

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ATIK MOTOR YAĞI İLE KİRLENMİŞ ZEMİNLERİN
MÜHENDİSLİK DAVRANIŞLARINDA MİNERAL KATKI VE
NANOPARTİKÜL MALZEMELERİN ETKİSİ**

Veysel ÖZLÜ

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Geoteknik Bilim Dalı

HAZİRAN 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

**ATIK MOTOR YAĞI İLE KİRLENMİŞ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK
DAVRANIŞLARINDA MİNERAL KATKI VE NANOPARTİKÜL
MALZEMELERİN ETKİSİ**

Tez Yazarı
Veysel ÖZLÜ

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Müge Elif FIRAT

HAZİRAN 2023
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Atık Motor Yağı ile Kirlenmiş Zeminlerin Mühendislik Davranışlarında Mineral Katkı ve Nanopartikül Malzemelerin Etkisi
Yazarı:	Veysel ÖZLÜ
İlk Teslim Tarihi:	19.05.2023
Savunma Tarihi:	22.06.2023

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Müge Elif FIRAT Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Dr. Öğr. Üyesi Nurdan BAYKUŞ Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Yunus ERKUŞ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Atık Motor Yağı ile Kirlenmiş Zeminlerin Mühendislik Davranışlarında Mineral Katkı ve Nanopartikül Malzemelerin Etkisi ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

22.06.2023

Veysel ÖZLÜ



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, destek olan, deneyimlerini ve bilgi birikimlerini paylaşan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Müge Elif Fırat'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Hiçbir zaman desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ediyorum.

Bilime ve bilim insanlarına yaptığı çeşitli katkılarının yanı sıra yüksek lisans eğitimimde sağladıkları başarı bursundan dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.22.35** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Veysel ÖZLÜ
ELAZIĞ, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
1.2. Sorunun Bileşenleri	3
1.3. Sorunun İfadesi ve Gerekçesi	4
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Zeminlerin Motor Yağı, Ağır Metaller ve Farklı Kirleticiler Üzerine Yapılan Çalışmalar	6
2.1.1. Motor Yağı Kirlenmesi Literatür Taramaları	6
2.1.2. Ağır Metallerle Kirlenmiş Zemin İçin Literatür Taramaları	12
2.1.3. Farklı Kirlilikler İçin Literatür Taramaları.....	14
2.2. Uçucu Kül ve Nanopartikül Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	17
2.2.1. Uçucu Kül Literatür Taramaları	17
2.2.2. Nanopartikül Literatür Taramaları	20
3. KİL ZEMİNLER	24
3.1. Kil Minerali	24
3.2. Kil Minerallerinin Grubu.....	25
3.3. Killerin Özellikleri.....	27
4. ZEMİN KİRLİLİĞİ VE İYİLEŞTİRME YOLLARI	28
4.1. Zemin Kirliliğinin Tanımı	28
4.2. Zemin- Su Etkileşimi.....	28
4.3. Zemindeki Motor Yağının Çevresel Etkileri	28
4.4. Su Kirliliğinin Tanımı	29
4.5. Zemin Kirliliğinin İnsan Sağlığı ve Tarım Üzerine Etkileri	30
4.5.1. Zemin Kirliliğinin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri	30
4.5.2. Zemin Kirliliğinin Tarım Üzerindeki Etkileri	32
4.6. Motor Yağının Tanımı.....	32
4.6.1. Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)	34
4.7. Uçucu Kül Tanımı	35
4.8. Nanopartikül Tanımı.....	37
4.9. Petrol ve Petrol Türevleri ile Kirlenmiş Zeminin İyileştirilmesi	38
4.9.1. Fizikokimyasal Yöntem ile İyileştirme	38
4.9.2. Biyoremediasyon Yöntemleri ile İyileştirme	39
5. MATERYAL VE METOT.....	44
5.1. Materyal.....	44
5.1.1. Zemin	44

5.1.2. Motor Yağı	45
5.1.3. Uçucu Kül	46
5.1.4. Nano-Grafen.....	46
5.2. Metot	47
5.2.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi	49
5.2.2. İncelenen Zemin Numunelerinin Sınıflandırılması	56
5.2.3. Numunelerin Hazırlanması.....	57
5.2.4. Serbest Basınç Dayanım (UCS) Deneyi	61
5.2.5. Konsolidasyon Deneyi	61
5.2.6. Mikroyapısal Analizlerin Belirlenmesi	62
5.2.7. Grey Korelasyon Analizi.....	63
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	64
6.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi	64
6.2. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin UCS Tek Eksenli Gerilme- Şekil Değiştirme Davranışları	70
6.3. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin Maksimum Kayma Gerilmeleri	77
6.4. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin Konsolidasyon Parametreleri	79
6.5. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin Kırılma Modları ve Mikroyapısal Analizleri	96
6.5.1. Kırılma Modları	96
6.5.2. Mikroyapısal Analizler.....	97
6.6. Grey Korelasyon Analiz Sonuçları	102
7. SONUÇLAR.....	106
ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR.....	109
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Atık Motor Yağı ile Kirlenmiş Zeminlerin Mühendislik Davranışlarında Mineral Katkı ve Nanopartikül Malzemelerin Etkisi

Veysel ÖZLÜ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Haziran 2023, Sayfa: xv + 116

Artan nüfusa bağlı olarak, kentleşme sürecinde kirlenmiş bölgelerin yeniden geliştirilmesi daha popüler hale gelmiştir. Bu bölgelerdeki kirlilikler esas olarak madencilik, metal sanayi ve petrol çıkarma gibi antropik faaliyetlerden kaynaklanmakta olup, bunlar yalnızca zeminlerin çevre kalitesini bozmakla kalmayıp, aynı zamanda bu zeminlerin geoteknik özelliklerini de değiştirmektedir. Bu nedenle çalışmada, atık motor yağı ile farklı oranlarda kirlenmiş kaolin kilinin uçucu kül ve nano-grafen malzemesi kullanılarak mühendislik özellikleri üzerinde meydana gelecek değişimlerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Saf kaolin farklı oranlarda (3%, 5% ve 9%) ve farklı günlerde (1 ve 7 gün) atık motor yağı ile kirlenmiştir. Kirlenen zeminler çeşitli oranlarda (10%, 25% ve 45%) uçucu kül ve (0.04%, 0.08% ve 0.12%) nano-grafen ile 1 ve 7 gün süreyle iyileştirilmiştir. Numunelerin fiziksel özellikleri belirlendikten sonra tek eksenli serbest basınç dayanımı (UCS) ve konsolidasyon deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler ile Grey korelasyon analizleri yapılmış olup son olarak numunelerin mikroyapısal özellikleri ZEISS EVO MA10 taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalar atık motor yağı kirlenmesinin saf kaolinin özgül ağırlığının düşmesine, likit limit değerinin artmasına, UCS ve konsolidasyon parametrelerinde de azalmaya sebep olduğunu göstermektedir. Kirlenmiş zeminlere uygulanan iyileştirmeler sonucunda UCS ve konsolidasyon parametrelerinde ise artış gözlenmiştir. UCS deneyi için nano-grafen ilavesinin gösterdiği katkı uçucu kül ilavesine ek olarak %26.23 ile %111.98 arasında artış göstermiştir. Konsolidasyon deneyinde ise nano-grafen ilavesi uçucu kül ilavesine göre net bir artış göstermemiştir. Bu sonuçlara göre UCS bakımından uçucu kül ve nano-grafenin birlikte, konsolidasyon özellikleri bakımından ise maliyet ve iş gücü hesaba katılınca sadece uçucu kül kullanımı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaolin kili, Kirlenmiş zeminler, Atık motor yağı, Uçucu kül, Nano-grafen, Tek eksenli serbest basınç dayanımı deneyi, Konsolidasyon deneyi, Grey korelasyon analizi

ABSTRACT

The Effect of Mineral Additives and Nanoparticle Materials on the Engineering Behaviors of Soils Contaminated by Waste Engine Oil

Veysel ÖZLÜ

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Technologies

June 2023, Pages: xv + 116

Due to the increasing population, redevelopment of polluted areas has become more popular during the urbanization process. Pollutions in these regions are mainly due to anthropic activities such as mining, metal industry and oil extraction, which not only degrade the environmental quality of the soils but also change the geotechnical properties of these soils. Therefore, in this study, it is aimed to investigate the changes in the engineering properties of waste motor oil and kaolin clay contaminated at different rates by using fly ash and nano-graphene materials. For this purpose, the physical and chemical properties of the materials were determined. Pure kaolin was contaminated with waste motor oil at different rates (3%, 5% and 9%) and on different days (1 and 7 days). Contaminated floors were treated with fly ash at various rates (10%, 25% and 45%) and nano-graphene (0.04%, 0.08% and 0.12%) for 1 and 7 days. After the physical properties of the samples were determined, uniaxial unconfined compressive strength (UCS) and consolidation tests were applied. Grey correlation analysis were made with the obtained data, and finally, the microstructural properties of the samples were examined with the ZEISS EVO MA10 scanning electron microscope. Experimental studies show that waste motor oil contamination causes serious changes in physical properties and decreases in UCS and consolidation parameters for pure kaolin. As a result of the improvements applied to the contaminated floors, a change has occurred in the physical properties again. An increase was observed in UCS and consolidation parameters. While the contribution of nano-graphene additive for the UCS experiment increased between 26.23% and 111.98% in addition to the fly ash additive, there was no such increase for the consolidation experiment. According to these results, it is recommended to use fly ash and nano-graphene together in terms of UCS, and only fly ash is recommended for consolidation properties when cost and labor are taken into account.

Keywords: Kaolin clay, Contaminated soils, Waste engine/motor oil, Fly ash, Nano-graphene, Uniaxial unconfined compression strength test, Consolidation test, Grey correlation analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Kirlenmiş zeminden biyotik reseptörlere giden yollar [4].....	4
Şekil 1.2. Kirletici-zemin etkileşim sorunu [4]	4
Şekil 2.1. Farklı atık motor yağı içeriklerine göre UCS değerleri [5]	7
Şekil 2.2. Farklı motor yağı içeriklerine göre likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri [6].....	8
Şekil 2.3. Atık motor yağıyla kirlenmiş zemin ve temiz zeminin gerilme- şekil değiştirme eğrileri [7].....	8
Şekil 2.4. Motor yağı oranlarına göre optimum su içeriği [9]	9
Şekil 2.5. Motor yağı içeriklerine göre UCS değerleri [10]	10
Şekil 2.6. Farklı atık yağ içeriklerine göre CBR yüzdeleri [12]	11
Şekil 2.7. Atık motor yağının maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği grafikleri [13]	12
Şekil 2.8. Yumuşak ve şişen zeminlerin donma- çözülme döngülerine göre UCS- uçucu kül içeriği grafikleri [27].....	18
Şekil 3.1. (a) Silika tetrahedron (b) silika levha (c) alümina oktahedron (d) oktahedral (gibsit) levha (e) elemental silika-gibsit levha [40].....	25
Şekil 3.2. (a) Kaolinit yapısı (b) İllit yapısı (c) Montmorillonit yapısı [40]	26
Şekil 4.1. Kirlenmiş zemin örneği [49]	34
Şekil 4.2. Bazı polisiklik aromatik hidrokarbon bileşiklerinin molekül yapısı [51].....	35
Şekil 4.3. Natural Attenuation yönteminin gösterimi [65]	40
Şekil 4.4. Biosparging yönteminin gösterimi [69].....	41
Şekil 5.1. Türkiye kil yatakları haritası [74].....	45
Şekil 5.2. Atık motor yağı (AMY)	45
Şekil 5.3. ICP-MS Analiz Ekipmanları [75].....	46
Şekil 5.4. F sınıfı uçucu kül.....	46
Şekil 5.5. Nano-grafen (NG)	47
Şekil 5.6. Deneysel metodun şema gösterimi.....	49
Şekil 5.7. (a) Hassas terazi (b) Kaolin kili (c) Etüv	50
Şekil 5.8. (a) Sarsma tablası (b) Elekler (c) Etüv	51
Şekil 5.9. Hidrometre deney malzemeleri	51
Şekil 5.10. Özgül ağırlık deneyi	52
Şekil 5.11. Zeminlerin hacim-su muhtevası ilişkisi [80]	53
Şekil 5.12. Likit limit deneyi.....	54
Şekil 5.13. Plastik limit deneyi.....	54
Şekil 5.14. Standart Proktor deneyi.....	55

Şekil 5.15. Zemini kirlenme adımları.....	58
Şekil 5.16. Nano-grafen hazırlığı (a) Nano-grafen çözeltisi (b) Mikser.....	59
Şekil 5.17. Zemin numunelerinin UCS deneyi için hazırlanması.....	59
Şekil 5.18. Konsolidasyon deneyi için numune hazırlama aşamaları.....	61
Şekil 5.19. UCS deney seti ve çalışma şekli.....	61
Şekil 5.20. Konsolidasyon deney seti.....	62
Şekil 5.21. SEM (Taramalı elektron mikroskobu) [91].....	62
Şekil 6.1. Granülometri eğrisi	64
Şekil 6.2. Zeminlerin özgül ağırlık değerleri.....	66
Şekil 6.3. Zeminlerin Atterberg limit değerleri	67
Şekil 6.4. Zemin karışımlarının plastisite kartındaki konumları.....	68
Şekil 6.5. Standart Proktor deney eğrileri.....	69
Şekil 6.6. Zeminlerin kompaksiyon parametreleri	70
Şekil 6.7. Farklı kirlenme süreleri ve derecelerine sahip zeminlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) 1 gün, (b) 7 gün	71
Şekil 6.8. Kirlenme-Kürlenme süresi 1 gün olan numunelerin uçucu kül katkılarında gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY.....	72
Şekil 6.9. Kirlenme-Kürlenme süresi 7 gün olan numunelerin uçucu kül katkılarında gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY.....	73
Şekil 6.10. Kirlenme-Kürlenme süresi 1 gün olan numunelerin uçucu kül ve nano-grafen katkılarında gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY.....	75
Şekil 6.11. Kirlenme-Kürlenme süresi 7 gün olan numunelerin uçucu kül ve nano-grafen katkılarında gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY.....	76
Şekil 6.12. Kirlenmiş ve uçucu kül katkılı zeminlere ait eksenel gerilme ve eksenel deplasman grafikleri	78
Şekil 6.13. Nano-grafen ve uçucu kül katkılı kirlenmiş zeminlerin eksenel gerilme ve eksenel deplasman grafikleri	78
Şekil 6.14. Nano-grafen ve uçucu kül katkılı kirlenmiş zeminlerin eksenel gerilme ve eksenel deplasman grafikleri	79
Şekil 6.15. Saf kaolinin karekök zaman-saat okuması grafiği.....	81
Şekil 6.16. 3% AMY zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	82
Şekil 6.17. 5% AMY zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	83
Şekil 6.18. 9% AMY zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	84
Şekil 6.19. 3% AMY+10% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	85
Şekil 6.20. 5% AMY+10% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	86
Şekil 6.21. 9% AMY+10% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	87
Şekil 6.22. 3% AMY+25% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	88

Şekil 6.23. 5% AMY+25% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	89
Şekil 6.24. 9% AMY+25% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	90
Şekil 6.25. 3% AMY+45% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	91
Şekil 6.26. 5% AMY+45% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	92
Şekil 6.27. 9% AMY+45% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün.....	93
Şekil 6.28. Kirlenmiş zeminlere %25 uçucu kül ve %0.08 nano-grafen katkı ile karekök zaman-saat okuması grafiği (Kirlenme-Kürlenme süresi: 7 gün): (a) 3% AMY, (b) 5% AMY, (c) 9% AMY	94
Şekil 6.29. Kirlenme-Kürlenme süresine göre cc ve cs değerleri	95
Şekil 6.30. Zemin numunelerinin kirlenme-kürlenme derecelerine ve sürelerine göre kırılma modları	96
Şekil 6.31. Ö1 numunesinin SEM görüntüleri.....	98
Şekil 6.32. Ö2 numunesinin SEM görüntüleri.....	98
Şekil 6.33. Ö3 numunesinin SEM görüntüleri.....	98
Şekil 6.34. Ö4 numunesinin SEM görüntüleri.....	99
Şekil 6.35. Ö5 numunesinin SEM görüntüleri.....	99
Şekil 6.36. Ö6 numunesinin SEM görüntüleri.....	99
Şekil 6.37. Ö7 numunesinin SEM görüntüleri.....	100
Şekil 6.38. Ö8 numunesinin SEM görüntüleri.....	100
Şekil 6.39. Ö9 numunesinin SEM görüntüleri.....	100
Şekil 6.40. Ö10 numunesinin SEM görüntüleri.....	101
Şekil 6.41. Ö11 numunesinin SEM görüntüleri.....	101
Şekil 6.42. Ö12 numunesinin SEM görüntüleri.....	102
Şekil 6.43. Ö13 numunesinin SEM görüntüleri.....	102

