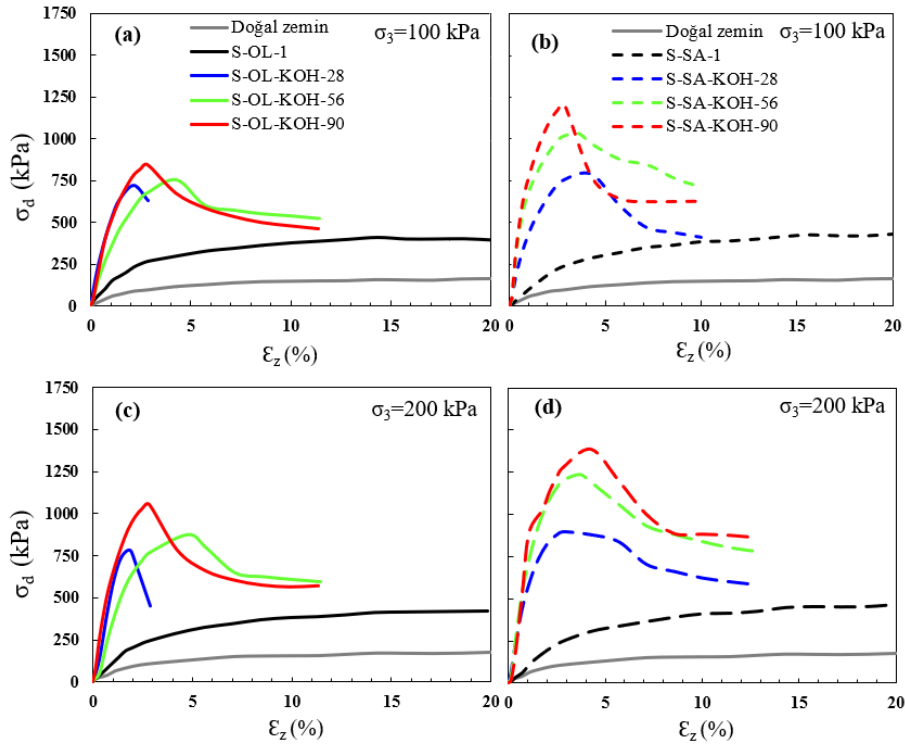
Numune	Kür (gün)	$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa		$\sigma_3=400$ kPa		$\sigma_{d,max}$ (Ort) (kPa)
		$\sigma_{d,ma}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	
NS	1	169	18.59	179	17.14	184	17.17	173	19.94	176.25
S-OL-1	1	399	20.00	380	20.00	382	20.00	379	20.00	385.00
S-OL-KOH-28	28	722	2.14	786	1.85	877	2.86	936	2.14	830.25
S-OL-KOH-56	56	755	4.29	876	4.76	971	5.71	1057	4.28	914.75
S-OL-KOH-90	90	843	2.84	1055	2.83	1100	2.85	1218	4.24	1054.00
S-SA-1	1	427	19.94	466	20.00	428	20.00	511	20.00	458.00
S-SA-KOH-28	28	789	4.29	900	2.86	1091	4.29	1159	4.29	984.75

Tablo 7.8. (Devamı) Maksimum deviatör gerilmeler ve kırılma anında deformasyonlar.

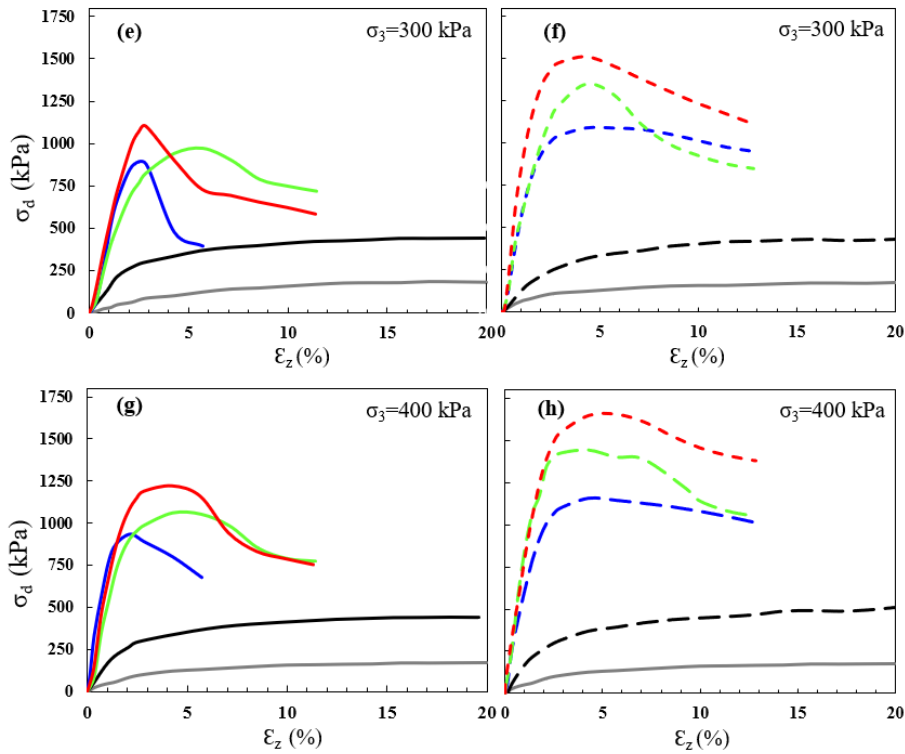
Numune	Kür (gün)	$\sigma_3=100$ kPa		$\sigma_3=200$ kPa		$\sigma_3=300$ kPa		$\sigma_3=400$ kPa		$\sigma_{d,max}$ (Ort) (kPa)
		$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	$\sigma_{d,max}$ (kPa)	ϵ_f (%)	
S-SA-KOH-56	56	1036	3.61	1235	3.70	1350	4.28	1444	4.26	1266.25
S-SA-KOH-90	90	1205	2.87	1388	4.27	1515	4.27	1654	5.71	1440.50

Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’te sunulan gerilme-deformasyon grafiklerinden numunelerin sünek ve gevrek olmak üzere iki farklı davranışa sahip oldukları görülmektedir. Doğal zemin numuneleri (NS), olivinle işlenmiş zemin (S-OL) veya kumla işlenmiş zemin (S-SA) sünek davranış gösterirken, olivin + KOH ile aktifleştirilmiş numuneler (S-OL-KOH) veya kum + KOH ile aktifleştirilmiş numuneler (S-SA-KOH) gevrek davranış göstermiştir. Bu farklı davranışlar daha önceki çalışmalarda da benzer şekilde gözlemlenmiştir (Fasihnikoutalab ve ark., 2016; Driss ve ark, 2023).

NS numunelerinde kırılma anında deformasyon %17,14 ile %20 arasında bulunmuştur. Sadece olivin ile işlenmiş numunelerde (S-OL), deformasyon %20’ ye ulaşmıştır. Farklı kür sürelerine (28, 56 ve 90 gün) sahip S-OL-KOH numuneleri için kırılma anında deformasyon %1,85 ile %5,71 arasında değişmektedir. Sadece kumla işlenmiş numuneler (S-SA) için kırılma anındaki deformasyonlar %19,94 ile %20 arasında değişmektedir. Farklı kür sürelerine (28, 56 ve 90 gün) sahip S-SA-KOH numuneleri için kırılma anındaki deformasyonlar %2,86 ile %5,71 arasında değişmektedir. Deformasyondaki değişim göz önüne alındığında, KOH varlığında işlenmiş numunelerin davranışının süneklikten gevrekliğe doğru değiştiği ortaya çıkmıştır. NS numunelerinin maksimum deviatör gerilme değerleri S-OL ve S-SA numunelerine göre daha düşüktür. Bunun nedeni olivin ve kum danelerinin katılımının kuru yoğunluğun artmasına neden olmasıdır. S-OL-KOH ve S-SA-KOH numunelerinin maksimum deviatör gerilme değerleri, S-OL ve S-SA numunelerinin deviatör gerilme değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni KOH varlığında olivin veya kumla işlenmiş kil kombinasyonlarında kimyasal bağların zemini güçlendirerek başka bir malzemeye dönüştürmesidir.