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Kaolin kilinin özellikleri.....	44
Tablo 5.2. ICP-MS Analizi sonucu atık motor yağının sonuçları	45
Tablo 5.3. Uçucu külün kimyasal içeriği	46
Tablo 5.4. Nano-grafenin özellikleri.....	46
Tablo 5.5. Hidrometre deneyi başlangıç özellikleri	51
Tablo 5.6. Birleşik zemin sınıflandırma sistemi [84].....	56
Tablo 5.7. Birleşik zemin sınıflandırma sistemi devamı [84]	57
Tablo 6.1. Zemin kombinasyonlarının fiziksel özellikleri	65
Tablo 6.2. Konsolidasyon Deney Programı	80
Tablo 6.3. Saf kaolinin konsolidasyon parametreleri.....	80
Tablo 6.4. K+3% AMY zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri.....	81
Tablo 6.5. K+3% AMY zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri.....	82
Tablo 6.6. K+5% AMY zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri.....	82
Tablo 6.7. K+5% AMY zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri.....	82
Tablo 6.8. K+9% AMY zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri.....	83
Tablo 6.9. K+9% AMY zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri.....	83
Tablo 6.10. K+3% AMY+10% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	84
Tablo 6.11. K+3% AMY+10% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	85
Tablo 6.12. K+5% AMY+10% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	85
Tablo 6.13. K+5% AMY+10% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	85
Tablo 6.14. K+9% AMY+10% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	86
Tablo 6.15. K+9% AMY+10% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	86
Tablo 6.16. K+3% AMY+25% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	87
Tablo 6.17. K+3% AMY+25% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	88
Tablo 6.18. K+5% AMY+25% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	88
Tablo 6.19. K+5% AMY+25% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	88
Tablo 6.20. K+9% AMY+25% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	89
Tablo 6.21. K+9% AMY+25% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	89
Tablo 6.22. K+3% AMY+45% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	90
Tablo 6.23. K+3% AMY+45% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	91
Tablo 6.24. K+5% AMY+45% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	91

Tablo 6.25. K+5% AMY+45% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	91
Tablo 6.26. K+9% AMY+45% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri	92
Tablo 6.27. K+9% AMY+45% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	92
Tablo 6.28. K+3% AMY+25% UK+0.08% NG zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	93
Tablo 6.29. K+5% AMY+25% UK+0.08% NG zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	93
Tablo 6.30. K+9% AMY+25% UK+0.08% NG zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri	94
Tablo 6.31. Mikroyapısal Analiz Programı.....	97
Tablo 6.32. Boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler	102
Tablo 6.33. Yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları.....	103
Tablo 6.34. 3% AMY zemin için boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler.....	103
Tablo 6.35. 3% AMY zemin için yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları	104
Tablo 6.36. 5% AMY zemin için boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler.....	104
Tablo 6.37. 5% AMY zemin için yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları	104
Tablo 6.38. 9% AMY zemin için boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler.....	105
Tablo 6.39. 9% AMY zemin için yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları	105

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å	: Angstrom
av	: Sıkışma Katsayısı
cc	: Sıkışma İndisi
cr	: Yeniden Sıkıştırma İndeksi
cs	: Şişme İndisi
cv	: Konsolidasyon Katsayısı
D	: Numune Çapı
e	: Boşluk Oranı
G _s	: Özgül Ağırlık
H	: Numune Yüksekliği
m _v	: Hacimsel Sıkışma Katsayısı
UCS _{max}	: Maksimum Gerilme
γ _n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ _k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ _{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
%P	: Her bir elek için geçen yüzde
w _k	: Kurutulmuş zemin miktarı
w ₁	: Özgül ağırlık deneyinde piknometre+su ağırlığı
w ₂	: Özgül ağırlık deneyinde piknometre+zemin+su ağırlığı
W _{yaş}	: Zeminin yaş ağırlığı
W _{kuru}	: Zeminin kuru ağırlığı
W _{opt}	: Optimum Su Muhtevası
ρ	: Grey Korelasyon Katsayısı

Kısaltmalar

AMY	: Atık Motor Yağı
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CBR	: California Taşıma Oranı
CD	: Konsolidasyonlu-Drenajlı
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CU	: Konsolidasyonlu-Drenajsız
DAYTAM	: Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EDX	: Enerji Dağılımı X Işını Spektrometresi
FESE	: Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu
FSI	: Serbest Şişme İndeksi
GO	: Grafen Oksit
K	: Kaolin
LL	: Likit Limit
MDD	: Maksimum Kuru Yoğunluk
ML	: Düşük Plastisiteli Silt
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler

NG	: Nano-Grafen
OSİ	: Optimum Su İçeriği
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
PAO	: Polialfaolefin
PI	: Plastisite İndisi
PL	: Plastik Limit
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SP	: Kötü Derecelenmiş Kum
SP	: Şişme Basıncı
STBLZTR	: Stabilizatör
TPH	: Total Petrol Hidrokarbonları
UCS	: Serbest Basıncı Dayanımı
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Birleştirilmiş (Birleşik) Zemin Sınıflandırma Sistemi
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler
XRD	: X-ışını toz kırınımı

1. GİRİŞ

Zemin kirliliği altyapılardan üstyapılara kadar ciddi etkileri olan bir konudur. Zeminin geoteknik özelliklerinde değişikliklere sebep olduğundan yapı temellerinde ilave yüklere veya etkilere neden olmaktadır. Bu etkilerin sonunda mekanik yenilmeler meydana gelmektedir. Bunların sonucunda ise üretim kayıpları görülmektedir ve sonuç olarak ekonomik kayıplar ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda başlı başına bir sorun haline gelen kirlilikler için hem geoteknik hem de jeolojik özelliklerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak altyapı sistemlerindeki olumsuzlukların saptanıp iyileştirilmeye çalışılması sadece mühendislik açısından değil sürdürülebilirlik için de önemli bir durumdur. Zemin kirliliğinin olduğu durumlarda zeminin düzgün bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Aksi halde, yapılarda problemlere ve ekonomik sıkıntılara sebep olacaktır.

Kirlenmiş zeminlerin, mühendislik veya çevresel hususlar açısından iyileştirme gerektirir. Kirlenmiş arazinin iyileştirilmesi için bir dizi teknik (kazı ve bertaraf, yıkama, ısıtma işlemi, biyoremediasyon, elektrokinetik ve katılaştırma, vb.) mevcuttur. Ancak, çeşitli seçeneklerin uygulanabilirliği ve fizibilitesi saha koşullarına bağlıdır. Atık malzemelerin bertarafı, dünyadaki çoğu ülke için ciddi bir konu haline gelmektedir. Bu atık maddelerin büyük miktarlarda birikmesi hem çevresel hem de finansal sorunlara yol açmaktadır [1].

Petrol ve rafine ürünleri (benzin, motorin, motor yağı, kerosen vb.) ulaşım ve sanayi sektörlerinde enerji ihtiyacı için kullanılan başlıca kaynaklardır. Motor yağı, çeşitli otomotiv ve diğer motor türlerinin yağlama gereksinimleri için kullanılmaktadır. Bu tür kullanımlar sırasında motor yağı, motor aşınmasından kaynaklanan bir dizi ek bileşeni (kurşun, krom, naftalin, klorlu hidrokarbonlar, kükürt) alır. Zamanla, yağın viskozitesindeki değişiklik nedeniyle yağ değişimleri gerekli hale gelir. Kullanımdan sonra kirlenme nedeniyle uygun olmayan ve orijinal amacına uygun olmayan bu tür yağların uygun şekilde atılması gerekir. Kullanılmış yağlar, güvenli ve düzgün bir şekilde toplanırsa geri dönüştürülme ve yeniden rafine edilme potansiyeline sahiptir, ancak çoğu durumda açık bir drenaja dökülür veya yeraltı toprağını ve yeraltı suyunu kirletebileceği çöp kutusuna atılır. Bu tür yağlar, zeminin farklı fiziko-kimyasal özelliklerle karakterize edilen sıvılarla doymasının üzerinde olumsuz etkilere sahip olmasının yanı sıra, mekanik ve filtrasyon parametreleri, plastisite, şişme ve diğer özellikleri üzerinde de olumsuz bir etkiye sahiptir [2].

Zeminlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin var olandan daha iyi bir şekilde değişimine zemin stabilizasyonu denir. Stabilizasyon, herhangi bir zeminin basınç mukavemetini, büzülme ve şişme özelliklerini, taşıma gücünü, geçirimsizlik özellikleri gibi farklı parametreleri kontrol altına alıp iyileştirebilir. Ciddi hacim değişikliği gösteren yani şişen killi zeminlerden daneli

zeminlere kadar geniş bir yelpazedeki birçok farklı zeminde uygulanabilir. Zemin stabilizasyonu uçucu küller dahil olmak üzere çeşitli yollarla sağlanabilmektedir. Güçlendirme/ iyileştirme projelerinde uygun tasarım ve uygun deneyler oldukça önemli rol oynamaktadır. Uçucu küllerin zemin iyileştirmeye olan etkileri “Literatür Taramaları” bölümündeki yapılan geçmiş çalışmaların içerikleri ve sonuçlarıyla birlikte daha detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Normal boyutları 100 nm'den küçük olan nano malzemeler, atomlar, moleküller ve mikroskobik malzemeler arasında özel bir yapıya ve son derece yüksek bir ayırt edici yüzey alanına ve maksimum yüzey aktivitesine sahiptir. Nano malzemeler, ilk yıllarda fizikçiler ve kimyagerler tarafından kullanılıyorken sonraki yıllarda ileri teknolojinin yardımıyla, geoteknik mühendisleri ve araştırmacılar da sürdürülebilir ve çevre dostu ortamlar için zemin iyileştirme alanında kullanılmaya başlamışlardır. Aslında, nanoteknoloji ve nanomalzemeler terimi ortaya çıkmadan önce, zemin mekaniği nano ölçekli boyutlar ve malzemelerle çok uzun zamandır ilgilenmektedir. Zemin plastisitesini/kohezyonunu oluşturan temel kil yapısından ve su moleküllerinden, geoteknik mühendisleri konunun ilk günlerinden itibaren bu olgulara maruz kalmışlardır. Şu anda, geoteknik mühendisliğinde nanoteknoloji ve nanomalzemelerdeki gelişmeler, iyileştirme ve temizleme malzemeleri olarak kullanımıyla sınırlı kalmıştır. Son sonuçlar, az miktarda nanomateriyal kullanımının (orijinal zeminin kuru ağırlığının $<1\%$ 'i) zemin özelliklerinde önemli değişiklik ve iyileşme ile sonuçlandığını göstermiştir. Malzemelerin verimli kullanımı, tükenmekte olan doğal kaynaklarımızın ömrünü uzatmayla ilgili sürdürülebilirlik yönlerinden biri olduğu için önemlidir [3]. Nano-grafen, nano-zemin, nano-kil, nano-silika, nano-alümina, nano-magnezyum, karbon nanotüp, nanolifler ve nano-kireç nanopartiküllerden sadece birkaçıdır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Artan nüfusa bağlı olarak, kentleşme sürecinde kirlenmiş bölgelerin yeniden geliştirilmesi giderek daha popüler hale gelmiştir. Bu bölgelerdeki kirlilikler esas olarak madencilik, metal sanayi ve petrol çıkarma gibi antropik faaliyetlerden kaynaklanmakta olup, bunlar yalnızca zeminlerin çevre kalitesini bozmakla kalmayıp, aynı zamanda bu zeminlerin geoteknik özelliklerini de değiştirmektedir. Kirlenmiş alanlarda yapılan mühendislik tasarımlarında bu etkilerin araştırılması ve alternatif çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi, bu zeminlerin inşa edileceği altyapı ve üstyapılarda hem ekonomiklik hem de sürdürülebilirlik açısından umut verici olacaktır. Bu amaçlar doğrultusunda, bu çalışmada, motor yağı ile farklı oranlarda kirlenmiş zeminlerin mineral katkı ve nanopartikül malzemesi kullanılarak mühendislik özellikleri üzerinde meydana gelecek değişimlerin araştırılması amaçlanmıştır.

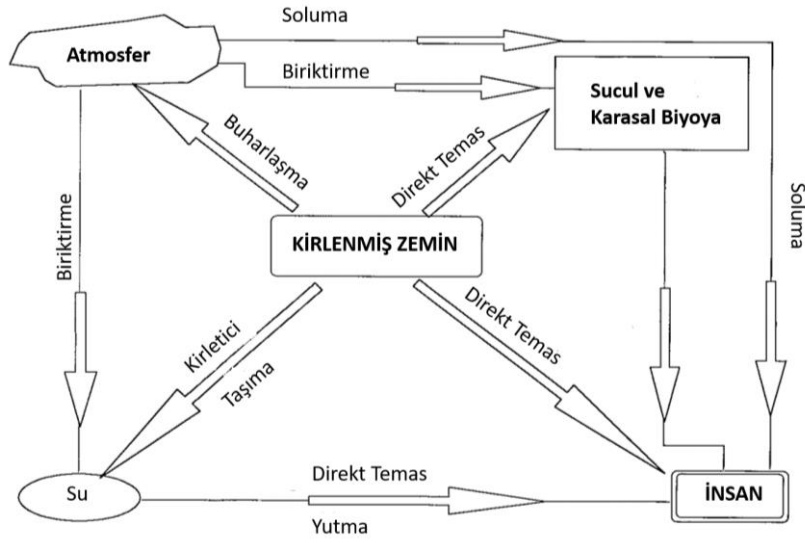
Tezin amacına ulaşabilmesi için aşağıdaki adımlar uygulanmıştır:

- Killi zeminler, kirlenmiş zeminler, mineral katkılar ve nanopartiküller hakkında yapılan çalışmalar ait literatür taramaları,
- Killi, kirlenmiş ve katkılı zeminlerin ASTM standartlarına uygun olacak şekilde fiziksel özelliklerinin laboratuvarda yapılan deneyler ile belirlenmesi,
- Killi zeminin, belirli oranlarda ve sürelerde atık motor yağı ile kirletilmesi ve devamında farklı oranlar ve süreler ile mineral katkı ve nanopartikül katkılarla iyileştirilmesinin laboratuvar ortamında uygulanması,
- Tek eksenli basınç deneyi ile gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin oluşturulması,
- Konsolidasyon deneyi ile numunelerin konsolidasyon parametrelerinin bulunması,
- Deney örneklerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülerinin alınması,
- Elde edilen sonuçların değerlendirilip, önerilerde bulunulması.

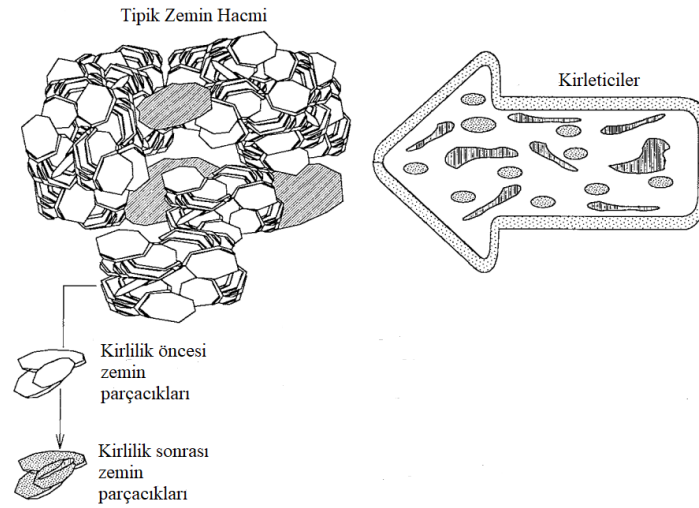
1.2. Sorunun Bileşenleri

Bu tez çalışmasında motor yağının çevre kirliliğinde rol alıyor olması ve buna bağlı olarak zemindeki fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerindeki değişimin daha iyi anlaşılması sağlanmaktadır. Şekil 1.1’de çevre kirliliğinin etkilerinin farklı yollarla nasıl meydana geldiği gösterilmiştir. Temel olarak kirleticileri kavramak ve zemindeki davranışını belirtmektir. Durumun sadece zemindeki mühendislik özelliklerinin değiştiğiyle sınırlanmadığını, alandaki canlı yaşamına da etkilediğini anlamak gerekmektedir. Şekil 1.2’de çevre kirliliği sorununun temel bileşenleri gösterilmektedir. Gerekli ana bilgiler aşağıda sıralanmıştır:

- Maddede ve zeminde bulunan çeşitli kirleticilerin türleri
- Madde ve zemindeki kirleticilerin dağılımı ve ayrıştırılması
- Kirleticilerin meydana getirebileceği tehlikenin boyutu
- Kirleticilerin bulunan zemindeki hareket ve davranışı
- Kirlenmiş zeminin iyileştirilmesi için gerekli temel bileşenlerin belirlenmesi
- Kirlenmiş zeminin iyileştirilmesi için tasarlama ve uygulamadır.



Şekil 1.1. Kirlenmiş zeminden biyotik reseptörlere giden yollar [4]



Şekil 1.2. Kirletici-zemin etkileşim sorunu [4]

1.3. Sorunun İfadesi ve Gerekçesi

Çevre, kirliliğin etkileri ile olumsuz etkilenmeye devam etmektedir ve başlıca sanayileşmenin yanında nüfus artışından kaynaklanmaktadır. Nüfusun artmasıyla meydana gelen atıkların da artması dünyanın karşılaştığı en ciddi çevresel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kirlenme olarak bakıldığında oldukça geniş yelpazeli bir konudur ve insan nüfusunun devamlılığını oldukça etkilemektedir. Kentsel alanlardaki atık sulardan ve taşıtlardan kaynaklanan kirlenmenin etkisi gün geçtikçe artmakta ve üzerinde ciddi bir şekilde düşünülüp, uygulamaya geçilmesi gereken bir durum olmaktadır. Kabul edilebilir sınırı aşan kirliliklerin insan ve diğer canlı

yaşamlarını çok büyük derecede etkilediği bilinmektedir. Bu kirlilikler neticesinde ortaya çıkan çeşitli hastalıklar ile özellikle çocuk ve yaşlıları daha çok etkileyen olumsuz hayat koşulları meydana gelmektedir. Sadece insanların değil hayvan ve bitkilerin de farklı türlerde hastalıklarla yakalandıkları görülmektedir.