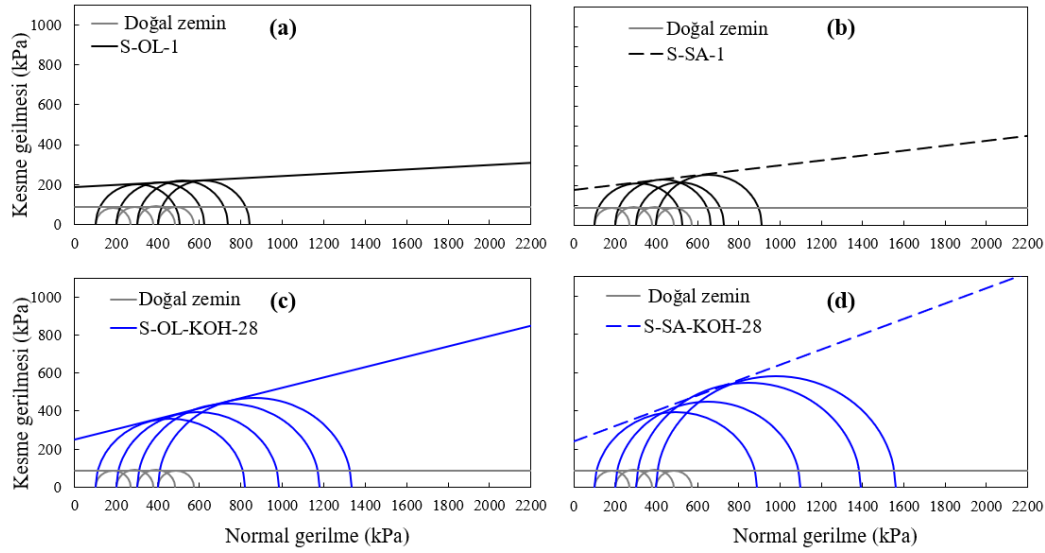
Şekil 7.27. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde gerilme-deformasyon ilişkisi: (a), (c) olivin, (b), (d) kum.



Şekil 7.28. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde gerilme-deformasyon ilişkisi: (e), (g) olivin, (f), (h) kum.

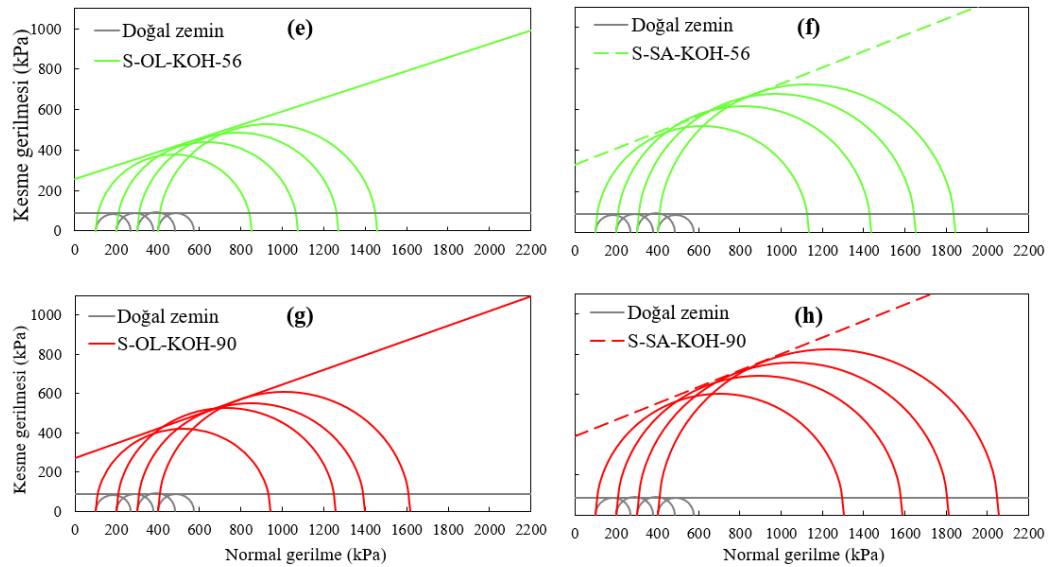
Zayıf kohezyonlu zeminler, danelerinin zayıf bağlanmasından dolayı yapışma etkisi az olan ve yüksek boşluk oranıyla karakterize edilen bir zemin türüdür. Bu bağlamda olivin ve kum daneleri varlığında zayıf zeminin sıkıştırılabilir veriminin artırılması ve potasyum hidroksit (KOH) varlığında kristal fazların kimyasal bağlarının aktive edilmesiyle iki açıdan iyileştirme elde edilmiştir. KOH varlığında zeminin yapısal sağlamlığı ve daneleri güçlü bir şekilde düzenli tutma yeteneği bulunmaktadır. Güçlü kohezyonlu zeminlerin en önemli özelliklerinden biri danelerinin iyi bir şekilde bağlanmasıdır. Numunelerde KOH bulunmadığında yük altında danelerin hareket etmesi kolay iken KOH varlığında kimyasal bağların aktive olmasıyla danelerin hareket etmesinin zor hale geldiği anlaşılmıştır.

Şekil 7.29'da doğal zemin (NS) için, içsel sürtünme açısı 0 ve kohezyon 88 kPa'dır. Öte yandan sadece olivinin (S-OL) varlığında kayma mukavemeti artmakta ve kohezyon 88 kPa'dan 190 kPa'a, içsel sürtünme açısı ise 0'dan 3,14 dereceye değişmektedir. Olivinin yerini kum (S-SA) aldığında, içsel sürtünme açısı 7,29 derece olacak şekilde kohezyon 88 kPa' dan 177 kPa'a değişmektedir. Bu iki durum için sonuçlar çok benzer olduğundan, ortalama maksimum deviator gerilmelere bakmak dışında farkı söylemek zor olmaktadır. Bu bağlamda, kumun genel mekanik dayanım açısından olivinden daha iyi performans gösterdiği düşünülebilir. Ancak kumun dane özgül ağırlığının olivinden düşük olması nedeniyle katkı olarak kullanılan kum hacminin olivininkini aşması kumlu numunelerde daha yüksek bir kompaktlık ve düşük boşluk oranı sağlamıştır. Bu fikir Tablo 7.9'da sunulan boşluk oranı değerleriyle teyit edilmektedir. Her iki durumda da artışların sebebi, olivin veya kumun danelerinin etkisi altında gerçekleşmiştir. Benzer bir durum daha önce yapılan bir çalışmada da gözlemlenmiş; dane boyutu arttıkça tüm numuneler için serbest basınç dayanımı değerleri de artmıştır (Abdilmuner ve ark, 2022).



Şekil 7.29. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde kırılma zarfları: (a), (c) olivin, (b), (d) kum.