Hızla artan nüfusun ihtiyaçlarını sürekli karşılamaya çalışmak için sular oldukça aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat suların bu kadar fazla kullanılması su kaynaklarının kirlenmesine, aynı zamanda temiz su kaynaklarının azalmasına neden olmakta ve yakın gelecekte ise su kıtlıklarının artacağını göstermektedir. Yapılan bazı tahminlere göre yaklaşık 21 milyon hektarlık bir alana sahip en az 50 ülkenin kısmen veya tamamen kirlenmiş suya sahip olduğu belirtilmektedir. Bu düşük kaliteli veya kalitesiz suların insan, çevre ve diğer yaşamların sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

Zemindeki ağır metallerin varlığı ve artan miktarlarda olması, insanlardan uzak tutulmadığı durumda oldukça risk teşkil etmektedir. Ağır metallerin zeminde varlığının farkında olunması hem topraktaki etkileşimleri hem de zeminin mühendislik özellikleri için oldukça dikkate alınması gereken bir konudur. Tarım amaçlı kullanılan topraklarda ağır metal varlığı ve birikimi, elde edilen ürünler için canlılarda sağlık problemlerine sebep olmaktadır. Mühendislik açısından zemine etkileri ise “Literatür Taramaları” bölümünde daha detaylı olarak açıklanacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Zeminlerin Motor Yağı, Ağır Metaller ve Farklı Kirleticiler Üzerine Yapılan Çalışmalar

Kirliliğine sebep olan bazı materyallerin zemin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Motor yağının içerisinde bulunan ağır metallerden dolayı ayrı bir başlık altında araştırılması uygun görülmüştür.

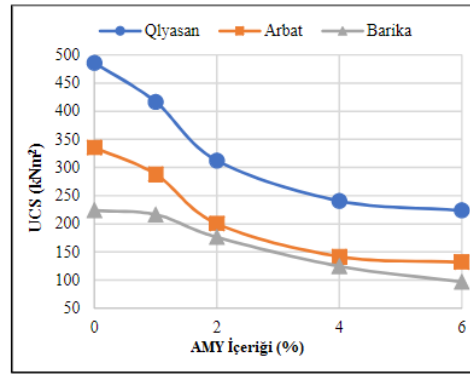
2.1.1. Motor Yağı Kirlenmesi Literatür Taramaları

Petrol ve otomotiv sanayinin hızlı gelişimi ile çevre kirliliği son yıllarda çok dikkat çekmektedir. Petrol ve rafine ürünleri (benzin, motorin, motor yağı, kerosen vb.) ulaşım ve sanayi sektörlerinde enerji ihtiyacı için kullanılan başlıca kaynaklardır. Motor yağı, çeşitli otomotiv ve diğer motor türlerinin yağlama gereksinimleri için kullanılmaktadır. Bu tür kullanımlar sırasında motor yağı, motor aşınmasından kaynaklanan bir dizi ek bileşeni (kurşun, krom, naftalin, klorlu hidrokarbonlar, kükürt) alır. Zamanla, yağın viskozitesindeki değişiklik nedeniyle yağ değişimleri gerekli hale gelir. Kullanımdan sonra kirlenme nedeniyle uygun olmayan ve orijinal amacına uygun olmayan bu tür yağların uygun şekilde atılması gerekir. Kullanılmış yağlar, güvenli ve düzgün bir şekilde toplanırsa geri dönüştürülme ve yeniden rafine edilme potansiyeline sahiptir, ancak çoğu durumda açık bir drenaja dökülür veya yeraltı toprağını ve yeraltı suyunu kirlitebileceği çöp kutusuna atılır. Bu tür yağlar, altyapı zeminlerine karıştığında, zeminlerin sudan farklı fiziko-kimyasal özelliklerle karakterize edilen sıvılarla doymasına, mekanik ve filtrasyon parametreleri, plastisite, şişme gibi bir çok mühendislik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Doğal çevreye dökülmesi, hava, toprak ve yeraltı suyunun toksik ve mutajenik olan polisiklik aromatik hidrokarbonlar tarafından hidrokarbon kontaminasyonuna sebep olmaktadır. Bu tip genotoksik ve kansorejen ürünlerle kirlenmiş bölgelerin yeniden geliştirilmesi çevre kalitesinin ve sağlığının bozulmasının yanında altyapı sistemlerinin kurulacağı zeminlerde mühendislik problemlerini de beraberinde getirecek ve önemli üretim kayıpları kaynaklı finansal kayıplara ve riskli erken mekanik yenilmelere sebep olacaktır.

Motor yağı ile kirlenmiş zeminlerin mühendislik özellikleri yapılan diğer araştırmalar ile kısaca anlatılıp son kısımda ise anlatılan çalışmalar özetlenmiştir.

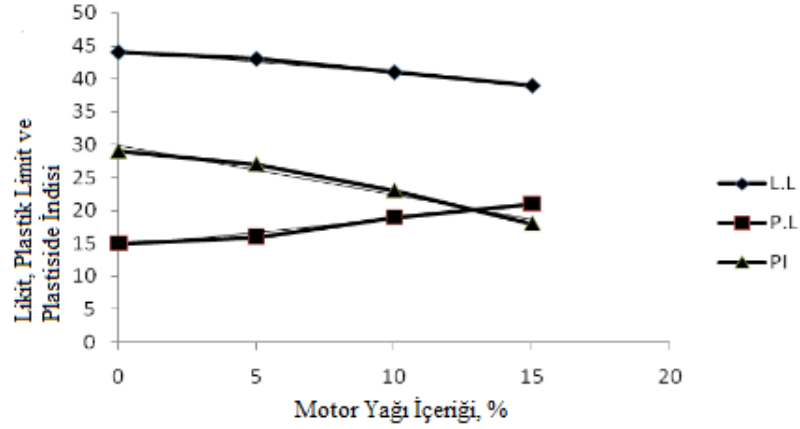
Salih vd. yaptıkları bu çalışmada atık motor yağı (AMY) kontaminasyonunun kohezyonlu zeminlerin jeoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Süleymaniye Şehrindeki üç yerden

üç kohezyonlu zemin alınmıştır. Yapılan çalışmada hem normal hem de kirlenmiş zemin numuneleri için tutarlılık özellikleri, sınırlandırılmamış basınç dayanımı, şişme basıncı ve sıkıştırılabilirlik özelliklerini içeren deneyler gerçekleştirilmiştir. Çevre kontaminasyonu sorununun bir simülasyonu olarak AMY'nin çeşitli yüzdeleri (%0, %1, %2, %4 ve %6) seçilen kohezyonlu zeminle karıştırılmıştır. Sonuçlar, AMY içeriği arttıkça likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indeksinin (PI) arttığını, ancak %1 AMY içeriğinde bir düşüş yaşandığını, ardından tekrar bir artışın başladığını göstermiştir. AMY içeriği arttıkça lineer büzülme sınırı, serbest basınç dayanımı (UCS), şişme basıncı (SP) ve yeniden sıkıştırma indeksi (Cr) değerleri azalmıştır. Yapılan çalışmanın basınç dayanım sonuçları atık motor yağı oranlarına göre Şekil 2.1'de verilmiştir. Sıkıştırma indeksi (Cc) değerleri de %0, %1 ve %2 AMY içeriğinde artmış, ardından tekrar küçük bir artış göstermiştir. AMY ile kirlenmiş zemin, inşaat malzemesi olarak ve/veya inşaat projeleri temelleri için kullanılmadan önce stabilizasyon gerekliliğine denilmiştir [5].



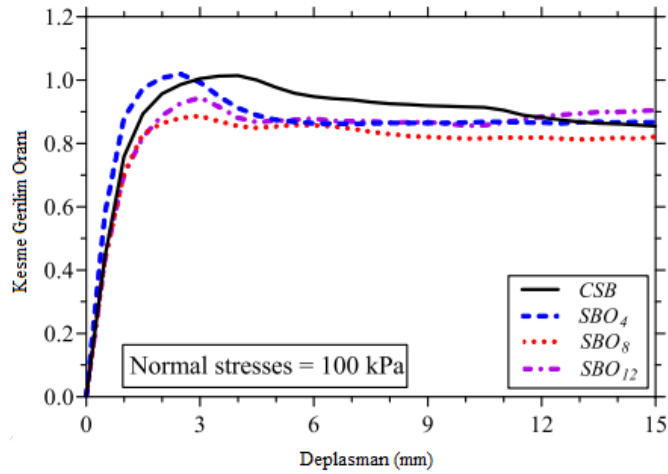
Şekil 2.1. Farklı atık motor yağı içeriklerine göre UCS değerleri [5]

Hewayde vd. yaptığı bu çalışmada motor yağının zeminin bazı jeoteknik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kirlenmemiş zemin numuneleri ve ağırlıkça %5, %10 ve %15 motor yağı ile karıştırılmış zeminler laboratuvarında incelenmiştir. Atterberg limitleri, özgül ağırlığı, yoğunluk-nem ilişkisi, serbest kesme mukavemetini ve California Taşıma Oranını (CBR) belirleyen testler yapılmıştır. Zeminin likit limiti %44, plastik limiti %15'tir ve deneylerin grafikleri Şekil 2.2'de verilmiştir. Özgül ağırlığı $2,71 \text{ gr/cm}^3$ dir. Sonuçlar incelendiğinde kirletici yüzdesi arttıkça likit limit ve plastisite indeksinin azaldığı görülmüş olup plastik limitin ise arttığı görülmüştür. Motor yağının artışına bağlı olarak özgül ağırlık, maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriğinin de azaldığı görülmüştür. Kirlenmiş numunelerin serbest basınç dayanımlarının referans zemin numunesinden daha düşük olduğu bulunmuştur. Kullanılan zeminde kirletici olarak motor yağı kullanılması sonucunda hem kohezyon hem de içsel sürtünme açısı önemli ölçüde azalmıştır. %15 motor yağı içeren kirlenmiş numunenin CBR değeri, kirlenmemiş numuneyle karşılaştırıldığında yaklaşık %65 daha düşük çıkmıştır [6].



Şekil 2.2. Farklı motor yağı içeriklerine göre likit limit, plastik limit ve plastisite indeksi değerleri [6]

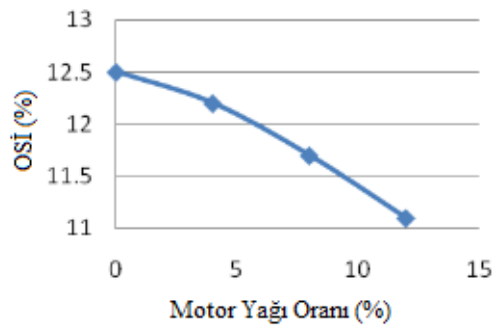
Bojnourdi vd. [7] yaptıkları bu çalışmada hidrokarbonla kirlenmiş zeminlerin geoteknik ve jeolojik özellikleri üzerine nispeten çok sayıda araştırma olmasına rağmen, bu zeminlerin lif takviyesi ile iyileştirilmesi ve kirlenmiş zemin ile lifler arasındaki etkileşimlerin henüz çalışılmadığına değinip bu konu üzerinde takviyesiz ve polipropilen (PP) elyaf takviyeli motor yağı (AMY) ile kontamine kum bentonit karışımları üzerinde standart proktor, doğrudan kesme, serbest basınç dayanımı (UCS) ve geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere göre, AMY kontaminasyonu üzerine kesme mukavemetinin arttığı, sünekliğin ise büyük ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. UCS kirlenme nedeniyle bozulmuştur ve hidrolik iletkenlik azalmıştır. Ayrıca sonuçlar AMY'nin zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki zararlı etkilerine rağmen, fiber takviyesinin direkt kesme, UCS ve süneklik iyileştirmesine katkıda bulunabileceğini ortaya çıkarmaktadır. Hidrolik iletkenliğin başlangıçta az da olsa azaldığı fakat yüksek lif içeriklerinde arttığı gösterilmiştir [7]. Yapılan çalışmanın Kesme Gerilim Oranı-Deplasman grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Atık motor yağıyla kirlenmiş zemin ve temiz zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrileri [7]

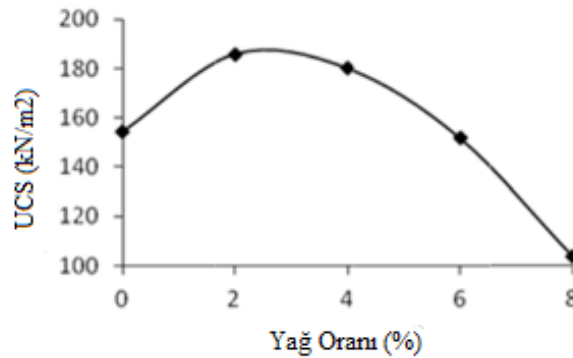
Bonal vd. yaptığı çalışmada kullanılmış motor yağı (AMY) ile kirlenmiş zemini yıkamak için tuz ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) kullanan yüzey aktif maddelerin etkinliğini arttırmayı ve kirlenmiş zeminin yıkamadan önce ve sonra jeoteknik özelliklerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Kirlenmemiş zeminin ayrıntılı dağılımı şu şekilde verilmiştir: Kil boyutu %18, silt boyutu %75, kum boyutu %7, $C_u = 11$, $C_c = 1.11$, $LL = 34.80$, $PI = 16.74$. USCS' ye göre zeminin grup sembolü CL'dir, Yapılan deneyler sonucu AMY 'de bulunan hidrokarbonlarla zeminin kirlenmesi, plastisitesiz ve düşük özgül ağırlıkta kendini gösteren mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Optimum su içeriği değeri %6,42 olup maksimum kuru yoğunluk ise $1,770 \text{ g/cm}^3$ tür ve bu değerler kirlenmemiş zeminden oldukça düşüktür. Aynı zamanda kohezyon değerlerinde azalma ve içsel sürtünme açısı değerlerinde artış olduğunu gösterilmiştir. Kabul edilen zemin yıkama tekniği, sodyum meta- SDS yüzey aktif cismi ile birlikte en verimli kombinasyonu ile yıkandığında özgül ağırlıkta 1,85'ten 2,13'e ve kohezyonda 0,443'ten 1,04 kg/cm^2 'ye artış ve sürtünme açısında 31,16°'den 17,14°'ye önemli bir düşüşle sonuçlanmıştır [8].

Pandey ve Bind'in yapmış oldukları çalışmada motor yağı ile kirlenmiş alüvyal zeminin sıkıştırma özelliklerini araştırmak hedeflenmiştir. Dane boyut analizinde numunenin %40,30 kum, %27,78 silt ve %31,92 kilden oluştuğu belirlenmiştir. Hint standartlarına göre zemin düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. Zeminle karıştırılan yağ miktarı, numunelerin kuru ağırlığının %0, %4, %8 ve %12'si olarak farklı oranlardadır. Sonuçlar, yağ kirliliğinin likit limit, plastik limit ve rötre limitlerini azalttığını göstermiştir. Sıkıştırma özellikleri de büyük ölçüde etkilenmiştir. Artan motor yağı içeriği sebebiyle maksimum kuru yoğunluk ve nem içeriğinde azalma görülmüştür. Bu durum için elde edilen grafik Şekil 2.4'te verilmiştir. Zemin danelerinin artan ara kayması zeminin kayma mukavemetini azaltmıştır. Sonuçlar, zemin sistemi üzerindeki petrol kirliliğinin zeminin jeoteknik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini açıkça göstermiştir. Kirlenmiş zeminlerin jeoteknik amaçlar için kullanılabilir olduğunu ve bu sonuçların mühendislere veya karar vericilere kirlenmiş zeminlerin geri dönüşümü veya yeniden kullanımında fayda sağlayacaklarını belirtmişlerdir [9].



Şekil 2.4. Motor yağı oranlarına göre optimum su içeriği [9]

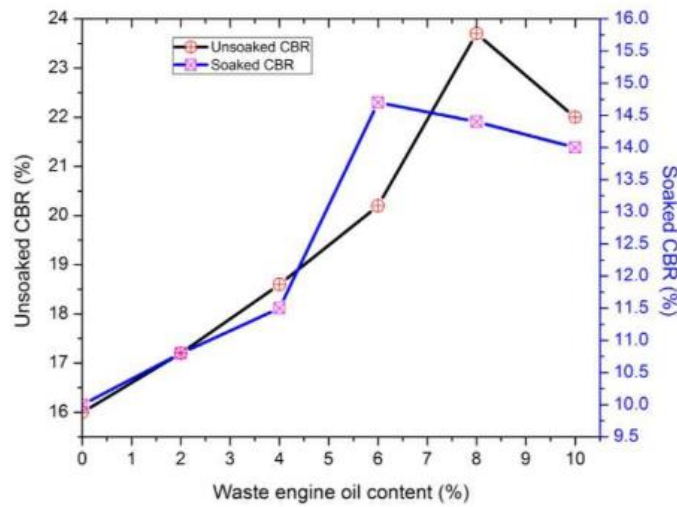
Ijimdiya ve Igboro'nun yaptıkları bu çalışmada kullanılmış motor yağı kirliliğinin laterik zeminlerin dayanım ve sıkıştırılabilirlik özellikleri üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için laboratuvar deneyleri yürütülmüştür. Zeminin likit limit, plastik limit, özgül yoğunluk, doğal su içeriği ve pH değerleri sırasıyla %37,24 , %21,20 , 2,69 , %10,5 ve 6,1'dir. Zeminin USCS'ye göre sınıfı ise CL belirlenmiştir. Kirlenmiş numuneler, mühendislik inşaatında petrolle kirlenmiş zeminlerin faydalanabilirliğini veya başka şekilde değerlendirilmesi için kuru zeminin ağırlığına göre kullanılmış motor yağı ile zemini karıştırarak hazırlanmıştır. Sonuçlar, serbest basınç dayanımında (UCS), konsolidasyon katsayısında (cv) ve hacimsel sıkıştırılabilirlik katsayısında (mv) %6'ya kadar yağ içeriğinde bir azalma göstermiştir. %0, %2, %4 ve %6 oranlarında yağ içeren numunelerin UCS'si 154, 185, 180, 151 ve 103 kN/m² iken, konsolidasyon katsayısında (cv) sırasıyla azalma görülmüştür. Yağ oranına göre UCS değerleri Şekil 2.5'te verilmiştir. Cv değerleri, 373, 75, 27 ve 12 m²/yıl olurken ve hacimsel sıkıştırılabilirlik katsayısının (mv) değerleri ise 157 x 10⁻⁶, 334 x 10⁻⁵, 305 x 10⁻⁵ ve 540 x 10⁻⁶ m²/MN olarak bulunmuştur. Laboratuvar deneylerinin sonuçları, motor yağı kirlenmesi durumunda zeminin özelliklerinin ciddi şekilde bozulduğunu göstermiştir [10].