Olivin takviyeli numunelerde (S-OL-KOH) kür sürelerine (28 gün, 56 gün ve 90 gün) bağlı olarak kohezyon değerleri sırasıyla: 250 kPa, 255 kPa ve 270 kPa, içsel sürtünme açısı değerleri ise sırasıyla: 15,20 derece, 18,52 derece ve 20,56 derece olarak elde edilmiştir. Kum takviyeli numunelerde (S-SA-KOH) kür sürelerine (28 gün, 56 gün ve 90 gün) bağlı olarak kohezyon değerleri sırasıyla: 240 kPa, 330 kPa ve 390 kPa, içsel sürtünme açısı değerleri sırasıyla: 21,80 derece, 21,55 derece ve 22,03 derece olarak elde edilmiştir. Tablo 7.10’da deviyör gerilmesindeki artış oranı, doğal zemin deviyör gerilmesine göre hesaplanmıştır.



Şekil 7.30. %25 olivin ve kum katkılı numunelerde kırılma zarfları: (e), (g) olivin, (f), (h) kum.

Tablo 7.9. Numunelerin fiziksel özellikleri.

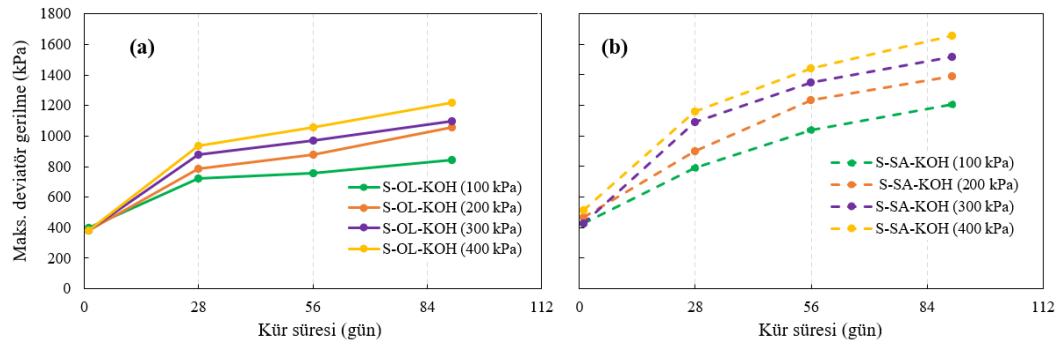
N°	Numune sembolü	Numunelerin açıklaması	e -	n (%)	Sr (%)
1	NS	Doğal Zemin	0,52	34,30	95,13
2	S-OL-1	Zemin+%25 Olivin	0,45	30,90	88,91
3	S-OL-KOH-28	Zemin+%25 Olivin+KOH	0,44	30,62	87,58
4	S-OL-KOH-56	Zemin+%25 Olivin+KOH	0,42	29,73	86,92
5	S-OL-KOH-90	Zemin+%25 Olivin+KOH	0,42	29,77	84,84
6	S-SA-1	Zemin+%25 Kum	0,41	29,03	90,17
7	S-SA-KOH-28	Zemin+%25 Kum+KOH	0,38	27,40	93,53
8	S-SA-KOH-56	Zemin+%25 Kum+KOH	0,38	27,64	93,76
9	S-SA-KOH-90	Zemin+%25 Kum+KOH	0,39	28,15	89,93

Tablo 7.10. Maksimum deviator gerilme artışı ve kayma mukavemeti parametreleri.

Numune	Kür (gün)	Maks. Deviator gerilme artış oranı (%)				Kayma mukavemeti parametreleri	
		Çevre basıncı (kPa)				c _u (kPa)	φ _u (°)
		100	200	300	400		
NS	0	-	-	-	-	88	0
S-OL-1	1	140,83	136,87	139,13	155,49	190	3,14
S-OL-KOH-28	28	327,22	339,11	376,63	441,04	250	15,20
S-OL-KOH-56	56	346,59	389,36	427,45	511,27	255	18,52
S-OL-KOH-90	90	399,06	489,61	498,05	604,17	270	20,56
S-SA-1	1	152,66	160,34	132,61	195,38	177	7,29
S-SA-KOH-28	28	366,86	402,79	492,93	569,94	240	21,80
S-SA-KOH-56	56	513,02	589,94	633,70	734,68	330	21,55
S-SA-KOH-90	90	613,02	675,42	723,37	856,07	390	22,03

Şekil 7.31’de KOH varlığında tüm numunelerin mukavemetinin kür süresi arttıkça arttığı görülmektedir. Kür süresi arttıkça zeminin dayanımının arttığı bu durum önceki çalışmalarda da benzer şekilde gözlenmiştir (Amini ve Ghasemi 2019; Teing ve ark., 2019). KOH varlığında işlenmiş numunelerin direncindeki tüm artışlar, XRD analizi

bölümünde detaylandırılacak olan moleküllerin atomlarındaki kimyasal bağların (kristalin fazlar) aktivasyonundan kaynaklanmaktadır.

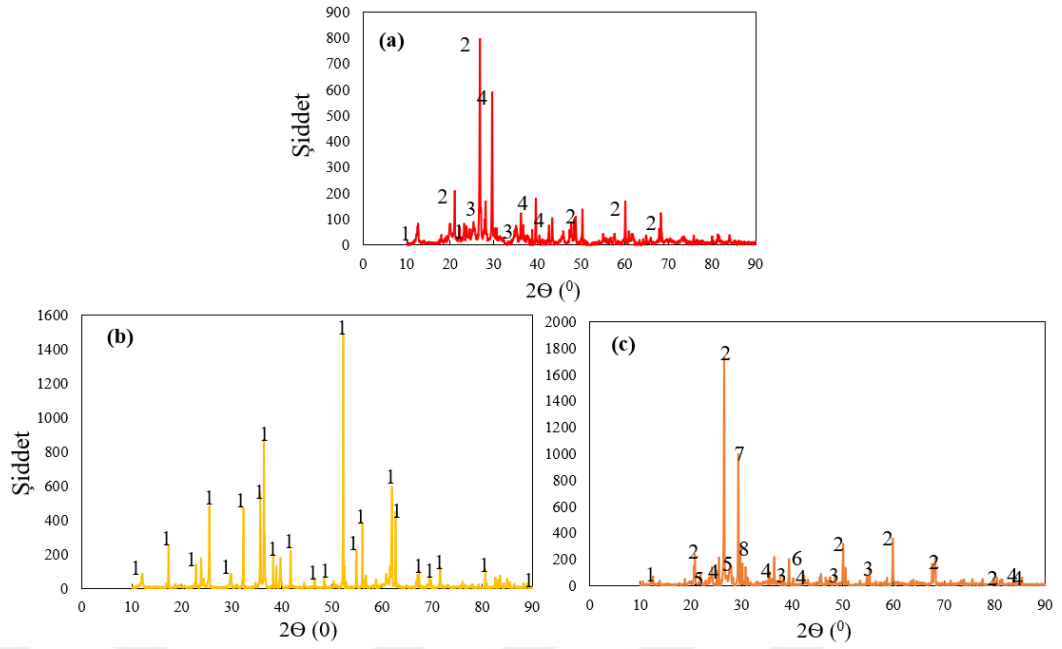


Şekil 7.31. Farklı kür sürelerinde maksimum deviator gerilmeler: (a) Olivin, (b) Kum.