Şekil 2.5. Motor yağı içeriklerine göre UCS değerleri [10]

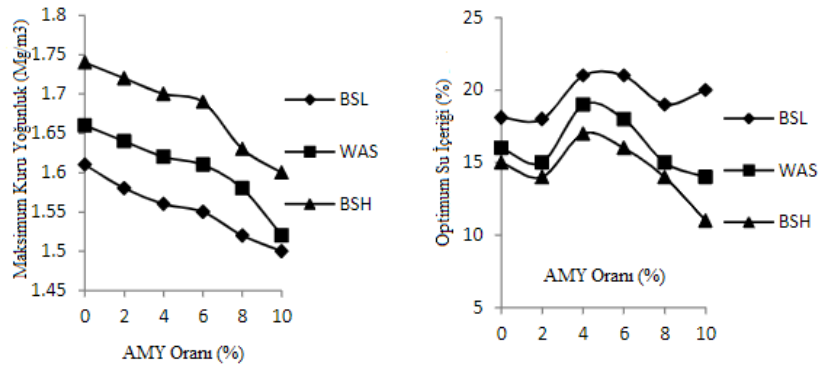
Obeta ve Eze'nin yaptıkları çalışmada atık motor yağının yüzeyden atılmasının Nijerya'nın birçok yerinde yaygın olduğuna ve neticesinde zeminin kirlenmesine sebep olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple yol yapımında temel olarak kullanılan lateritler üzerindeki etkisini araştırmanın önemine vurgu yapmışlardır. USCS'ye göre GC ve SC olarak sınıflandırılan 4 laterik zemin üzerinde deneyler uygulanmıştır. Kuru zemin numuneleri ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 atık motor yağı ile karıştırılarak kirlenmiş zeminler hazırlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde likit limitte düşüş görülürken, plastik limitte artış görülmüştür. Bu ise kohezyonda artış ayrıca adsorbe edilmiş suda azalma olduğu sonucuna varılır. Bazı numunelerde artışın görüldüğü %12'lik istisnalar haricinde kalan tüm numuneler için geçirgenlikte azalma görülmüştür. Son olarak yapılan çalışmanın uzun vadedeki etkilerinin araştırılması gerektiği sonucu ile çalışma tamamlanmıştır [11].

Akinwumi vd. yaptıkları deneysel çalışmada amaç laterik killi bir zeminin atık motor yağı ile kirlenmesinin jeolojik mühendislik özellikleri etkilerini belirlemektir. %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarındaki atık motor yağı zeminle karıştırılmıştır. Kirlenmemiş ve kirlenmiş zemin numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, California taşıma oranı (CBR), özgül ağırlık, sıkıştırma ve geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Atık motor yağı oranı arttıkça zeminin özgül ağırlığı, plastik limiti, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve geçirgenliği azalırken atık motor yağı oranı arttıkça zeminin likit limit, plastisite indeksi ve CBR'ı artmıştır. CBR deney sonuçları Şekil 2.6'da verilmiştir. Zeminin plastisite ve geçirgenlik özellikleri, kirlenmiş zeminde değişiklik veya stabilizasyon olmaksızın yapı malzemesi olarak kullanılmasının doğru olmayacağı sonucuna varılmıştır [12].



Şekil 2.6. Farklı atık yağ içeriklerine göre CBR yüzdeleri [12]

Oluremi vd. yapılan bu çalışmada kullanılmış motor yağı (AMY) kirliliğinin lateritik zeminlerin jeoteknik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kirlenmiş zeminler, zeminin kuru ağırlığına göre %10'a kadar AMY ile %2'lik aşamalı konsantrasyonda karıştırılarak hazırlanmış ve jeoteknik deneyler uygulanmıştır. Sonuçlar, %10'a kadar AMY içeriği ile ince dane içeriğinde, likit limitte, maksimum kuru yoğunluk (MDD) ve serbest basınç dayanımında (UCS) azalma göstermiştir. Artan AMY içeriği ile optimum su içeriğinde (OSİ) genel bir eğilim gözlenmemiştir. MDD, OSİ ve UCS değerleri, sıkıştırmanın artmasıyla artmıştır. MDD ve OSİ için sonuçlar Şekil 2.7'de verilmiştir. Sonuçların regresyon analizi, optimum nem içeriği, ince içerik ve sıkıştırmanın zemin UCS değerlerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Varyans analizi, AMY ve yoğun çabının parametreler üzerinde bir istisna haricinde ciddi bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Laboratuvar deneylerinin sonuçları, AMY ile kirlenmiş zeminin jeoteknik özelliklerinin kayda değer ölçüde bozulduğunu göstermiştir [13].



Şekil 2.7. Atık motor yağının maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği grafikleri [13]

Abousnina vd. yaptıkları bu çalışmada petrole kirlenmiş zeminleri iyileştirmek için önerilen yöntemlerin gelişmekte olan ülkeler için maliyetli olduğuna değinmişlerdir. Alternatif ve daha uygun maliyetli iyileştirme yöntemleri bulabilmek için çalışmayı yürütmüşlerdir. Petrole kirlenmiş kum için mevcut iyileştirme yöntemlerinin ana kaynağı, avantajları ve dezavantajları bu yazıda sunulmaktadır. Benzer şekilde, ham petrolün kum ve betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi gözden geçirilmiştir. Sonuç olarak, Yağ kirliliği, petrole kirlenmiş kum ve betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Bununla birlikte, belirli bir kirlilik seviyesinde bazı önemli özelliklerin geliştirildiğini belirtmişlerdir. Varolan iyileştirme yöntemleri, üreten fakat gelişmekte olan ülkeler için uygun maliyetli değildir. Bu sebeple alternatif ama uygun maliyetli bir yöntem olarak petrole kirlenmiş kumu çimento ile karıştırıp inşaatta kullanmaktır. Petrole kirlenmiş kumun ve betonunun özelliklerinin, yol ve otoyol inşaatı, çöplük bertaraf malzemesi ve prekast duvar üniteleri dahil olmak üzere bazı mühendislik uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür [14].

2.1.2. Ağır Metallerle Kirlenmiş Zemin İçin Literatür Taramaları

Tez çalışmasında kullanılacak olan atık motor yağı ise oldukça tehlikeli bir üründür. Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve yüksek düzeyde ağır metalleri bünyesinde bulundurmaktadır. Benzo[a]piren gibi PAH, yüksek kanserojen özellikleri ile bilinmektedir. Pb, Zn, Cu, Cr, Ni ve Cd gibi ciddi miktarlarda ağır metaller yağda bulunmaktadır ve bu başlık altında incelenmesi gerekmektedir.

Negahdar vd. yaptıkları bu araştırmanın amacı, ağır metal kirleticilerinin kumlu killerin bazı dayanım ve jeoteknik parametreleri üzerindeki etkilerini incelemektir. Zeminin likit limit, plastisite indisi, zemin sınıfı ve pH değeri sırasıyla 46, 20, CL ve 8,9'dur. Numunelerin hazırlanmasını takiben, kurşun (Pb) ve çinko (Zn) ağır metal kirleticilerine maruz kalmış numuneler üzerinde likit limitin belirlenmesi ile birlikte adsorpsiyon ve direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, incelenen üç farklı kum yüzdelere sahip karışık kum kaolinit numuneleri için, her iki kirleticinin

konsantrasyonunun artmasıyla zemin kohezyonunun azaldığını, numunelerin iç sürtünme açısının ise kil varlığından etkilenmediğini göstermiştir. Çinko (Zn) konsantrasyonu 25 cmmol'e yükseldiğinde, %90 ve %60 kaolinit içeren numunelerin kohezyonu sırasıyla %20 ve %23 azalmıştır. Kurşun (Pb) varlığında ise kohezyondaki azalma %42 ve %51'dir [15].

Liu vd. yaptıkları laboratuvar test çalışmasında araştırma nesnesi olarak krom ve çinko gibi ağır metalle kirlenmiş çamuru almışlardır. Katılaştırılmış malzemeler olarak çimento, mineral tozu ve çamuru kullanmışlardır. Ağır metalin katılaşmasından sonra mukavemet ve konsantrasyonu incelemek için ortogonal tasarım ve diğer araçları kullanmışlardır. Araştırma sonuçları, ana katılaştırılmış malzeme olarak çimento, mineral tozu ve çamur kullanılarak belirli bir yüzdeye göre hazırlanan katılaştırıcı maddenin, kirlenmiş çamurdaki ağır metal iyon konsantrasyonunu etkin bir şekilde kontrol edebildiğini ve kirlenmiş çamurun serbest basınç mukavemetini büyük ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir. Buna göre %15 oranında çamur katılaştırıcı maddenin, kirlenmiş çamurun serbest basınç dayanımını 1 MPa'dan fazla artırabildiğini ve belirli bir miktar aktivatör eklenerek dayanımın orijinal dayanımından 1,5 kat daha fazla artırılabilceğini göstermektedir [16]

Hao vd. yaptığı bu çalışmada ağır metal olarak kadmiyum, krom, kurşun ve çinko ile kirlenmiş zeminlerin geleneksel mekanik özellikleri ve viskoelastik özellikleri, tarımsal toprak için ağır metal kirliliği ile birlikte deneysel olarak incelenmiştir. Kontrol zemininin pH değeri, bulk yoğunluğu, toplam boşluğu, kohezyonu, içsel sürtünme açısı, likit limit ve plastik limit değerleri sırasıyla 7,89, 1,37 gr/cm³, %44,56 , 11,7 kPa, 21°, %27.1 ve %19,2' dir. Basınç ve kesme dayanımları test edilmiştir. Bu çalışmada %6, %9, %12 ve %15 olmak üzere dört nem içeriğinde test edilmiştir. Su içeriğinin artmasıyla, kontrol toprağının mekanik parametreleri ve dört ağır metalle kirlenmiş toprak numunesinin tümü farklı derecelerde azalmıştır [17].

Zha vd. yaptıkları bu çalışmada katılaştırma/stabilizasyon tekniğiyle ağır metallerle kirlenmiş zeminlerin iyileştirilmesi araştırılmıştır ve bu yöntemin oldukça yaygın olarak kullanıldığına değinmişlerdir. Çimento/uçucu kül ile yapılan iyileştirmeler ile zeminin mukavemet ve süzülme özelliklerine bakılmıştır. İyileştirmenin değerlendirilmesinde ampirik ilişkiler kurmak için elektriksel özdirenç ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre artan sertleşme süresiyle UCS' nin arttığı ve sızan iyon konsantrasyonunun azaldığı görülmüştür. Gözlemlenen bu durumlardan farklı olarak numunedeki ilk ağır metal iyon konsantrasyonunun artmasıyla UCS azalmış olup sızan iyon konsantrasyonu artış göstermiştir. Son olarak kurşun (Pb) ile kirlenmiş numunenin elektrik direncinin çinko (Zn) ile kirlenmiş zemine göre daha yüksek olduğu görülmüştür [18].

İncelenen çalışmalarda ağır metal kirliliklerinin zemin özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Genellikle çinko (Zn), krom (Cr) ve kurşun (Pb) kirliliği üzerinde durulmuştur çünkü

motor yağında bulunan başlıca ağır metaller bunlardır. Genel olarak bakıldığında ağır metallerin zemine farklı şekillerde de olsa zarar verdiği ve belirli bir düzeni olmaksızın mühendislik özelliklerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir.

2.1.3. Farklı Kirlilikler İçin Literatür Taramaları

Nasehi vd. yaptıkları çalışmada gaz yağı sızıntısı ile zeminin kirlenmesinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri etkileyebileceğine değinmişlerdir. Makalenin amacı, kötü derecelenmiş kum (SP), düşük plastisiteli kil (CL) ve düşük plastisiteli silt (ML) gibi bazı zemin örneklerinin jeoteknik özellikleri üzerinde gaz yağı kirliliğinin etkisinin incelenmesidir. Kirlenmemiş numunelere plastisite, sıkıştırma, serbest basınç dayanımı (UCS) ve doğrudan kesme testleri gibi bazı temel laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Numuneler kuru ağırlıklarına göre %3, %6 ve %9 gaz yağı ile kirlenmiştir. Sonuçlar, gaz yağı içeriğinin artmasıyla içsel sürtünme açısının azaldığını ve zeminlerin kohezyonunun arttığını göstermektedir. Ayrıca, sıkıştırma testinin uygulanması esnasında maksimum kuru yoğunlukta ve optimum su içeriğinde azalma görülmüştür. Gazyağı yüzdesindeki artış, killi ve siltli zeminlerin likit ve plastik limitlerinin artmasında da doğrudan etki göstermiştir. Diğer yandan, gaz yağı yüzdesinin artması, siltli zeminin UCS' sini ters yönde etkilemiştir. Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu çalışmasına göre, kil danelerinin artmasının kumaş flokülasyon hızını arttırdığı, killi zeminlerde serbest basınç dayanımının artmasında kilit bir faktör olduğu ifade edilmiştir [19].

Karkush ve Al-Taher' in yaptığı bu çalışmada endüstriyel atık su kirliliğinin killi zeminler için jeolojik etkileri incelenmiştir. Kullanılan kirleticisi, üretimin bir yan ürünü olarak Thi-Qar petrol rafinerisinden salınan endüstriyel atık su ve Al-Nassyriah'daki Thi-Qar petrol rafinerisi tesisinden alınan zemin numuneleridir. Alınan kirlenmiş zemin örnekleri kirleticisi olan atık suyun etkilerini daha iyi gösterebilmek için bozulmamış zemin ile kıyaslanmıştır. Çalışmada üç farklı yerden alınan numunelerin temsili yüksek oranda kirlenmiş zemin, düşük oranda kirlenmiş zemin ve bozulmamış zemin şeklindedir. Deney sonuçlarına bakıldığı zaman kirleticinin doğal su içeriği, doğal birim ağırlığı, Atterberg limitleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının yanı sıra sıkıştırma indeksi ve konsolidasyon katsayısında artışa neden olduğunu, ayrıca özgül ağırlık, optimum su içeriği, başlangıç boşluk oranı, şişme indeksi, geçirgenlik katsayısı ve zemin daneleri arasındaki kohezyonda bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir [20].

Radhi'nin yaptığı çalışmada atık plastiğin geoteknik mühendislik uygulamalarında özellikle zemin iyileştirmesinde kullanımı ile ilgili geniş ölçekli bir araştırma çalışması yapmıştır. Irak'ta zemin ilave malzemesi olarak atık plastiğin kullanımını benzer çalışmalardan bilgi alarak özetlemiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, plastik atık, zeminin mukavemetini artırmak için

çevre dostu ve uygun maliyetli bir yol olarak kullanılabilir. Ağırlıkça %0,5- %4 plastik eklenmesinin zeminin özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Stabilize edilmemiş numunelerle karşılaştırıldığında, stabilize edilmiş numunelerin basınç parametreleri, kesme mukavemeti parametresi ve CBR (Kaliforniya taşıma oranı) önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür [21].

Salim vd. Bağdat'tan toplanan killi toprağı güçlendirmek için rastgele parçalanmış plastik atık bazlı etileni farklı en boy oranlarında kullanmıştır. Plastik atıkların yüzde üçü kuru zeminin ağırlığına göre (%1, %2, %4) seçilmiş ve plastik olmayan zeminle karşılaştırılmıştır. Ölçülen zemin özellikleri özgül ağırlık, California taşıma oranı, serbest basınç dayanımı ve Atterberg limitleridir. Sonuçlar, plastik atık ilavesinin modifiye killi zemin üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Atık plastik yüzdesi arttıkça özgül ağırlık azalmıştır. %1, %2 ve %4 plastik atık için özgül ağırlıktaki azalma, plastik içermeyen toprağı kıyasla yaklaşık %6, %11 ve %15 olmuştur. Atık plastik yüzdesi arttıkça California taşıma oranı artmıştır. %1, %2 ve %4 plastik atık için California taşıma oranındaki artış, plastik içermeyen zeminle kıyaslandığında yaklaşık %55, %105 ve %200 olmuştur. Atık plastik yüzdesi arttıkça serbest basınç dayanımı da artmıştır. %1, %2 ve %4 plastik atık için serbest basınç dayanımındaki artış, plastik içermeyen zemin ile karşılaştırıldığında sırasıyla yaklaşık olarak %42, %83 ve %180 olmuştur. Atık plastik yüzdesi arttıkça likit limit azalmıştır fakat atık plastik yüzdesi arttıkça plastik limiti artmıştır. Likit limitteki azalma sırasıyla %2, %11 ve %15 olmuştur [22].

Salim vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada Bağdat yumuşak killi zeminin güçlendirilmesi için kuru toprağı ağırlığına göre çeşitli fraksiyonlarda (1, 3 ve 5) parçalanmış naylon taşıma torbalarının kullanımını araştırılmıştır. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş zemin için özgül ağırlık, serbest basınç dayanımı ve Atterberg limitleri gibi zemin özellikleri incelenmiş olup sonuçlar, kıyılmış naylon taşıma torbalarının yerleştirilmesinin killi zemin özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini doğrulamıştır. Killi zeminin özgül ağırlığındaki azalma naylon plastik içermeyen zemine göre %4-10 arasında değişmektedir. Atık plastik yüzdesi arttıkça serbest basınç dayanımı artmıştır. Killi zeminin serbest basınç dayanımındaki artış, naylon plastik içermeyen zemin ile karşılaştırıldığında %44- %130 arasında değişmektedir. Atık naylon plastik yüzdesi arttıkça likit limit azalıp, atık naylon plastik yüzdesi arttıkça plastik limit değeri artmıştır. Naylon plastik içermeyen zeminle kıyaslandığında, likit limitin azalma yüzdesi yaklaşık %8- %21 arasında değişirken plastik limit artış yüzdesi yaklaşık %6- %28 arasında değişiklik göstermektedir [23].

Terzi vd. yaptığı çalışmada sıkıştırılmış kilin çatlama önleyici özelliklerini geliştirmek için katkı malzemesi olarak lastik monofilamentlerini kullanmaya çalışmışlardır. Araştırma için İç Anadolu'daki Avanos deltasından Kızılırmak killi zemini seçilmiştir. Numuneler yüzeyden 3-5 m derinlikten alınmıştır. Zemin inorganik ve plastik kil olarak sınıflandırılmış ve likit limit, plastik

limit, plastisite indeksi, lineer rötre ve hacimsel rötreinin temel özellikleri sırasıyla 55, 36, 19, 14,8 ve 16,45'tir. Çatlak modellerini nicel olarak karakterize etmek için, kuruma oluşumunu ve yayılmasını analiz etmek için yakın mesafeli dijital görüntü analizi teknikleri kullanılmıştır. Avanos kilinin kuvars, kalsit, hematit, biyotit ve montmorillonit, kaolinit ve illit içeren kil mineralleri içerdiğini ortaya koyulmuştur. Lastik kesitinden çelik teller çıkarıldıktan sonra, saf lastik malzemesi, ticari olarak kullanılan monofilament fibere benzer uzun şekiller halinde doğranmıştır. Lastik malzemesinin özgül ağırlıkları ve birim ağırlığı sırasıyla 0,912 ve 6,3 kN/m³'tür. Sonuçlar sıralanırsa çoklu ıslanma/kuruma döngüleri, kil yapısında ve çatlama özelliklerinde değişikliklere neden olmuştur. Kile lastik monofilamentleri eklendiğinde minimum yoğunluk ve optimum su içeriği azaltılmıştır. Kildeki lastik monofilamentlerinin miktarı artırıldığında hidrolik iletkenlik üzerinde kayda değer bir etki görülmemiştir. CIF sonuçlarına göre, %0,2-0,3'lük bir lastik-monofilament içeriği, Avanos kiline eklendiğinde çatlak ve büzülme derecesini önemli ölçüde azaltmıştır [24].

Irshayyid ve Fattah, ağırlıkça (4, 8 ve 12) fraksiyonlarında yüksek yoğunluklu polietilen bazlı atık plastik ilavesiyle genişleyen zeminin davranışını araştırmıştır (%80 kil + %20 kum). Sonuçlar, atık plastik liflerin genişleyen toprağın özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini gösterdi. Plastik yüzdesi arttıkça likit limit değerleri almıştır fakat plastik limit değeri artmıştır. Likit limitin azalma oranı %8,5-%11,5 arasında değişirken, plastik limitin yükselme yüzdesi ise %26,4- %81,2 arasında değişmiştir. Ayrıca, atık plastik yüzdesi arttıkça serbest basınç dayanımı da artmaktadır. Büyüme yüzdesi yaklaşık %13- %100 arasında değişmektedir [25].

Hameed vd. yaptıkları bu çalışmada atık plastik liflerin uygulanmasının kireçle stabilize edilmiş kumlu zeminin performansı üzerindeki etkisi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Düşük yoğunluklu polietilen atıklarından elde edilen plastik lifler, farklı uzunluklarda (5, 10 ve 20) mm, çeşitli ekleme yüzdelerinde (1, 2 ve 3) ağırlıkça kullanılmıştır. Sonuçlar, %3 içerikte 10 cm uzunluğunda atık plastik liflerin eklenmesinin, plastik içermeyen zeminle karşılaştırıldığında yüzey sapmasında yaklaşık %21 azalma ve dinamik modüllerde yaklaşık %28'lik bir artış sağladığını göstermiştir [26].

Bu başlık altında ise yaygın bir şekilde karşımıza çıkan zemin kirliliğinin yanı sıra çevre kirliliğine de neden olan kirleticiler ile kirlenmiş zeminler ve buna bağlı olarak zeminlerin gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Çeşitli kirliliklerin zemin üzerinde farklı etkileri olduğu hatta aynı kirleticinin bazı mühendislik özelliklerini olumlu etkilerken diğer özellikleri ise olumsuz etkilediği görülmektedir. Fakat genel hatlarıyla incelendiğinde kirlilikler zemine zarar vermekte ve bu durumun tersine çevrilmesi veya en azından kullanılabilir hale getirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.

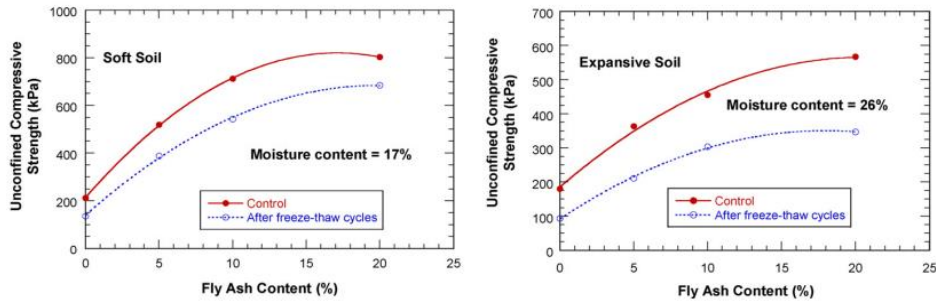
2.2. Uçucu Kül ve Nanopartikül Üzerine Yapılan Çalışmalar

Kirlenmiş zeminler çeşitli yollarla iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu tez çalışmasında atık motor yağı ile kirlenmiş kaolin kilinin uçucu kül ve grafen nanopartikülü ile iyileştirilmesi sağlanacağından iki başlık altında yapılan çalışmalar incelenmiştir.

2.2.1. Uçucu Kül Literatür Taramaları

Uçucu kül takviyesi yapılmış zeminlerin mühendislik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar derlenmiş olup son olarak da kullanılan malzemenin etkileri özetlenmiştir.

Bin-Shafique vd. yaptıkları bu çalışmada uçucu kül ile stabilize edilmiş iki ince taneli zeminin uzun süreli performansını araştırmak için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Bir tane düşük plastisiteli killi zemin ve bir tane de yüksek plastisiteli killi zemin, uçucu kül içeriği %0, %5, %10 ve %20 olan bir C sınıfı uçucu kül ile stabilize edilmiştir. Düşük plastisiteli kilin özgül ağırlığı, likit limiti, plastisite indeksi, doğal ve optimum su içerikleri sırasıyla 2,69 , %44, %26, %12, %17 şeklindeyken yüksek plastisiteli kil içinse sırasıyla 2,71 , %81, %57, %22, %26'dır. Maksimum kuru yoğunlukta statik olarak standart proktor ile sıkıştırılmıştır ve optimum su içeriğine karşılık gelen zeminin çeşitli kombinasyonların her birinden on tekrar şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Tüm numuneler 7 gün süreyle kür edildikten sonra, ilk set, stabilizasyondan kaynaklanan iyileşmeyi tahmin etmek için plastisite indeks deneylerine, serbest basınç deneylerine ve şişme deneylerine tabi tutulmuştur. Benzer deneyler, altı setin 12 ıslak-kuru döngüye (üç set musluk suyu ve kalan üç set tuzlu suyla) tabi tutulduğu ve diğer üç setin 12 donma- çözülme döngüsüne tabi tutulduğu başka bir dokuz tekrar seti üzerinde de yapılmıştır. Islak-kuru çevrimlerin stabilize zeminler üzerindeki etkisi aslında önemsizdi fakat uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminler, donma- çözülme döngüleri nedeniyle mukavemetinin %40'ı kadarını kaybetmiştir. Mukavemetini ciddi ölçüde kaybettikten sonra bile, stabilize edilmiş zeminlerin mukavemeti, stabilize edilmemiş zeminlerin mukavemetinden en az üç kat daha yüksektir. Bu durum Şekil 2.8'deki grafiklerde de görülmektedir. Stabilize şişen zeminlerin şişme potansiyeli de donma- çözülme çevrimleri nedeniyle artmıştır. Şişme ilk 4-5 döngü için hızla artmış olup daha sonra çok yavaş artmıştır [27].



Şekil 2.8. Yumuşak ve şişen zeminlerin donma- çözülme döngülerine göre UCS- uçucu kül içeriği grafikleri [27]

Laguros vd. tarafından yapılan bu çalışmada uçucu külün şişen zemin üzerindeki etkisi incelenmiştir. Uçucu külün genel olarak içi boş silikon, alüminyum ve demir oksit kürelerinden ve oksitlenmemiş karbondan oluştuğuna değinmiştir. Uçucu külün C sınıfı ve F sınıfı olmak üzere iki ana sınıfı olup ilki antrasit veya bitümlü kömürün yakılmasından, diğeri ise linyit ve alt bitümlü kömürün yakılmasından üretilir. Her iki uçucu kül sınıfı da silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanan puzolanlardır. Bu nedenle, uçucu kül, dağılmış kil parçacıklarının topaklanmasını sağlayan iyonize koşullar altında bir dizi iki değerli ve üç değerli katyon (Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} vb) sağlayabilir. Böylece şişen zeminler, uçucu kül kullanılarak katyon değişimi methoduyla yüksek bir ihtimalle etkili şekilde iyileştirilebilirler. Soma Uçucu ve Tunçbilek Uçucu külü kullanarak incelemeler yapılmış ve %0- %25 oranında şişen zemine katılmıştır. Uçucu küllü numuneler 7 gün ve 28 gün kürlendikten sonra Ödometre serbest şişme deneyleri uygulanmıştır. Deneysel bulguları, artan stabilizatör ve kür süresi ile numunelerin plastisite indeksi, aktivitesi ve şişme potansiyelinin azaldığını ve şişme potansiyelini azaltmada optimum uçucu kül içeriğinin %20 olduğunu göstermiştir. Fiziksel özelliklerdeki ve şişme potansiyelindeki değişiklikler, bir seviyeye kadar ekstra silt boyutundaki partiküllerin ve kil partiküllerinin ani topaklaşmasına neden olan kimyasal reaksiyonlardan ve uçucu külün zamana bağlı puzolanik ve kendiliğinden sertleşme özelliklerinin bir sonucudur. Hem yüksek- kalsiyum ve düşük kalsiyum C sınıfı uçucu küller, şişen zeminlerin stabilizasyonu için etkili stabilize edici malzemeler olarak önerilebilir sonucuna varılmıştır [28].

Pandian vd. yaptıkları bu çalışmada iki tür uçucu külün, siyah pamuklu zeminin CBR özellikleri üzerindeki Raichur uçucu külü (F Sınıfı) ve Neyveli uçucu külünün (C Sınıfı) etkisi incelenmiştir. Uçucu kül içeriği %0'dan %100'e yükseltilmiştir. Genellikle CBR/kuvvet, kohezyonu ve sürtünmesinden kaynaklandığını belirtmiştir. Ağırlıklı olarak daha ince danelerden oluşan BC zemininin CBR'ına kohezyon katkıda bulunmaktadır. Ağırlıklı olarak daha iri danelerden oluşan uçucu külün CBR'ına sürtünme bileşeni katkıda bulunmaktadır. BC zemininin düşük CBR'ı, kil fraksiyonunun baskınlığından kaynaklanan doğal düşük mukavemete atfedilir. BC zeminine uçucu kül ilavesi, BC zemininden gelen kohezyona ek olarak uçucu külün sürtünme direnci dolayısıyla karışımın CBR'ını ilk optimum düzeye yükseltir. Optimum seviyenin ötesinde

daha fazla uçucu kül ilavesi %60'a varan bir düşüşe neden olur ve daha sonra ikinci optimum seviyeye kadar bir artış görülür. Bu sebeple, uçucu kül-BC zemin karışımlarının CBR'ının değişimi, sırasıyla uçucu kül veya BC zemininden gelen sürtünme veya kohezyon direncinin nispi katkısına bağlanabilmektedir. Neyveli uçucu külünde ayrıca uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte mukavemette bir artış vardır. Burada BC zemini ve uçucu kül partikülleri arasında iyi bir bağlanma ile sonuçlanan çimentolu bileşikler oluşturan ek puzolonik reaksiyon olmaktadır [29].

Phani Kumar ve Sharma tarafından yapılan deneysel çalışma bir program aracılığıyla uçucu külün şişen zeminin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini göstermek için yürütülmüştür. Serbest şişme indeksi (FSI), şişme potansiyeli, şişme basıncı, plastisite, sıkıştırma, mukavemet ve şişen zeminin hidrolik iletkenliği gibi parametreler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kuru ağırlıkça uçucu kül içeriği %0, %5, %10, %15 ve %20 olan kül katkılı şişen zeminde, uçucu kül içeriğindeki artışın plastisite özelliklerini azalttığı ve %20 ilavesiyle FSI'nin yaklaşık %50 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır. Uçucu kül içeriğindeki artışla birlikte maksimum kuru birim ağırlıkta artış görülmektedir. Uçucu külle karıştırılmış şişen zeminlerin hidrolik iletkenliği, uçucu kül içeriğindeki artışla azalmaktadır. Uçucu kül içeriği arttığında, optimum su içeriğinde bir azalma olur ve maksimum kuru birim ağırlık artar. Uçucu külün etkisi, artan sıkıştırma çabasına benzemektedir. Böylece şişen zemin daha stabil hale gelir. Uçucu külle harmanlanmış şişen zeminin drenajsız kesme mukavemeti, kül içeriğinin artmasıyla arttığı görülmektedir [30].

Sharma vd. yaptıkları çalışmada zayıf zeminin alt seviyelerindeki üstyapıların erken bozulmasını belirtmiş olup killi zeminlerin de genellikle düşük taşıma kapasitesi, yüksek büzülme ve şişme özellikleri ile yüksek nem duyarlılığı gibi istenmeyen mühendislik davranışlarını gösterebileceğine değinmişlerdir. Çalışmanın amacı hem uçucu kül hem de kireç ilavesiyle yerel olarak temin edilebilen kohezyonlu bir zeminin mukavemetindeki gelişmeyi göstermektedir. Stabilizasyon mekanizmasını aydınlatmak için X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımlı spektroskopi, termal gravimetrik analiz, zeta potansiyeli ve pH değeri testi kullanılarak analiz yapılmıştır. Mikro seviye analizi, stabilizasyondan sonra işlenmemiş kilde bulunan montmorillonit yapısının kırıldığını doğrulamıştır. Analizde ayrıca stabilizasyon sürecinde katyon değişim kapasitesi üzerinde puzolonik reaksiyonun baskın olduğu doğrulanmıştır. %20 uçucu kül ve %8,5 kireç ilavesiyle UCS değeri 105,2 kPa'ya, CBR değeri ise %5,7'ye yükselmiştir. Uçucu kül ilavesi de zeminin jeoteknik özelliklerini iyileştirmiştir. İşlenmemiş zeminin zeta potansiyel değeri, katkı maddelerinden yapılan stabilizasyon ile önemli ölçüde değişmedi, bu da puzolonik reaksiyonun işlem görmemiş toprak için katyon değişim kapasitesi (C.E.C.) üzerinde baskın olduğu doğrulanmıştır [31].