7.5. XRD Analizi

Doğal zemin (NS) numuneleri, olivin veya kum daneleri ile işlenmiş killi zemin numuneleri (S-OL-1 ve S-SA-1) ve 90 günde potasyum hidroksit varlığında olivin veya kum daneleri ile işlenmiş killi zemin numuneleri (S-OL-KOH-90 ve S-SA-KOH-90) üzerinde mineralojik bileşimlerin bulunması için XRD analizi yapılmıştır. Kimyasal bileşimler Şekil 7.32, Şekil 7.33, Tablo 7.11 ve Tablo 7.12’de verilmiştir. Numunelerin mineral bileşimindeki değişiklikleri ve yapılarını doğrudan etkileyen kristal fazları hakkında önemli bilgiler sağlanmıştır.

İşlenmemiş doğal zemin numunesinde yapılan analizlerde yoğunluklarına göre mevcut olan en yoğun minerallerin Kuvars, Kalsit, Anortit ve Klorit-serpantin olduğu gözlemlenmiştir. Doğal zeminde (NS), ana tepe noktaları 2θ ekseninde 20 ile 40 derecelik açı arasında yer almakta olup en büyük tepe noktası tam olarak 26,72 derecelik bir açıyla Kuvars’a karşılık gelmiştir. Olivin için pikler aynı değildir ancak kristalin fazları aynıdır. Olivinin tek fazı, Demir (Fe) ile karşılaştırıldığında önemli bir Magnezyum (Mg) konsantrasyonuna işaret eden ve EDS analizi ile tutarlı olan Forsterit (Mg_2SiO_4) olduğu görülmüştür. Forsterit fazının en büyük tepe yoğunluğu tam olarak 52,16 derecelik açıya karşılık gelmiştir. Kum için yoğunluklarına göre numunede bulunan en yoğun minerallerin Kuvars, Kalsiyum Karbonat, Anataz, Kaolinit, Korindon, Albit, Potasyum Oksit ve Kalsiyum Oksit olduğu gözlenmiştir. Ana tepe noktaları 2θ ekseninde 20 ile 30 derecelik açı arasında yer almış ve en büyük tepe noktası tam olarak 26,62 derecelik bir açıyla Kuvars’a karşılık gelmiştir (Şekil 7.32., Tablo 7.11.).



Şekil 7.32. XRD analizi (a) NS, (b) olivin, (c) kum.

Tablo 7.11. XRD analiz sonuçları (malzemeler).

Pik	NS	Olivin	Kum
1	Klorit-Serpantin (Mg, Al) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Olivin (Forsterit) Mg ₂ (SiO ₄)	Kaolinit Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
2	Kuvars (SiO ₂)	-	Kuvars (SiO ₂)
3	Anortit (CaAl ₂ Si ₂ O ₈	-	Anataz (TiO ₂)
4	Kalsit (CaCO ₃)	-	Korindon (Al ₂ O ₃)
5	-	-	Albit (Na (AlSi ₃ O ₈))
6	-	-	Potasyum Oksit(Na (AlSi ₃ O ₈))
7	-	-	Kalsiyum Karbonat (CaCO ₃)
8	-	-	Kalsiyum Oksit (CaO)

S-OL-1 numunesinde yoğunluklarına göre hâkim mineraller Amesit, Olivin (Forsterit), Kuvars, Mathiasit, Korundum, Protoenstatit, Ferdasilisit ve Olivin (Fayalit) olarak gözlenmiştir. Ana tepe noktaları 2θ ekseninde 26,96 ile 62 derecelik açı arasında yer almış, en büyük tepe noktası da tam olarak 26,96 derecelik bir açıyla Kuvars’a karşılık gelmiştir. Bu ifade daha önce yapılan bir çalışmada da gözlemlenmiştir (Emmanuel ve ark, 2019). S-SA-1 numunesinde en yoğun fazlar Klorit-serpantin, Kuvars, Anortit, Kalsit’te görülmüştür. Ana tepe noktaları 2θ ekseninde

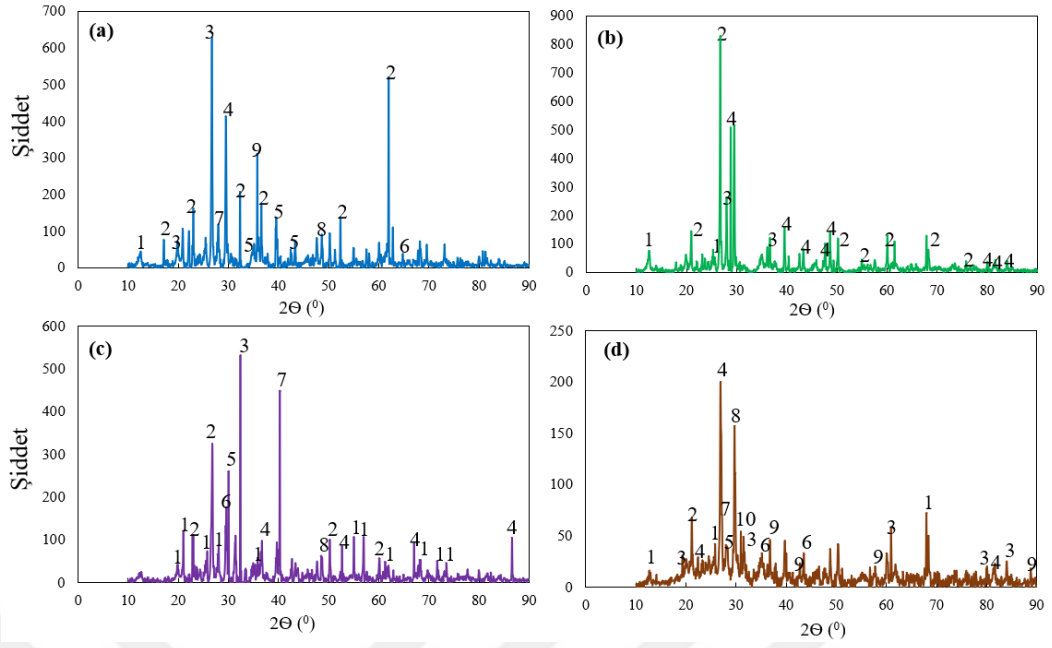
üzerinde 26 ile 30 derecelik açı arasında yer almış, burada en büyük tepe tam olarak 26,78 derecelik bir açıyla Kuvars' a karşılık gelmiştir.

S-OL-KOH-90 numunesi için en yoğun fazlar Kalsiyum-silisit, Kuvars, İllit, Forsterit, Kalsit, Kalsiyum Karbonat, Titanyum Oksit ve Natroalunit' e işaret etmiştir. Ana tepe noktaları 2θ ekseninde 26 ile 40 derecelik açı arasında yer almış ve en büyük tepe noktası tam olarak 32,44 derecelik bir açıyla Kalsiyum-siliküre karşılık gelmiştir.

S-SA-KOH-90 numunesi için Potasyum Manganez Oksit, Muskovit, Demir Hidroksit, Kuvars, Protoenstatit, Alüminyum Oksit, Sanidin, Kalsiyum Karbonat, Korindon ve Potasyum Titanyum Oksit Hidrat baskın olarak gözlenirken, ana pikler 20 ve 30 derece arasında değişmekte olup en büyük pik Kuvarsa karşılık gelmiştir. S-OL-KOH-90 numunesi dışındaki tüm numunelerde, doğal zeminin ana minerali ile tutarlı olan ve her kombinasyon için %75'i temsil eden Kuvars piki baskındır.

Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'te piklerin üstündeki sayılar Tablo 7.11 ve Tablo 7.12'de listelenen mineralleri göstermektedir. Karşılaştırmalar yapıldığında, S-SA-1 numunelerinin S-OL-1 numunelerinden daha fazla direnç artışı gösterdiği görülmüştür. Ancak bunun kimyasal etkilerle olmadığı, ancak düşük özgül ağırlıklı ve dolayısıyla yüksek hacimli kum varlığından dolayı gerçekleştiği yorumlanmıştır.