Mir ve Sridharan'ın yaptıkları çalışmada yüksek kalsiyum (ASTM Class C- Neyveli uçucu) ve düşük kalsiyum (ASTM Class F- Badarpur uçucu kül) uçucu külleri, yüksek oranda genleşen bir karışıma ağırlıkça çeşitli oranlarda (%10, %20, %40, %60 ve %80) ilave edilmiştir. Deney sonuçları, şişen zemin-uçucu kül karışımlarının kıvam limitlerinin, sıkıştırma özelliklerinin ve şişme potansiyelinin önemli ölçüde değiştiğini ve iyileştiğini göstermektedir. Bundan dolayı çalışmanın temel amacı, uçucu küllerin BC zeminlerinin fiziksel, sıkıştırma ve şişme potansiyeli üzerindeki etkisini ve çevreyi olumsuz etkilemeden endüstriyel atık yan ürününün toplu kullanımı üzerinde çalışmaktır. BC zeminin plastisite özelliklerini iyileştirmek için %40 uçucu kül içeriğinin ideal miktar olduğu görülmektedir. Uçucu küller, BC zemini ile karşılaştırıldığında düşük kuru birim ağırlığa sahiptirler. Uçucu külün BC zeminine eklenmesiyle, zemin-uçucu kül karışımlarının maksimum kuru birim ağırlığı (cdmax), optimum su içeriğindeki (OSİ) artışla azalır; bu da temel olarak uçucu kül derecesindeki iyileşmeye bağlanabilmektedir. Badarpur uçucu külünün %40'ı ile karşılaştırıldığında şişme potansiyelini en aza indirmek için gereken ideal miktarın Neyveli uçucu külünün %10'u olduğu da görülmüştür [32].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde uçucu külün farklı birçok zeminde çeşitli mühendislik özelliklerine oldukça katkı sağladığı görülmektedir. Özellikle çalışmalarda mukavemet, geçirimsizlik ve şişme üzerinde durulmuş olsa da diğer katkıları da göz ardı edilemez. Ayrıca yapılan çalışmalarda özel durumlar da bulunmaktadır. Donma-çözülme etkisinde de zemine ciddi katkılar verdiği görülmüştür.

2.2.2. Nanopartikül Literatür Taramaları

Nanopartikül takviyesi yapılmış zeminlerin mühendislik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar incelenmiştir ve kullanılan malzemenin etkileri özetlenmiştir.

Choobbasti ve Valizadeh'in yaptığı bu çalışmada, nano-grafen (NG) ilavesinin killi kumun kesme ve konsolidasyon özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, kil ile %10, %20 ve %30 oranlarında karıştırılmış ve nano-grafen ile stabilize edilmiştir. Nano-grafen zeminin ağırlıkça %0, %0,03, %0,06 ve %0,09 oranlarında katılmış olup, 28 gün kürlenmiş kumlu zemin üzerinde doğrudan kesme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, %20 kil içeren ve tüm oranlardaki nano-grafen ile kumlu zemin üzerinde konsolidasyon testleri de 28 günlük kür sonunda yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, nano-grafen ilavesinin zeminin içsel sürtünme açısını ve kohezyonunu arttırdığını görülmüştür. Nano-grafenin optimum değeri %0,06 olarak saptanmıştır. SC1 örneğine %0,06 nano-grafen ilavesi (%10'da kil ile karıştırılmış kumla), içsel sürtünme açısını ve kohezyonu sırasıyla %28 ve %125 oranında arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, ince taneler açısından, nano-grafen eklenmesi, %10 kil içeren numune davranışının daha da iyileştirilmesine katkıda bulunduğuna

ulaşılmıştır. Konsolidasyon testlerinin sonuçlarına göre nano-grafen ilavesiyle Cs ve Cc değerlerinin düştüğünü görülmüştür [33].

Naseri vd. yaptıkları bu çalışmada, grafen oksit (GO) nano tabakaların çimentolu zeminin jeoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. GO'nun zeminin sıkışma özellikleri, kıyım limitleri, serbest basınç dayanımı (UCS) ve doğrudan kayma parametreleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için zemine %0,02, %0,05 ve %0,1 oranlarında GO eklenmiştir. Sentezlenmiş GO ve stabilize edilmiş zemin numunelerinin yapısını karakterize etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını toz kırınımı (XRD) analizi kullanılmıştır. GO takviyesi, işlenmiş zemin numunelerinin plastisite ve sıkışabilirlik parametrelerini azaltmıştır. Zemin numunelerinin çekme ve kayma mukavemeti, GO artmasıyla yükselmiştir. Çimentolu zemin numunelerinde GO içeriği arttıkça serbest basınç dayanımının arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, stabilize edici bir malzeme olarak GO' nun zeminin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [34].

Changizi ve Haddad yaptıkları bu çalışmada yumuşak kilin mekanik ve dayanım özelliklerini iyileştirmek için nano silika parçacıklarının kullanılmasının etkisini incelemiştir. Atterberg limiti, optimum nem içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı gibi özellikler nano silika ile birlikte ölçülmüştür. Nano silika oranı zemine göre ağırlıkça %0,5, 0,7 ve %0,1'dir. Nano silika içeriğindeki artışa göre iyileşmiştir. Artan oranlar, plastisite indeksinde azalmaya ve büzülme sınırlamasında artışa neden olmuştur. Sonuçlar, viskoz jelin, sertleşmeden önce yumuşak kil için 70 Kn/m²'den %0,7 nano silika ile stabilize edilmiş bir zemin için 300 Kn/m²'ye kadar başlangıç gerilmesini arttırdığını göstermiştir. Basınç dayanımı %56'ya kadar artmıştır. Nano silika içeriğinin artırılması, çekme gerilmesinde azalma göstermiştir ancak zeminin elastik modülünde bir artışa neden olmuştur. Sonuçlara dayanarak, nano silika ilavesinin kilin mekanik ve dayanım özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [35].

Abbasi vd. yapılan bu çalışmada nanopartiküllerin düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli iki tür killi zeminin dağılım potansiyeli ve dayanım parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle iki tür killi zemin ve nanopartikül üzerinde sınıflandırma deneyler yapılmıştır. Ardından, kuru ağırlığa göre %0, %0,25, % 0,5, %1, %2 ve %4 olmak üzere farklı miktarlarda nanoparçacık içeren toprak numuneleri üzerinde iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Farklı deneylerden elde edilen sonuçlara göre, dağılılabir killi zeminlere nano-kil ilavesinin dağılma potansiyellerini önemli ölçüde azaltabileceği sonucuna ulaşılmıştır. [36].

Majdi vd. yaptıkları çalışmada kaolinit nanopartiküllerin eklenmesinin killi zeminin jeoteknik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Nano kaolinit elde etmek için mekanik bir

bilyeli değirmen kullanılmış olup kaolinitin ilk tozu 10 saat boyunca planet bilyeli değirmen makinesinde parçalanmış ve nanometre ölçeğine (100 nm'den küçük) dönüştürülmüştür. Nanoparçacıkların Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (FESE) tarafından üretilen görüntüler bunu doğrulamaktadır. Elde edilen nanoparçacıklar daha sonra farklı zemin ağırlık oranları (CL) ile karıştırılmış ve nanopartiküllerin eklenmesinden önce ve sonra zemin geoteknik parametrelerinin değişim miktarı basınç, direkt kesme ve Casagrande deneyleri ile araştırılmış ve optimum nanopartikül ilavesi elde edilmiştir. Sonuçlar, zemine eklenen nanopartikül sayısının arttıkça killi zeminin akışkanlığının ve macunsu aralığının arttığını göstermiştir fakat macunsu aralığındaki artış hızı akışkanlık seviyesinden daha yüksek olduğu için macunsu indeksi düşmektedir ki bu da geoteknik mühendisliğinde inşaat projelerinin uygulanması için arzu edilen bir sonuçtur. Ek olarak, basınç deneyinin sonuçlarına göre, killi zeminin birim hacim ağırlığı, nano kaolinit ilavesiyle belirli bir dereceye kadar artmış ve daha sonra hızla azalmıştır. Killi zeminin adezyonu ve buna bağlı olarak kesme mukavemeti de belirli miktarda nanopartikül ilave edildikten sonra yapılan direkt kesme testinin sonuçlarına göre artmış ve bu sınırdan sonra fazla değişmemiştir. XRD ve XRF deneylerinin sonuçları, nano kaolinitin zemin adezyonunda artışa neden olduğunu ve dolayısıyla zeminin kesme mukavemetini arttırdığını göstermiştir [37].

Gelsefidi vd. yaptıkları çalışmada zayıf bir zeminin stabilizasyonu nanomalzeme kullanılarak araştırılmıştır. Seçilen zemin, İran'ın kuzeyindeki Boodian Yolu'ndan elde edilmiş ve düşük plastisiteli kil (CL) olarak sınıflandırılmıştır. 50 CBR testinin yapıldığı çalışmada ilk aşamada, zayıf zeminin stabilizasyonunda kirecin etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, zeminin iyileştirilmesinde kirecin küçük bir etkisi olduğunu göstermiştir. İkinci aşamada, nano-silikanın zemin-kireç karışımının stabilizasyonuna etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, nano-silika eklenmesinin zeminin CBR mukavemetini sırasıyla 21 ve 7.5 kata kadar arttırdığı zemin-kireç karışımında nano-silikanın önemli etkisini göstermiştir. Kür süresinin etkileri de çalışmada değerlendirilmiş olup, sonuçlar, nanomalzeme ilavesi ile zemin-kireç karışımının CBR mukavemetinin daha hızlı arttığını göstermiştir. Bu çalışmada, Boodian zayıf zemininin stabilizasyonu için optimum karışım oranları zemine %5 kireç ve %3 nano-silika eklenmesi olarak belirlenmiştir [38].

Majeed ve Taha'nın yaptıkları çalışmada nano-Cu, nano-MgO ve nano-kil dahil olmak üzere farklı nanomalzemelerin eklenmesinin Penang Eyaletinden alınan yumuşak zemin numunelerinin jeoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Zeminin pH, likit limit, plastik limit, maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği değerleri sırasıyla 3,5, %47, %28, 14,44 kN/m³ ve %21,6' dır. Zeminin sıkışma özellikleri, kıvam limitleri ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek için zemine farklı oranlarda nanomalzemeler %0,05 ila %1 arasında eklenmiştir. Eklenen nanomalzemelerin yüzdesinin artırılması, zeminin maksimum kuru yoğunluğunu arttırmıştır. Artan nanomalzeme içeriği ile lineer büzülme ve plastisite indeksi ise azalmıştır.

Zeminde nanomalzeme içeriği belirli bir yüzdeye kadar arttı  a serbest basınç dayanımı artmış fakat sonrasında azalmıştır [39].

Yapılan çalışmalarda nanopartiküllerin zeminin mekanik ve dayanım özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir. Uçucu külden farklı olarak zemine ilave edilme oranları farklıdır. Nanopartiküllerin uçucu k le oranla çok daha az ilave edildiği görülmektedir ama buna rağmen mühendislik özelliklerinde büyük ve olumlu değişiklikler sağlamıştır.



3. KİL ZEMİNLER

3.1. Kil Minerali

İki ana bileşenden oluşan alüminyum silikatlara kil minerali denilmektedir.

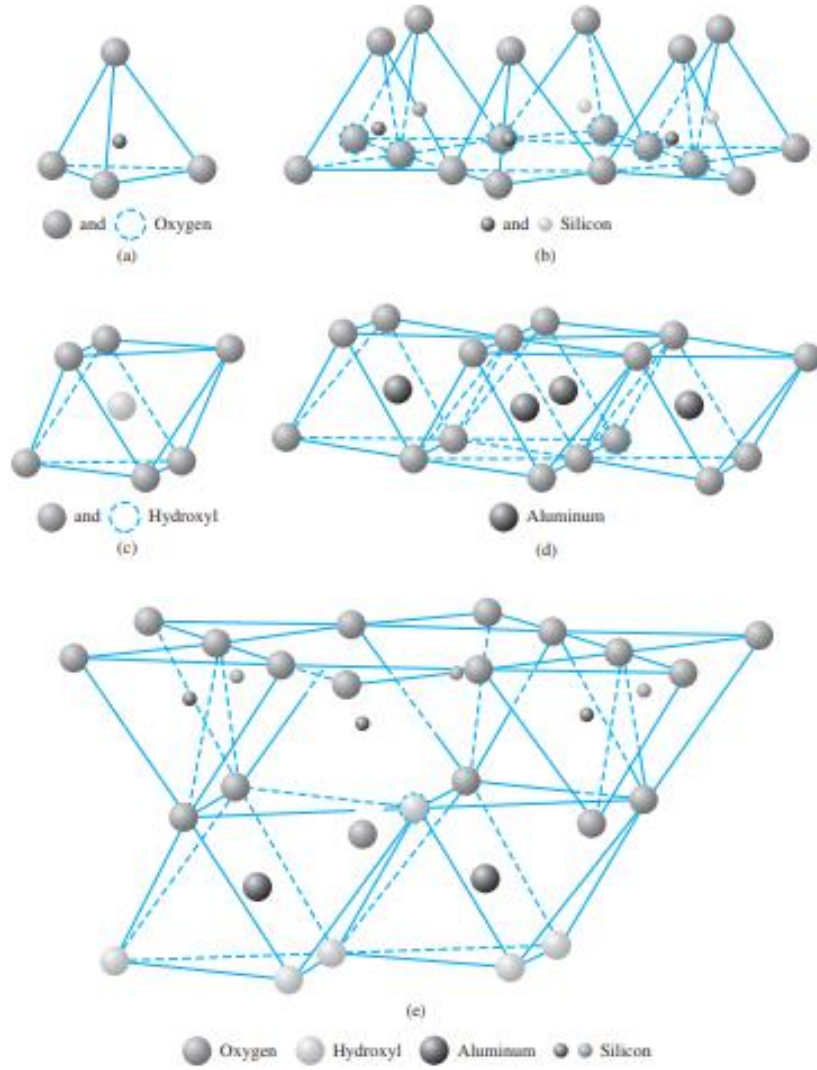
Silis Tetrahedron

Tetrahedral birimler, dört oksijen atomunun bir silikon atomunu çevrelemesiyle ortaya çıkmaktadır. Silika levhalarının oluşumu ise tetrahedral silika birimlerinin birleşimiyle meydana gelmektedir. Her tetrahedronun tabanı, bitişik tetrahedral tarafından paylaşılan üç oksijen atomuna sahiptir [40].

Alümina Oktahedron

Altı hidroksil grubu, oktahedrelerde bir alüminyum, magnezyum, demir ya da farklı bir atomu sarmaktadır (Şekil 3.1).

Brusit, magnezyum oktahedral birimlerdeki alüminyum atomlarını değiştirdiğinde oluşan oktahedral bir tabakadır. Suyun varlığı killi toprakları büyük ölçüde etkiler. Kilin her kristalini çevreleyen su katmanları suda emilir [40]. Su emiliminin üç sebebi vardır. İlk olarak, suyun pozitif ve negatif olmak üzere iki yükü vardır ki bu durum su molekülünün elektrostatik çekim kuvveti ile kil kristaline doğru hareket etmesi sağlar. İkincil sebep ise hidrojen bağlarından dolayı kil yüzeyindeki oksijen ya da hidroksil sınıflarına su çekilir. Son olarak da suda bulunan katyonlar kil yüzeyindeki negatif yükler tarafından çekilir. Su molekülleri kil yüzeyinde çok sıkı bir şekilde sıkışmış gibi görünmektedir ve güçlü bir şekilde hizalanmıştır [41].



Şekil 3.1. (a) Silika tetrahedron (b) silika levha (c) alümina oktahedron (d) oktahedral (gibsit) levha (e) elemental silika-gibsit levha [40]

3.2. Kil Minerallerinin Grubu

Kil mineralleri üç ana gruba ayrılmaktadır ve yapıları Şekil 3.2’de verilmiştir. Bunlar:

- 1) Kaolinit
- 2) İllit
- 3) Montmorillonit

Kaolinit

Alternatif tetrahedral tek tabaka silikat ve oktahedral alüminyum tabakalarının yığınlarından meydana gelmektedir. Kil birikintilerinin baskın bileşeni olan bu mineralde bloklar birbiri üzerine binmiş olup aradaki hidrojen bağları ve aktif Van der Waals bağları ile suyun girip şişme oluşturmamasını engellemektedir. Bu sebeple kaolinitler su ile karıştırıldıklarında stabilitelelerini

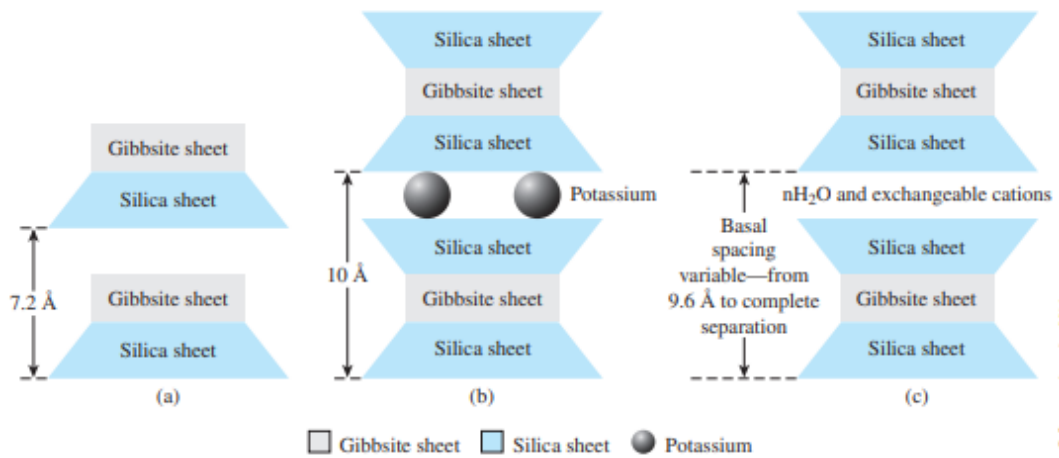
kaybetmezler ve seramik sanayisinde kullanılmasının başlıca sebebi budur. Kaolinit, tekrarlı silika ve gipsit katmanlarının 1:1 kafesinden oluşmakta olup katmanlar yaklaşık olarak 7,2 Å kalınlığındadır. Kaolinit, yanal olarak 100-1000 Å kalınlığında ve 1000-20000 Å trombositlerden oluşmaktadır. Birim kütle başına yüzey alanı, özel yüzey alanı olarak bilinir. Kaolinit taneleri, gram başına yaklaşık 15 m² 'lik bir yüzey alanına sahiptir [40].