S-SA-KOH-90 numunesi, S-OL-KOH-90 numunesinden daha fazla direnç göstermiştir. Artışın birinci sebebi kumun yüksek hacimsel miktarı, ikincisi ise kimyasal çözünme sonucunda doğan yapışkan kimyasal etkilerin varlığıdır. S-OL-KOH-90 numunesinin kombinasyonunda (KOH varlığında), KOH ile doğrudan bağa sahip olan iki kristalin faz bulunmaktadır: İllit [$K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$] ve Natroalunit [$Na_{0.58} K_{0.42}Al_3(SO_4)_2(OH)_6$]. Bunun yanında S-SA-KOH-90 numunesinin kombinasyonunda KOH ile doğrudan bağa sahip olan dört kristal faz bulunmaktadır: Potasyum Manganez Oksit [$K_2Mn_4O_8$], Muskovit [$KA_{12}(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$], Sanidin [$KAlSi_3O_8$], Potasyum Titanyum Oksit Hidrat [$K_2TiO_4H_2O$]. Bu mineraller, kayma mukavemeti parametrelerinin doğrudan arttırılmasını sağlayan Silikat (SiO_2) ve Alüminatın (AlO_2) çözünmesiyle oluşan sağlam kristallerdir (Cristelo ve ark, 2011; Feng ve ark, 2004).



Şekil 7.33. XRD analizi: (a) S-OL-1, (b) S-SA-1, (c) S-OL-KOH-90, (d) S-SA-KOH-90.

Tablo 7.12. XRD analiz sonuçları (karışım numuneleri).

Pik	S-OL-1	S-SA-1	S-OL-KOH-90	S-SA-KOH-90
1	Amezit (Mg ₂ Al) (AlSiO ₅ (OH) ₄)	Klorit-Serpantin (Mg, Al) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	İllit K(Al ₄ Si ₂ O ₉ (OH) ₃)	Potasyum Manganese Oksit K ₂ Mn ₄ O ₈
2	Olivin (Forsterit) Mg ₂ SiO ₄	Kuvars SiO ₂	Kuvars SiO ₂	Muskovit KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
3	Kuvars SiO ₂	Anortit CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Kalsiyum silisit CaSi ₂	Demir Hidroksit Fe(OH) ₂
4	Kalsit CaCO ₃	Kalsit (Mg _{0,03} Ca _{0,97}) (CO ₃)	Forsterit (Ni ₃ , Mg ₇) ₂ SiO ₄	Kuvars SiO ₂
5	Korindon Al ₂ O ₃	-	Klasit (Mg _{0,03} , Ca _{0,97})(CO ₃)	Protoenstatit MgSiO ₃
6	Mathiasite K(Ti ₁₃ Cr ₄ FeZrMg) O ₃₈	-	Kalsiyum karbonat CaCO ₃	Aluminyum oksit Al _{1,92} Cr _{0,08} O ₃
7	Protoenstatit MgSiO ₃	-	Titanyum Oksit Ti ₃ O	Sanidin KAlSi ₃ O ₈
8	Ferdisilisit FeSi ₂	-	Natroalunit Na _{0,58} K _{0,42} Al ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Kalsiyum Karbonat CaCO ₃

Tablo 7.12. (Devamı) XRD analiz sonuçları (karışım numuneleri).

Pik	S-OL-1	S-SA-1	S-OL-KOH-90	S-SA-KOH-90
9	Olivin (Fayalit) Fe ₂ (SiO ₄)	-	-	Korindon Al ₂ O ₃
10	-	-	-	Potasyum Titanyum Oksit Hidrat K ₂ TiO ₄ ·H ₂ O

Bu çalışmada olivin ve kum ile işlenmiş kil üzerinde iki farklı koşulda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Potasyum hidroksitin varlığında ve yokluğunda gerçekleştirilen deneylerde davranışlar karşılaştırılmıştır. Karışımlarda kum ve olivin doğal zeminin kuru ağırlığına göre belli oranlarda alınmıştır. Özgül ağırlığı daha düşük olan kum hacim olarak daha fazla yer tutmuş böylece kum takviyeli karışımların boşluk oranları daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Dane özgül ağırlığı daha yüksek olan olivin ağırlıkça alındığında daha küçük hacimleri doldurmuştur. Doğal zeminlerin ortalama boşluk oranı 0,52 civarında iken olivin takviyeli numunelerde bu değer 0,43'e, kum takviyeli numunelerde ise 0,39'a düşmektedir. Ayrıca olivin daneleri kum danelerine göre daha yüksek kuru yoğunluk değerlerine sahip olmasına rağmen kayma dayanımı söz konusu olduğunda tam tersi bir durumla karşılaşmıştır. Özgül ağırlığın neden olduğu kuru yoğunluktaki artışın kayma mukavemetinde paralel bir artışın göstergesi olmadığı anlaşılmıştır.

Bu karşılaştırmalı çalışmanın ardından, tüm deneyler ve analizler sonucunda, olivin kullanımının iyileştirmedeki rolünün tek seçenek olmadığı, benzer granülometri ve kimyasal bileşime sahip kumun da başarılı bir iyileştirme sağlayabileceği belirlenmiştir.

8. SONUÇ

Bu deneysel tez çalışması kapsamında, Kocaeli ilinden getirilen düşük plastisite killi bir zemin üzerinde çalışılmıştır. Numunenin 40 No'lu elekten geçen kısmı üzerinde likit limit, plastik limit ve piknometre deneyleri yapılmıştır. Numunenin %4' ü kum ve %96'sı ince daneli malzemedan oluşmaktadır. Bu özelliklere sahip numune, birleşik zemin sınıflandırma sistemine (ASTM D-4318) göre düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada düşük plastisiteli kilin mukavemetini artırmak için çeşitli katkı maddelerinin etkisinin araştırıldığı üç aşamalı bir deneysel program yürütülmüştür. Karışımlarda olivin, kum ve potasyum hidroksit (KOH) olmak üzere üç farklı katkı maddesi kullanılmıştır. Kompaksiyon deneyleri yapılarak doğal kil ve katkılı karışımların her birisine ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim ağırlığı belirlenmiştir.

Sıkıştırma işlemi öncelikle Proctor ve Harvard minyatür kompaksiyon yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin eş özellikte hazırlanması amaçlandığı için doğal zemin ve karışım numuneleri üzerinde iki yöntemle sıkıştırılan numunelere ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mukayese sonucunda, Proctor kompaksiyon ve Harvard minyatür kompaksiyon deneyinin hemen hemen aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Buradan hareketle daha az numune gerektiği için tüm numunelerin sıkıştırılarak hazırlanması işlemi sadece Harvard minyatür kompaksiyon yöntemi kullanılarak yürütülmüştür. Harvard minyatür kompaksiyonunda, her numune için optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını belirlemek için 600 gramlık bir numune alınmış ve farklı su oranları (%5, %10, %15 ve %20) ile homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Doğal numuneler ve katkılı karışımlar için de aynı prosedür uygulanarak optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir.

Her bir karışım numunesi, çapı 3.5 cm ve yüksekliği 7 cm olan bir kalıp içinde her bir karışıma ait optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri gözetilerek sıkıştırılmıştır. Proctor standardından daha küçük bir kalıp kullanıldığı için, standart Proctor enerjisinin sabit tutulması amacıyla vuruş sayısı 25' ten 6' ya

düşürülmüştür. KOH alkali aktivatörü, damıtılmış su içinde 10 Molarite konsantrasyonda çözüldükten sonra doğal zemin, olivin ve kum karışımlarına eklenmeden önce soğumaya bırakılmıştır. Aktivasyonlu numunelere, optimum su muhtevasına gelecek kadar KOH solüsyonu eklenerek karışımlar sıkıştırılmıştır. Aktivasyonsuz numuneler ise, doğal su muhtevalarına göre sıkıştırılmıştır. Numunelerin su muhtevasında herhangi bir değişiklik olmaması için kür süresi boyunca numuneler plastik bir saklama kutusunda bekletilmiş ve önceden iki plastik torbaya konulmuştur. Tüm numuneler, kür süresi boyunca ortam sıcaklığında kürlenmiştir.

Bu çalışmada olivin, kum ve potasyum hidroksit gibi malzemelerin, zeminin mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik olarak kullanılması araştırılmıştır. Düşük plastisiteli killi zeminlerde mukavemet değerlerini artırmak için potansiyel katkı maddelerini belirlemek büyük bir önem taşımaktadır. Bu tür çalışmalar, zemin iyileştirme tekniklerinin geliştirilmesi ve mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, kayma direnci kayma direnci konusunda dört aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada, doğal zemine farklı oranlarda (%10, %15, %20 ve %25) olivin daneleri eklenmiştir. Olivin ilavesiyle zeminin kayma direncinin zaman içinde gelişimini görmek üzere 1 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 günlük kür süreleri sonunda konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli hücre kesme deneyi (UU) yapılmıştır. UU deneyleri, farklı çevre basınçları (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa) altında gerçekleştirilmiştir. Bu ilk aşama deneylerinin sonuçları olivin mineralinin tek başına kullanıldığında killi zeminin özelliklerini güçlendirmek için zamana bağlı gelişen belirgin bir kimyasal etkisi olmadığını göstermiştir. Ancak, olivin danelerinin zeminin mekanik özelliklerinin artışında belirgin bir etkiye sahip olduğu da kanıtlanmıştır. Bu bağlamda, olivin mineralinin zeminin fiziksel özelliklerini etkilediği ve olivin ilavesinin mekanik özellikleri artırma potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. Kimyasal etkilerin bariz bir şekilde gözlemlenmemesine rağmen mekanik özelliklerde iyileştirmenin olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, olivin mineralinin zemin iyileştirme uygulamalarında potansiyel bir daneli malzeme olarak değerlendirilmesini desteklemektedir.

İkinci aşama, birinci aşamanın sonuçlarından yola çıkılarak yürütülmüştür. Sadece olivin ilavesinin zamanla net bir kimyasal etkisinin olmadığı görüldüğü için bir aktivatör olarak potasyum hidroksit (KOH) kullanılmasına karar verilmiştir. Bu

aşamada killi zemine olivin, potasyum hidroksit ile ilave edildiğinde zamanla önemli ölçüde güçlendirme etkisi görülmüştür.

Üçüncü aşamada, olivine benzer dane dağılımına sahip bir kum kullanılarak iyileştirme özelliğinin sadece olivine ait olup olmadığı araştırılmıştır. Yani KOH kullanımı ile oluşan kimyasal reaksiyonların sadece olivine özgü olup olmadığı deneysel olarak ortaya konmuştur. Buna yönelik olarak olivin daneleri ve kum daneleri arasında bir karşılaştırma yapılarak, olivin danelerinin bu kombinasyon içindeki etkileri incelenmiştir. Bu aşamanın sonunda olivine benzer granülometri ve kimyasal bileşime sahip kumun da başarılı bir iyileştirme sağlayabileceği ortaya konmuştur. Bu bağlamda, ikinci aşamada elde edilen iyileştirmenin ana faktörünün KOH olduğu düşünülmektedir.

Dördüncü aşamada, danelerin etkisi, aktivatörün etkisi ve zamanın etkisi gibi faktörler göz önünde bulundurulmuştur. Bu son aşamada potasyum hidroksit (KOH) maddesinin tek başına etkisini gözlemlemek için bir çalışma yürütülmüştür. Aynı zamanda bu aşama, üç farklı katkı maddesinin (olivin, kum ve KOH) hangisinin bu güçlendirmede veya kombinasyonda anahtar faktör olduğunu ortaya koymuştur. Bu aşamanın sonunda potasyum hidroksitin (KOH) bu tip killi zeminlerin iyileştirilmesinde aktivatör olmaktan ziyade stabilizatör olduğu değerlendirilmiştir.

Bu deneysel çalışmada elde edilen ana sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Olivin ve kum oranı arttıkça karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlığı yükselirken optimum su muhtevaları azalmaktadır.
- Düşey gerilme altında elde edilen gerilme-deformasyon eğrisinden, potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilmemiş numunelerin sünek bir davranışa sahip olduğu, potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilmiş numunelerin ise gevrek davranış gösterdiği anlaşılmaktadır.
- Olivin veya kum ile işlenmiş numunelerin (S-OL, S-SA) dayanımının, potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilen numunelere göre (S-OL-KOH, S-SA-KOH, NS-KOH) zamanla artış göstermedikleri ve sadece danelerin katkısıyla direnç artışı sağladıkları gözlemlenmiştir. Potasyum hidroksit (KOH) ile aktive edilen numunelerde (S-OL-KOH, S-SA-KOH) ise dirence hem danelerin hem de zamanla gelişen kimyasal bağların etki ettikleri tespit edilmiştir.

- Zaman içerisinde (S-OL-KOH, S-SA-KOH, NS-KOH) numunelerinin dayanımı artış gösterirken kırılma anlarındaki şekil değiştirmeleri azalma göstermiştir. S-OL ve S-SA numunelerinin ise dayanım ve kırılma anındaki şekil değiştirmelerinin kür süresinden bağımsız olarak sabit kaldıkları görülmüştür.
- Maksimum deviatör gerilmelerden elde edilen sonuçlar, S-SA-KOH-90 ve S-OL-KOH-90 kombinasyon örneklerinin kayma mukavemeti açısından en iyi kombinasyonlar olduğunu göstermiştir. 100 kPa çevre basıncında, doğal zemine göre mukavemet artış oranı olivin için %399, kum için %613 olarak elde edilmiştir.
- FE-SEM görüntülerinden, olivin ile işlenmiş kilin, doğal zemine kıyasla daha az boşluklar ve süreksizlikler içerdiği; bununla birlikte daha sıkı bir yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır.
- XRD analizinde, KOH varlığında, oluştuğu gözlemlenen Natroalunit, Potasyum Manganez Oksit, Muskovit, Sanidin ve Potasyum Titanyum Oksit Hidrat gibi kristal fazların, malzemenin kayma mukavemeti parametrelerinin iyileştirilmesindeki ana faktörler olduğu anlaşılmıştır.

Bu tez çalışması sonunda Kromit cevheri zenginleştirme işleminden kaynaklanan olivin atığının, killi zemin stabilizasyonu için bir alternatif katkı malzemesi olabileceği ortaya konmuştur. Daha da önemlisi Olivin+KOH (bunun yanında Kum+KOH) ve KOH kombinasyonlarının killi zeminlerin stabilizasyonunda etkili bir şekilde kullanılabileceği öne çıkarılmıştır. Bu kombinasyonlar, kayma direncini artırmanın yanında karbondioksit emisyonlarını azaltarak önemli çevresel faydalar sağlayabilir.