İllit

Alternatif alümina ve silika tabakalarından oluşan kil mineralidir. Oktahedral ve tetrahedral levhalarda, alüminyumun bir bölümü demir ve magnezyum ile değişirken, silikonun ise kısmen alüminyum ile değiştiği yapıdır. Yapı blokları arasına giren potasyum iyonları, bağın belli bir miktar kuvvet kazanmasını sağladığından su moleküllerinin araya girmesi kaolinit kadar olmasa da önlenmiş olur. İllitler su ile karıştırıldığında şişme yerine genişleme gösterir. İllitlerin bir diğer adı kil mikadır. İllit parçacıkları 50-500 Å kalınlıklarında ve 1000-5000 Å yanal çaplarda üretilir. Taneler gram başına yaklaşık 80 m²'lik bir yüzey alanına sahiptir.

Montmorillonit

Bu minerallerin yapısı illitlere benzememektedir. İzomorfik replasman, aslında alümina tabakasında meydana gelmekte ve dioktahedral mineraller magnezyum ya da demir ile değişmektedir. Tabakalar arası bağ kuvvetleri Van der Waals ve katyonlarla sağlandığı için çok zayıftır. Su, bu tabakalar arasına girerek bunların ayrılmasına neden olur. Montmorillonit kil mineralleri 20 katına kadar suyu bünyesine alabilmektedir. Bu gruptaki killer su alarak şişer ve hacmini artırır.



Şekil 3.2. (a) Kaolinit yapısı (b) İllit yapısı (c) Montmorillonit yapısı [40]

3.3. Killerin Özellikleri

Kilin Hidrasyonu

Killer, absorbe edilmiş su veya onları saran su molekülleri tarafından hidratlanır. Bunun neticesinde, su içeriği arttığında bile kilin yoğunluğu düşüktür. Su ve killer, su moleküllerini yük olan kil yüzeyine doğru çeken bir kuvvet uygular. Kil üzerindeki negatif yükün yüzey yoğunluğu, suyun tamamını tutmak için oldukça düşüktür. Bundan dolayı, hidrojen bağlanması, suyu yüzeye bağlayan kuvvetten sorumlu olmaktadır [41].

Yüzey Alanı

Zeminin yüzey alanı oranı, kütlenin gramı başına yüzey alanı oranı olarak karakterize edildiğinden, kil mineralleri geniş bir yüzey alanı oranına sahiptir [41].

Plastisite ve Kohezyon

Killi zeminlerin en önemli ayırt edici özelliği olan plastisitenin ölçülebilir olması da gayet önemlidir. Killi zeminler sıkışma gösterdiğinde oluşan yeni şekillerini korurlar. Kil parçacıklarının boyutu ve dokusu, absorbe edilen tabakanın türü ve diğerleri gibi kilin plastik kıvamını etkileyen çeşitli elementler bu özelliği kontrol eder [42].

Büzülme ve Şişme

Absorbe tabaka sıkıştığında ya da emme sebebiyle su içeriği azaldığından dolayı su, kil ile yer değiştiğinden büzülme meydana gelmektedir. Şişme ise suyun basınç altında kilin içine nüfuz etmesi ve buna bağlı olarak hacminin artmasıyla meydana gelmektedir.

4. ZEMİN KİRLİLİĞİ VE İYİLEŞTİRME YOLLARI

4.1. Zemin Kirliliğinin Tanımı

Zeminin kirlenmesi, toprakta fazla oranlarda insan sağlığı ve ekosistem için riskler oluşturabilecek danelerin ve zehirli kimyasalların bulunması olarak tanımlanabilir. Zeminde doğal süreçte oluşan ve dikkate alınmayacak kadar tehlikeli maddelerin olduğu durumlar vardır. Bu tehlikeli kirleticilerin sebep olduğu kirlilik miktarı ve oranı, normal şartlarda olması gerekenden fazla olduğu zaman zemin kirliliği meydana gelmektedir.

Çevrenin kirlenmesi kimyasallar, safsızlıklar ve zararlı maddelerden kaynaklanmaktadır. Çevre kirliliği küresel çapta oldukça önemli bir konu olup ciddi sorunları da beraberinde getirmektedir. Gezegenimize büyük hasarlar veren ve kayda değer miktarlarda toprak kaybına neden olan bu sorunun sanayi devrimiyle birlikte oldukça arttığı ve günümüze doğru da artışının devam ettiği bilinmektedir. Toprak, doğal olarak oluşan birçok farklı bileşikler içermektedir ve antropojenik aktivite veya doğal yollar ile kirlenebilir. Bu kirleticiler arasında inorganik maddeler, tuz ve mineraller ile çeşitli organik maddeler yer almaktadır.

4.2. Zemin- Su Etkileşimi

Zemin, su tarafından iki şekilde etkilenmektedir. Bunlar:

- a) Mineral iskeleti oluşturmak için zemin granüllerinin bir araya gelmesi yani kimyasal alışveriş
- b) Mineral iskeleti aracılığıyla iletilen kuvvetlerin boyutunu etkileme yani fiziksel etkileşim

Su, diğer sıvılar ile karşılaştırıldığında yüksek yüzey gerilimi ile tanımlanmaktadır. Yüzey gerilimi, davranışı özellikle etkilemektedir. Suyun zeminde hareket halinde olması ve bünyede tutuluyor olması aynı şekilde zeminin özelliklerinde farklılıklar meydana getiren yüzey gerilimi ile belirlenmektedir. Zemin- su değişimi ve zemin davranışının iyice anlaşılabilmesi için fiziksel durumdan değişken duruma geçişin değişmesi gerekmektedir. Doymun ve doymamış durumdaki zeminin dönüşüm ve taşıma safhaları, zemin özelliklerindeki farklılaşmaya dayanmaktadır. Zehirlerin zeminde dönüşümü ve taşınması aslında fiziko-madde bileşenlerinin özel olması, yayılması ve biyo-değişiminden meydana gelmektedir.

4.3. Zemindeki Motor Yağının Çevresel Etkileri

Bir yılda milyonlarca ton atık motor yağı çevreye yayılmaktadır. Bunun yanında neredeyse bir o kadar da motorların çalışması sırasında çevreye atık motor yağları dağılmaktadır. Çevreye saçılan milyonlarca atık motor yağının yanında çok az bir kısmı yeniden rafine edilmektedir.

Atık motor yağında Pb, Zn, Cu, Cr, Ni gibi ağır metallerin yüksek oranda bulunması sebebiyle oldukça tehlikeli bir kirleticidir. Bu ağır metaller, çevreye bakteriler aracılığıyla çabuk bir şekilde mobilize edilebilmektedir. Kanserojen ve zehirli olan polisiklik aromatik hidrokarbonların (PAH) motor çalıştıkça motor yağında biriktiği bilinmektedir. Ayrıca atık motor yağındaki birikmiş PAH oranı, yeni motor yağına oranla 650-700 kat arasındadır.

Atık motor yağlarının zeminlere dökülmesi, mikrobiyal olarak büyük değişikliklere sebep olabilmektedir ve bununla birlikte zemini biyolojik olarak etkileyebilmektedir. Bunun neticesinde topraktaki bitkisel hayatı da etkileyeceğinden bitkilerin gelişimini ciddi oranlarda azaltıp, yaşamlarını bitirmektedir. Hayatta kalanlar içinse metal içeriklerinde ciddi artışlar görülmektedir. Sulu ortamlarda da atık motor yağı mikrobiyal değişikliklere sebep olmaktadır ve birincil fitoplankton üretimini azaltmaktadır. Sulara dökülen atık motor yağları ile sudaki yaşam da ciddi etkilenmektedir. Özellikle kabuklu balıklarda büyük hasarlar meydana gelmekte ve devamında mutajenik etkenlerin başında gelmektedir. Atık motor yağının yakıldığı durumlarda ise çok fazla ağır metal emisyonu üretir ki bu emisyon parçacıkları ve kalıntılar diğer çevresel parçacıklarla karşılaştırıldığında en tehlikeli ve zehirli olanlar arasında gösterilir.

Atık motor yağı bakterilere karşı mutajenik etki gösterirken yeni motor yağında bu mutajenik etki görülmemektedir. Bu da motorun çalışması esnasında yağın ağır metaller ile kirlenmesi ile açıklanmaktadır. Önceden de anlatıldığı gibi aslında PAH içeriğinin artmasına bağlıdır. Kuş yumurtaları için embriyotoksik olan bu durum insanlarda ise solunum, aspirasyon, yutma veya cilt teması yoluyla insanlarda lipid pnömonisi, akciğerde lipid granülomu, egzamatöz dermatit, kontakt dermatit, folikülit, yağ aknesi, lipid granülomu ve melanozise neden olabilir [43].

Kullanılmış motor yağının çevresel biyolojik bozunması, bir yıllık uygulamadan sonra toprakta sadece %24- %82 veya dökülmeden 100 gün sonra göllerde %20'dir [43].

4.4. Su Kirliliğinin Tanımı

Atık motor yağı sızıntıları, su kirliliğini doğrudan etkilemektedir. Genellikle denizlere ve nehirlere dökülen veya sızan atık motor yağlarının ciddi etkileri olmasıyla birlikte yağlar, suda çözünmemekte veya parçalanmamaktadırlar. Dolayısıyla suda kalın tabakalar oluşturmaktadır.

Son zamanlardaki en büyük çevre sorunlarından biri kuşkusuz su kirliliğidir. Su, hem doğal hem de yapay yollarla kirlenebilmektedir. Kirlenmiş suyun doğal yaşam, evsel, eğlence, içme, mesken, tarım gibi birçok alanda hayatı olumsuz etkilediği bilinmektedir. Kirliliğin başlıca nedenleri arasında ise kentleşme, sanayileşme, insan nüfusundaki artış olarak sıralanıp arttırılabilir. Suyun kirlenmesi insan yaşamını ve çevresini tehdit eder. Bundan dolayı hepsinin önlenmesi,

değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi için uygun olan çeşitli yolların düzgün bir şekilde kullanılıp uygulanması gerekmektedir.

Motor yağının sudaki zararı büyük ölçüde yoğunluğuna bağlıdır. Sudaki motor yağı oranı arttıkça sebep olacağı problemler de orana bağlı olarak artış gösterecektir. Yüksek oranlarda birçok canlı için zehirlidir.

4.5. Zemin Kirliliğinin İnsan Sağlığı ve Tarım Üzerine Etkileri

Toprakların günümüzde insan sağlığını çeşitli yollarla etkilediği görülmektedir. Bunlar insanın beslenme alışkanlığında besinleri oluşturmak için temel takviyelerin sağlanması, su arıtma hizmetleri ve enfeksiyonu önleyen maddeler ve antibiyotikler gibi olumlu etkileri bünyesinde bulundurmaktadır. Her şekilde toprak içine tehlikeli ve zararlı maddelerin girmesi insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Toprak bozulması da zeminin insan sağlığına yardımcı olmasını azaltırken, bu durumu sona erdirmek veya tersine çevirmeye çalışmak ise yardım edebilmeyi arttırmaktadır. Ekolojik olarak bakıldığında sadece motor yağının değil, genel olarak incelendiğinde petrol kaynaklı sızıntıların ve buna bağlı olarak kirlenmelerin toprak ve su üzerinde ciddi etkileri olduğuna dair yeterince kanıt vardır. Petrol bazlı kirlenmelere maruz kalmanın hafif ve ağır etkileri olup, bu etkilerin olumsuz olaylara neden olduğu birçok kaynak tarafından giderek artmaktadır.

4.5.1. Zemin Kirliliğinin İnsan Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Kirlilik, hiç şüphesiz tüm dünyanın istenmeyen bir olgusu haline gelmiştir. Sanayi devrimiyle başlayan çevre kirliliği bugün de olduğu gibi devam etmektedir hatta geçmişle kıyaslandığında daha kötü sonuçlara doğru ilerlemektedir. Kıymetli doğamıza ve çevremize meydana gelebilecek hasarların kirlilik sebebiyle olması endişe verici bir durum olup kesinlikle göz ardı edilmemelidir. Çevre kirliliği havayı, suyu ve toprağı olumsuz etkiler. Buna bağlı olarak insanları, su yaşamını, ekosistemin yaşam kalitesini düşürüp yaşamın son bulmasına kadar sonuçlanabilir. Çevre kirliliklerinin yolları da toprak/tortu, su ve havadır. Çoğu çevre kirliliği başlangıçta gizli bir şekilde ilerlemektedir. Kirliliğin etkisi artıp süresi de uzadıkça meydana daha ağır sonuçlar getirmektedir. Kirliliklerin iki ana kaynağı, doğa (biyogenik) ve insandır (antropojenik).

Farklı konular için çeşitli kirlilik tanımlamaları vardır. Toksikleşme, insan sağlığına bir şekilde zarar verecek zararlı kimyasalların, vücut atıklarının ve diğer kirleticilerin atılmasıdır. Havayı, suyu ve toprağı kirletmek insanların suyu kullanmasını, toprağı ekin yapmasını zorlaştırırken bu kimyasalları soluması da ayrıca etkilemektedir. Mikroorganizmalar, insan-atık,

su-atık, kimyasal toprağı, havayı ve suyu kirleten toksik maddeler arasındadır. Kirlilik ayrıca insan faaliyetlerinden ve yüzey nesnelerinden kaynaklandığı gibi tarım ürünlerinden ve ev ürünlerinden de kaynaklanabilir. Birçok yazar, kirliliğı insan sağlığına ve ekolojik düzene zarar verebilecek süreçlere müdahale edebilecek ve canlı varlıklara zarar verebilecek maddeler olarak tanımlamaktadır [44].

Kirleticiler, insanlara ve çevreye direkt zarar vermeyen ve insansal faaliyetlerin sebep olduğu yerlerde bulunan parçacıklardır. Bunların zararı önceden de değinildiğı gibi uzun vadeli. Uzun vadeli görünme sebebi ise insanların, kirleticileri arka planda kaldıkları için görmezden gelip tehlikeli olarak değerlendirmemeleridir fakat düşülen en büyük yanılgı da budur. Zararsız gibi görünseler bile, bu kirleticiler çevreye yavaşça zarar verir ve insanların yanı sıra canlı varlıkları öldüren bir kaynak olmaktadır. Kirleticiler, birincil safsızlıklar veya ikincil toksinler olarak ayrılabilir. Her ikisi de insanlara ve çevreye oldukça zararlıdır. Birincil kirleticiler insanlar, bitkiler ve çevre için çok ciddi iken ikincil kirleticiler ise çevre, hayvanlar ve insanlar üzerindeki etkileri birinciye kıyasla daha hafiftir. İkincil kirleticiler kanser, mide ülseri gibi hastalıkların kaynağıdır.

Uçucu Organik Bileşikler (VOC), ciddi sağlık tehlikelerine sebep olan kirleticilerdir. VOC' lar, doğal ve beşeri yaşamlara ve çevrelerine büyük zararlar verir. Organik bileşikler toprağı sızarak bitkilerin ve diğer tarımsal ürünlerin büyümesini engeller. Buna bağılı olarak ülkelerde açlığa ve kıtlığa neden olarak hayvanların, bitkilerin ve insanların ölümüne kadar varabilen kötü sonuçlara neden olabilirler. VOC' lar az bulunurlar ancak oldukça tehlikelidirler. Havada, suda ve toprakta olduğu kadar tarımsal, kentsel ve endüstriyel alanlarda da bulunan, ayrıca katı, sıvı ve gaz formlarda bulunan temel bir çevresel kirletici grubudur. Bu kirletici gruba insan için kısa ve uzun süreli etkileri ile uzun süre sonunda meydana gelebilecek durumlar aşağıda verilmiştir. İnsan üzerindeki kısa süreli etkileri şunlardır:

- Akciğer ve deri tümörleri
- Alerjiler ve bağışıklık hastalıkları
- Baş ağrısı, baş dönmesi, yorgunluk ve mide bulantısı
- Boğaz iltihabı
- Göğüs ağrısı ve tıkanıklığı
- Hemolitik anemi
- Kırmızı kan hücreleri üreten enzimleri
- Petrol sızıntılarından kaynaklanan göz ve cilt tahrişi, döküntüleri etkiler.