Yapılan tüm deneyler ve analizler, olivin katkı maddesinin iyileştirmedeki rolünün tek olmadığını, benzer granülometri ve kimyasal bileşime sahip başka bir kumun da başarılı bir iyileştirme sağlayabileceğini ortaya koymuştur. Önceki çalışmalarda aktivatör olarak kullanıldığı görülen KOH, olivin, kum ve doğal zemine katıldığında tamamı üzerinde belirgin bir iyileştirme ortaya çıkarmıştır. Bu, alternatif bir katkı maddesinin sağladığı iyileştirmenin daha ekonomik bir şekilde sağlanabileceği anlamına gelmektedir. Bu bağlamda bu çalışma, başka araştırmacıların alternatif materyal bulma odaklı çalışmalarında örnek olabilecektir.

KAYNAKLAR

- Abdulmuner, M., Arslan E., Develioglu I., Firat H., (2022). Determination of Strength Characteristics of Natural and Stabilized Alluvial Subgrades. *Arabian Journal of Geosciences*. doi: 10.1007/s12517-022-09829-2.
- Erol, A. O., Çekinmez, Z. (2014). Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri. 14–01:1-305.
- Amini, O., Mojtaba G. (2019). Laboratory Study of the Effects of Using Magnesium Slag on the Geotechnical Properties of Cement Stabilized Soil. *Construction and Building Materials* 223:409–20. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.011.
- Anon. (1995). Madencilik Özel İhtisas komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu (Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu Cilt 2. Refrakter Killer ve gıferton Magnezit Disten, Andaluzit, Sillimanit, Dolomit, Olivin. Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara, 88–173.
- Anon. (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri II (Refrakter Killer ve gıferton-Manyezit-Dolomit-Olivin-Zirkondisten, Sillimanit, Andaluzit). Çalışma Grubu Raporu. Devlet Planlama Teşkilatı Ankara, 69–84.
- Arslan, E. (2021). İnce daneli alüvyonel zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti özelliklerinin farklı oranlarda kireç katkısıyla iyileştirilmesi. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İsaat Mühendisliği Bölümü , Yüksek Lisans Tezi.
- ASTM D 4318-00. (2000). Standards,for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- ASTM 4647. (2006). Standard Test Methods for of Soil Harvard Miniature Compaction Apparatus H-4165.
- ASTM D 854 – 02. (2006). Standard Test Methods for of Soil Specific GravitySolids by Water Pycnometer. ASTM Standards 24(1):120432.
- Basha, E., Hashim, R., Mahmud, H., Muntohar, A. (2004). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Build Materials*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001.
- Bergaya, F., Lagaly, G. (2006). Chapter 1 General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. *Developments in Clay Science 1(C)*:1–18. doi: 10.1016/S1572-4352(05)01001-9.
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Neil B., Milestone, N., Hassani, Ramezaniapour A. A. (2011). Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans. *Cement and Concrete Composites* 33(2):251–60. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.021.

- Bostancı, D. (2020). Sönmemiş ve hidrolik kireçle zemin iyileştirilmesi ve kütle stabilizasyonu. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- BS (410). (1986). Methods of Specification for Test Sieves. London: British Standards Institution 1986.
- Cemil G. (2007). Yüksek plastisite bir kilde kum miktarının kayma mukavemetine etkileri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Charles, J. A. (2002). Ground Improvement: The Interaction of Engineering Science and Experience-Based Technology. *Geotechnique*, 52(7), 527-532.
- Çimen, Ö., Fatih, Ş.C. (2019). Volkanik Tuf ve Amorf Silikanın Kilin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 7(3):459–66. doi: 10.21923/jesd.427775..
- Coduto, D.P. (1998). *Geoteknik Mühendisliği-İlkeler ve Uygulamalar*, Prentice Hall.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Pinto, A. T. (2011). Deep Soft Soil Improvement by Alkaline Activation. *Proc ICE-Ground Improv* 164. doi: 10.1680/grim.900032.
- Cristelo, N., Stephanie G., Tiago M., Daniel O., Rui S. (2012). Soil Stabilisation Using Alkaline Activation of Fly Ash for Self Compacting Rammed Earth Construction. *Construction and Building Materials* 36:727–35. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037.
- Driss, A. A., Harichane, K.,Ghrici, M., Sert, S.,Bol, E. (2023). Effect of Natural Pozzolana on the Unconsolidated Undrained Shear Strength of a Lime-Stabilized Clay Soil. *International Journal of Civil Engineering* 21(6):1007–26. doi: 10.1007/s40999-023-00817-5.
- Durmuş, S. (2007). Düşük plastisiteli killi-kumların kayma direnci parametrelerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Ekinci, A, Mohammad, H., Ertug, A. (2020). Strength, Stiffness, and Microstructure of Wood-Ash Stabilized Marine Clay. *Minerals* 10(9):1–23. doi: 10.3390/min10090796.
- Emmanuel, E., Anggraini, V. (2020). Effects of Desiccation-Induced Cracking and Leachate Infiltration on the Hydraulic Conductivity of Natural and Olivine-Treated Marine Clay. *International Journal of Environmental Science and Technology* 17(4):2259–78. doi: 10.1007/s13762-019-02606-x.
- Emmanuel, E., Vivi, A., Afshin, A., Mavinakere, E. R. (2020a). Interaction of Landfill Leachate with Olivine-Treated Marine Clay: Suitability for Bottom Liner Application. *Environmental Technology and Innovation* 17:100574. doi: 10.1016/j.eti.2019.100574.
- Emmanuel, E., Lee, L. Y., Afshin, A., Vivi, A. (2020b). Full-Factorial Two-Level Design in Optimizing the Contents of Olivine and Coir Fiber for Improving the Strength Property of a Soft Marine Clay. *Journal of Natural Fibers* 00(00):1–16. doi: 10.1080/15440478.2020.1751373.

- Emmanuel, E., Vivi A., Mavinakere E. R., Afshin A., Abdelmalek B. (2022). Improving the Engineering Properties of a Soft Marine Clay with Forsteritic Olivine. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 26(2):519–546. doi: 10.1080/19648189.2019.1665593.
- Fasihnikoutalab, M. H., Paul W., Huat, B. B. K., Afshin, A., Richard, J. B., Haslinda, N., Parminder, S. (2015). New Insights into Potential Capacity of Olivine in Ground Improvement. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 20(8):2137–48.
- Fasihnikoutalab, M. H., Afshin, A., Bujang, K. H., Paul, W., Richard J. B., Shahram P. (2016). Laboratory-Scale Model of Carbon Dioxide Deposition for Soil Stabilisation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8(2):178–86. doi: 10.1016/j.jrmge.2015.11.001.
- Fasihnikoutalab, M. H., Afshin, A., Bujang, K. H., Richard, J. B., Shahram, P., Parminder, S. (2017a). Utilisation of Carbonating Olivine for Sustainable Soil Stabilization. *Environmental Geotechnics* 4(3):184–98. doi: 10.1680/jenge.15.00018.
- Fasihnikoutalab, M. H., Afshin, A., Cise, U., Bujang, K. H., Richard J. B., Shahram P. (2017b). Utilization of Alkali-Activated Olivine in Soil Stabilization and the Effect of Carbonation on Unconfined Compressive Strength and Microstructure.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 29(6):06017002. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001833.
- Fasihnikoutalab, M. H., Shahram, P., Richard, J. B., Bujang, K. H. (2017c). The Effect of Olivine Content and Curing Time on the Strength of Treated Soil in Presence of Potassium Hydroxide. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 3(2):1–10. doi: 10.1007/s40891-017-0089-3.
- Fasihnikoutalab, M. H., Shahram, P., Richard, J. B., Cise, U., Nuno, C. (2020). Sustainable Soil Stabilisation with Ground Granulated Blast-Furnace Slag Activated by Olivine and Sodium Hydroxide.” *Acta Geotechnica* 15(7):1981–91. doi: 10.1007/s11440-019-00884-w.
- Feng, D., Tan, H., Van Deventer, J. S. J. (2004). Ultrasound Enhanced Geopolymerisation. *Journal of Materials Science* 39(2): 571.
- Ghadir, P., Ranjbar, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361–371.
- Gilliam, R. J., Graydon, J. W., Kirk, D. W., Thorpe, S. J. Thorpe. (2007). A Review of Specific Conductivities of Potassium Hydroxide Solutions for Various Concentrations and Temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy* 32(3):359–64. doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.10.062.
- Han, J. (2015). Principles and Practice of Ground Improvement. *John Wiley & Sons*.
- Hejazi, S. M., Mohammad S., Sayyed, M. A., Ali, Z. (2012). A Simple Review of Soil Reinforcement by Using Natural and Synthetic Fibers. *Construction and Building Materials* 30:100–116. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045.
- Jackson, N., Ravindra, K. D. (1996). Shear Strength of Soil. *Civil Engineering Materials* (c):415–29. doi: 10.1007/978-1-349-13729-9_27.

- Jeffries, C. D. (1956). Clays and Clay Minerals. Soil Science Society of America Journal 20(2):296–296. doi: 10.2136/sssaj1956.03615995002000020037x.
- Kanarya, A. (2010). Olivin kalıp kumlarının özelliklerinin belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Keskin. (2015). Zemin İyileştirme Yöntemleri. Zemin Mekaniği II, Nişantaşı Üniversitesi 11–12.
- Kılıç, G. (2008). Çimento ile zemin stabilizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Khazaei, J., Moayedi, H. (2019). Soft expansive soil improvement by eco-friendly waste and quick lime. Arabian Journal for Science and Engineering, 44(10), 8337-8346.
- Küçük, F. (2021). Yüksek Performanslı Polipropilen Fiber Katkısının Kil Zeminin Drenajsız Kayma Direncine Etkisinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Malathi, N., Jaya Saahithya, V. C. (2022). Geotechnical Characteristics of Polypropylene Macro Fibre Reinforced Black Cotton Soil Treated with Potassium Hydroxide. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 982(1):1–10. doi: 10.1088/1755-1315/982/1/012063.
- Menon, A., Twinkle, V. M. (2019). Effect of Alkali-Activated Olivine in Unconfined Compressive Strength and Microstructure of CL Soil. International Research Journal of Engineering and Technology, 374(8):4748–53.
- Mitchell, J.K., Katti, R. K. (1981). Soil improvement - State of the art report, Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm (June), pp. 509-565.
- Ndepete, C. P. (2017). Bazalt fiber katkısının siltli zeminlerde kayma direncine etkisi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilim Dalı Geoteknik, Doktora Tezi.
- Negawo, W. J., Emidio, G. D., Bezuijen, A., Flores, R. D V., François, B. (2019). Lime-Stabilisation of High Plasticity Swelling Clay from Ethiopia. European Journal of Environmental and Civil Engineering 23(4):504–14. doi: 10.1080/19648189.2017.1304272.
- Okkels, N. (2019). Modern Guidelines for Classification of Fine Soils. 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings 2019 (September). doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0651.
- Önalp, A., Sert, S. (2016). Geoteknik Bilgisi III Bina Temeller. Üçüncü Baskı. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Önalp, A., Ersin, A. (2018). Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği Çözümlü ve Problemlerle. Beşinci Baskı. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özaydın, K. (2016). Zemin Mekaniği. İkinci baskı. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özdemir, A., Yasin E., Yildiray, P. (2023). Kil Mineralleri ve Kolloidal Süspansiyonlar. Birinci basım, Yedinci Bölüm, ISBN:978-625-6971-54-7, Ankara 115-139 <https://www.researchgate.net/publication/369646444>.

- Phair, J., Van, D. J. (2001). Effect of Silicate Activator PH on the Leaching and Material Characteristics of Waste-Based Inorganic Polymers. *Mineral Engineering Journal*, 14(3):289–304.
- Plani, K. (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, Ankara 68–84.
- Rao, S. N., Rajasekaran, G. (1996). Reaction Products Formed in Lime-Stabilized Marine Clays. *Journal of geotechnical engineering*, 122(5), 329-336.
- Renforth, P., von Strandmann, P. P., Henderson, G. M. (2015). The Dissolution of Olivine Added to Soil: Implications for Enhanced Weathering. *Applied Geochemistry*, 61, 109-118. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.05.016.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of Cement Treatment on Geotechnical Properties of Some Washington State Soils. *Engineering geology*, 104(1-2), 119-125. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.09.003.
- Selçukhan, O., Ekin, A. (2021). Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 481-496. doi: 10.31590/ejosat.881603.
- Siddique, A., Hossain, M. A. (2011). Effects of Lime Stabilisation on Engineering Properties of an Expansive Soil for Use in Road Construction. *J Soc Transp Traffic Stud*, 1(4), 1-9. *Journal of Society for Transportation and Traffic Studies (JSTS) Vol.2 No.4 2(4):1–9.*
- 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.
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., Ramesh, H. N. (2000). Strength Behaviour of Lime-Treated Soils in the Presence of Sulphate. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(6), 1358-1367. doi: 10.1139/t00-052.
- Teing, T. T., Huat, B. B., Shukla, S. K., Anggraini, V., & Nahazanan, H. (2019). Effects of Alkali-Activated Waste Binder in Soil Stabilization. *International Journal of GEOMATE*, 17(59):82–89. doi: 10.21660/2019.59.8161.
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*, Atlas Yayın Dağıtım, Pp. 4-9, İstanbul.
- Ural, Nazile, Ümit Kut, and Nurcihan Gülsevinç. (2020). Soil Improvement with Waste Pvc. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* 7(3):1471–81. doi: 10.31202/ecjse.747919.
- Ürkmez, A. R. (2009). Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Yöntemi İle Belirlenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Vural, İ. (2019). İnşaat Yıkıntı Atıklarının Zemin İyileştirmesinde Kullanılabilirliği. *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 7(1):1–1. doi: 10.21541/apjes.437288.
- Yi, Y., Liska, M., Unluer, C., Al-Tabbaa, A. (2013a). Initial Investigation into the Carbonation of MgO for Soil Stabilisation. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris (Vol. 5, pp. 2641-2644).

- Yi, Y., Liska, M., Akinyugha, A., Unluer, C., Al-Tabbaa, A. (2013b). Preliminary Laboratory-Scale Model Auger Installation and Testing of Carbonated Soil-MgO Columns. *Geotechnical Testing Journal* 36(3). doi: 10.1520/GTJ20120052.
- Zhu, J., Ye, N., Liu, J., Yang, J. (2013). Evaluation on Hydration Reactivity of Reactive Magnesium Oxide Prepared by Calcining Magnesite at Lower Temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52.19 6430–6437.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Abdelmaoula MAHAMOUD TAHIR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Djelfa Üniversitesi (Cezayir), Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- **Yüksek lisans** : 2016, Djelfa Üniversitesi (Cezayir), Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Tahir, A.M., Sert, S. (2023). Effect of olivine additive on the shear resistance of fine-grained soils: a sustainable approach for risk mitigation and environmental impact reduction. Sustainability (Switzerland) 15(13), <http://dx.doi:10.3390/su151310683>.