Uzun vadeli maruz kalmada ise meydana gelebilecek durumlar şunlardır:

- Astım

- Böbrek ve karaciğer hasarı
- Kanser
- Periferik nöropati (ayaklarda ve bacaklarda uyuşma)

Uzun süreli maruz kalma, sonunda

- Artan ölüm oranları
- Beyin ve sinir sistemi zararı
- Fetal hasar ve doğurganlığın azalması

4.5.2. Zemin Kirliliğinin Tarım Üzerindeki Etkileri

Son yıllarda, petrol ve petrol ürünlerinin kullanımı zirveye ulaşmıştır. Petrol ve petrol kökenli malzemeler toprakta ciddi hasarlar yaratmaktadır. Petrol kuyusu döküntüleri, boru hattı ve depolama tankı sızıntıları, buhar emisyonları, gaz alevlenmeleri, atık su ile petrol ve türevlerinin kirliliği çevre sağlığını olumsuz etkilemekte ve tarımsal sıkıntılara yol açmaktadır. Bu durum ise böyle malzemelerin düşük biyolojik organik bileşik karışımlarının genellikle olası karsinojenik ve mutajenik olmasından dolayı meydana gelmektedir. Biyolojik parçalanmaya ve ayrışmaya dayanıklı petrol ve petrol kökenli hidrokarbonların zeminde birikme göstermesi, enzimlerin davranışı ve mikroorganizma varlığı gibi farklı parametrelerin değişmesine vesile olmaktadır. Ham petrol ve türevlerinin çevreye salınması tarım arazileri için bir tehdittir. Petrol hidrokarbonları toprağı sterilize eder ve değişen zamanlarda mahsulün büyümesini ve verimini engeller. Örneğin Nijerya'da 1978- 1979 yılları arasında kuru arazide meydana gelen petrol sızıntılarının kayda değer bir yüzdesi manyok, mısır, muz, pirinç ve tatlı patates gibi mahsullerin ekildiği çiftlikleri etkilemiştir [45]. Petrolün bazı bitkilerin çimlenmesi ve büyümesi üzerine etkileri rapor edilmiştir [46]. Bir petrol döküntüsünden sonra toprak verimliliğinin geri kazanılması, dökülen miktar dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır [47]. Daha önce petrole kirlenmiş tarım arazilerinin verimliliğinin geri kazandırılması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca Brady ve Weil'in yaptıkları çalışmada bu kirleticilerden kaynaklanan ölümlerin, trafik kazalarından kaynaklanan ölümlerin sayısına eşit veya daha fazla olduğunu bildirmiştir [48].

4.6. Motor Yağının Tanımı

Motor yağı, içten yanmalı motorların yağlanması için kullanılan farklı maddelerden birine verilen isimdir. Çeşitli katkı maddeleri içermektedir ki bunlar özellikle aşınma önleyici katkı maddeleri, dağıtıcılar ve çok dereceli yağlar için viskozite indeksi geliştiricileri ile geliştirilmiş baz yağlardan oluşmaktadır.

Motor yağları, katkı maddelerinin daha iyi çözünmesi için petrol bazlı hidrokarbonlar, polialfaolefinler (PAO) veya bunların farklı oranlardaki karışımlardan oluşan baz yağlar ile ağırlıkça %20' ye kadar esterler harmanlanarak meydana gelmektedir.

Birçok motor yağı, bazı özellikleri iyileştirmek için katkı maddeleri içeren petrol hidrokarbonlarından yapılmaktadır. Bilinen bir motor yağının kayda değer bir kısmı (18-34 arası) karbon atomuna sahip hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Ayrıca motor yağının hareket eden parçalar arasındaki yağlayıcı film oluşturmak için dikkate alınan en önemli özelliklerinin başında viskozitesi gelmektedir. Viskozite indeksi, sıcaklığın değişmesiyle yağdaki viskozitenin değişme ölçüsünü veren bir parametredir.

Tez çalışmasında kullanılacak olan atık motor yağı ise oldukça tehlikeli bir üründür. Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve yüksek düzeyde ağır metalleri bünyesinde bulundurmaktadır. Benzo[a]piren gibi PAH, yüksek kanserojen özellikleri ile bilinmektedir. Pb, Zn, Cu, Cr, Ni ve Cd gibi ciddi miktarlarda ağır metaller yağda bulunmaktadır ve bu ağır metaller oldukça zehirli olup Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından da insan sağlığını etkileyen metaller arasında gösterilmektedir. Şekil 4.1' de ise petrol türevlerinden dolayı kirlenmiş zemin örneği verilmiştir.

Motor yağı ve diğer tüm petrol ürünlerinde olduğu gibi kimyasal bileşimleri ham petrol kaynağına rafine etme işlemine ve mevcut katkı maddelerine göre değişiklik göstermektedir. Bu tür yağların üretim süreci, PAH gibi istenmeyen bileşikler ortadan kaldırmak için ciddi ölçüde değişiklik göstermiştir. Dolayısıyla sanayileşmiş ülkelerde üretilen yağın 2/3' si solventle rafine edilmektedir. Alifatik bileşikler genellikle yağın ağırlıkça %73- %80' ini temsil etmektedir. Bu fraksiyon bir halkalı alkanlar ve sikloalkanlardan oluşmaktadır. Monoaromatik hidrokarbonlar ağırlığın %11- %15' ini, diaromatik hidrokarbonlar %2-%5' ini ve poliaromatik hidrokarbonlar ve polar fraksiyonları ise %4- %8' ini oluşturmaktadır [43]. Öyle durumlar da olmaktadır ki yağ çok iyi rafine edilmediğinde aromatik bileşikler yağın neredeyse yarısını ½ oranında temsil edebilmektedir. Aromatik hidrokarbonlar 15 aromatik halkalı bileşiklerden oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Kirlenmiş zemin örneği [49]

4.6.1. Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)

Organik bileşiklerin eksik yanması neticesinde meydana gelen zehirli ve kanserojen etkileri olan organik bileşiklere polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) denilmektedir. İki veya daha fazla benzen halkasına sahip organik bileşikler olup aynı zamanda hidrofobik karaktere sahiptirler. Doğal şekilde oluşan bu bileşikler orman yangınları ya da volkanik patlamalarla meydana gelmektedirler. Beşerî yollarla oluşumu ise endüstriyel kaynaklar, motorlu taşıtlar ve sigara tüketimi ile olmaktadır. Beşerî yollardaki sigara tüketimi hem miktar olarak hem de gezegene zarar açısından diğerlerine kıyasla daha az etkiliyor olsa da insan sağlığı açısından en etkili olanıdır. PAH özellikleri arasında sayılan hidrofobiklikten dolayı suda çözünmeleri zordur. PAH sınıflandırması ise yapısındaki benzen halkasına göre belirlenmektedir. Dörtten az benzen halkası bulunuyorsa hafif PAH, dörtten fazla benzen halkası olması durumunda ise ağır PAH olarak sınıflandırılmaktadır. PAH' ların molekül ağırlıkları arttıkça sudaki çözünürlükleri azalırken kanserojen ve zehir özellikleri artmaktadır [50]. Doğada 100'ün üzerinde tespit edilen bu hidrokarbonların özellikle 16 PAH bileşiği ayrı tutulmaktadır. Çünkü bu kirleticilerin kanserojen ve zehir etkilerinin diğerlerine oranla daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Öncelikli kirletici olarak gösterilen 16 PAH şunlardır:

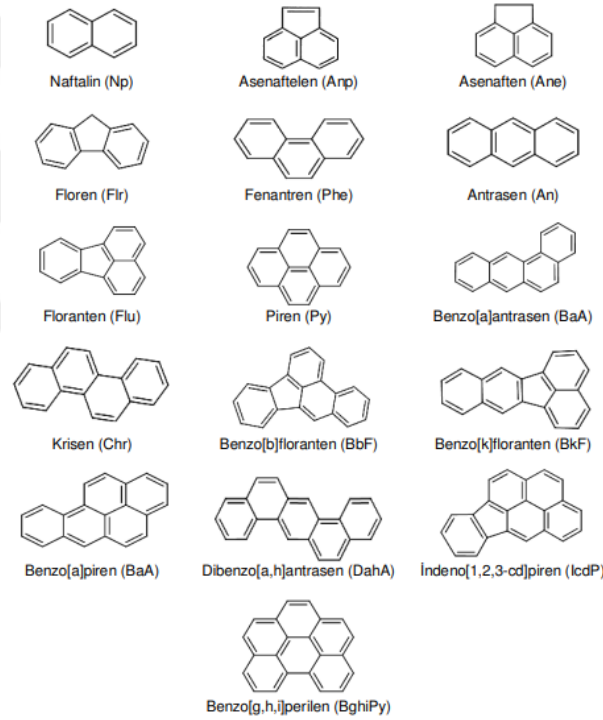
1. Antrasen (An)
2. Asenaften (Ane)
3. Asenaftelen (Anp)
4. Benzo[a]antrasen (BaA)
5. Benzo[a]piren (BaP)
6. Benzo[b]floranten (BbF)
7. Benzo[g,h,i]perilen (BgHiPy)
8. Benzo[k]floranten (BkF)
9. Dibenzo[a,h]antrasen (DahA)
10. Fenantren (Phe)

11. Floranten (Flu)
12. Floren (Flr)
13. İndeno[1,2,3-cd]piren(IcdP)
14. Krisen (Chr)
15. Naftalin (Np)
16. Piren (Py)'dir.

Bu 16 PAH' ın ayrı tutulma sebepleri şunlardır:

- Diğer PAH bileşiklerinden daha çok bilgiye sahip olunması
- Bu sıralananların diğerlerine göre daha tehlikeli olunduğunun düşünmesi
- Bahsedilen bileşiklere daha çok maruz kalınma ihtimali

Ayrı tutulan 16 PAH molekül yapıları Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Bazı polisiklik aromatik hidrokarbon bileşiklerinin molekül yapısı [51]

4.7. Uçucu Kül Tanımı

Yanmış yakıtın ince parçacıklarından oluşan kömür yanma ürünlerine uçucu kül, baca külü veya kömür külü denir. Yakılan kömürün kaynağına ve bileşimine göre uçucu küllerde ciddi değişiklikler görülmektedir, ancak genel olarak bakıldığında uçucu küllerde silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) bulunmaktadır. Genellikle küre şeklinde olan uçucu küllerin boyutları 0,5- 300 μm arasında değişkenlik göstermektedir. Modern kömürle çalışan enerji santrallerinde genellikle elektrostatik çöktürücüler ile tutulur.

Uçucu küllerin bünyesinde motor yağında olduğu gibi insan sağlığına ve çevreye oldukça zararlı etkiler bırakan ağır metaller bulunmaktadır. Bunlar:

- Arsenik (As)
- Bakır (Cu)
- Baryum (Ba)
- Berilyum (Be)
- Cıva (Hg)
- Çinko (Zn)
- Kadmiyum (Cd)
- Krom (Cr)
- Kurşun (Pb)
- Molibden (Mo)
- Nikel (Ni)
- Radyum (Ra)
- Selenyum (Se)
- Toryum (Th)
- Uranyum (U)
- Vanadyumdur (V).

ASTM C618 tarafından uçucu küller iki sınıfa ayrılmıştır. Bunlar:

1. F sınıfı
2. C sınıfı şeklindedir.

Bu iki sınıf arasındaki en belirgin fark ise içerikleridir. Uçucu küllerdeki kalsiyum, silika, alümina ve demir içeriğine göre sınıflar ayrılmaktadır. Uçucu külün kimyasal özellikleri genellikle yakılan kömürün kimyasal içeriğinden etkilenmektedir [52].

F Sınıfı Uçucu Kül

Antrasit, bitümlü ve daha sert kömürün yakılması sonucu üretilen uçucu kül F sınıfı olarak ayrılmaktadır. Puzolanik bir malzeme olup %7' den az kireç (CaO) içermektedir. İşleme başlaması için suyla karıştırılmış Portland çimentosu, sönmüş/sönmemiş kireç gibi çimentolama malzemeleri gerekmektedir.

C Sınıfı Uçucu Kül

Alt bitümlü ya da genç linyit kömürün yakılması sonucu üretilen uçucu kül C sınıfı olarak adlandırılmaktadır. F sınıfı gibi puzolanik özelliklere sahip olsa bile F sınıfından farklı olarak

kendini çimentolayabilme özelliklerine sahiptir ki bu sayede aktivatör gerektirmemektedir. Su ile temas ettiğinde sertleşen uçucu kül, aynı zamanda zamana bağlı olarak mukavemet artışı gösterir. C sınıfı, F sınıfından ayıran bir diğer özellik ise %20' den fazla kireç (CaO) içermesidir.

4.8. Nanopartikül Tanımı

Nanoteknoloji düşüncesi ilk kez 1959' da Richard Feynman tarafından “Aşağıda bir sürü yer var” sözüyle ortaya atılmıştır [53]. Ardından nanoteknoloji tüm bilim dalları için gelişim göstermiştir. Nanoteknolojinin çeşitli tanımları vardır, fakat Amerika Birleşik Devletleri'ndeki nanoteknolojinin ulusal öncüleri detaylı bir tanım sunmuşlardır [54]:

- Yaklaşık 1-100 nanometrelik uzunluk ölçeğinde atomik, moleküler ya da makromoleküler düzeyde araştırma ve teknoloji geliştirme,
- Atomlar ve moleküller seviyesinde, küçük ve/veya orta büyüklükte olmalarından dolayı yeni fonksiyonlara ve özelliklere sahip yapıların, cihazların ve sistemlerin oluşturulup kullanılması,
- Nano ölçekte malzemelerin kullanılması, enerjinin doğru kullanımı, maliyet ve zaman gibi önemli değerlendirmelerin insan hayatındaki yeri ve artan ürün kalitesi ile hayat kalitesinin artmasıdır.

Bu alanda, uzmanların görüşlerinin ötesinde nanoteknolojinin özel bilgilerine daha çok ihtiyaç duyulmaktadır ve nanoteknolojinin detaylı gereksinimleri öğrenilmelidir. Geoteknikteki farklı ve değişik konular, araştırmacıların ve mühendislerin zemine makroskobik açıdan bakmaları nedeniyle bu teknoloji, geoteknik mühendisliğinde daha az çalışmaya neden olmuştur. Bu az çalışmaya rağmen bu kadar sık ve eskiden beri kullanılan alan da geotekniktir. Çünkü zemin ve kaya minerallerinin çoğu nanomalzemedir ve kimyasal aktiviteleri nano ölçekte meydana gelmektedir. Bunlar ele alındığında enjeksiyon, sızma, zeminlerin iyileştirilmesi gibi uygulamaların ciddi potansiyeli vardır.

Zeminin bazı maddeler ile karıştırılması zemin için olumlu gelişmeler göstermektedir. Nanoteknolojinin geoteknik mühendisliğindeki öncelikli stratejisi zemin parametrelerini iyileştirmektir. Nano malzemelerin yüksek ve özel yüzey alanları, morfolojik özellikleri gibi durumları ile az miktarda nano malzemenin kullanılması bile zeminin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini ciddi ölçüde etkilemektedir. Nanopartiküllerin zeminle karıştırılması ile elde edilen sonuçlar Literatür Taramaları bölümünde Nanopartikül başlığı altında detaylıca diğer çalışmalar ile anlatılıp, son olarak özetlenmiştir.

4.9. Petrol ve Petrol Türevleri ile Kirilenmiş Zeminin İyileştirilmesi

Petrol ve petrol türevlerinin sebep olduğu kirlilikler küresel bir sorun olmaktadır. Havaya, suya ve toprağa farklı zararları dokunan bu kirliliğin giderilmesi ve/veya iyileştirilmesi oldukça önemlidir. Bunun için de hem fizikokimyasal hem de biyoremediasyon yolları üstünde durulup anlatılacaktır.

4.9.1. Fizikokimyasal Yöntem ile İyileştirme

Toprak temizliğini gerçekleştirmek için kullanılabilecek birçok fiziksel ve kimyasal yol mevcuttur. Yakma, kimyasal bileşiklerin ve dağıtıcıların kullanılması, fiziksel olarak uzaklaştırılması ve depolama süreçlerinin gerçekleştirilmesi bu yolları içermektedir fakat bu prosedürlerin gerçekleştirilmesi genellikle maliyetli olmasının yanında yoğun emek ve zaman gerektirdiği gibi çevre dostu da değildir. Kimyasal bileşiklerin ve dağıtıcıların kullanımının zararlı kimyasal maddeler ilave ederek çevreyi kirlettiği görüşü desteklenmektedir. Benzer biçimde, çevreyi manuel olarak temizlemenin fiziksel bir yöntemi olarak yakma, organik molekülleri ayrıştırmak ve yeniden birleştirmek için çok yüksek sıcaklıkların kullanılmasını içerdiğinden, çevrenin polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) seviyelerini artırır. Yakma, PAH' ların çevredeki seviyesini arttırmasına rağmen rafinerilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Hu vd. (2013) yaptıkları çalışmaya göre, 1200 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıkların yağ çamurunu tamamen yaktığını göstermiştir [55]. Dolayısıyla bu yöntem özellikle geniş ölçekte temizlik yapılma durumunda etkilidir.

Bazı araştırmacılar başarılı ve istikrarlı yanma sürecini incelemiştir. Örneğin Liu vd. (2009), kömür-su ve petrol-kok çamuru gibi ek yakıt kaynaklarının kullanılması gereğini vurgulamaktadır [56]. Ayrıca yardımcı yakıtların kullanılmasının temizleme performansını %90'dan fazla artırdığını da ortaya koymuşlardır. Sankaran vd., (1998), yüksek viskoziteli ve yüksek su içeriğine sahip yağ çamurunun performansının yakma aşamasına geçmeden önce ön arıtma işleminden geçirilmesi gerektiğine inanmaktadır [57]. Couto vd. (2010) ile Das vd. (2011), yüksek maliyetli fiziksel ve kimyasal temizleme metotlarının ciddi dezavantajlarını ve bu prosedürleri desteklemek için detaylı ve kapsamlı cihazlara ihtiyaç duyulduğunu açıklamışlardır [58], [59]. Ek olarak, katalizörler veya oksidanlar gibi kimyasalların ilave edilmesinden kaynaklanan endişeler vardır ki bunlar ekosistem için başka sorunlar oluşturabilmektedir. Calvert ve Suib (2007), fiziksel ve kimyasal temizleme süreçlerinin kullanılması fikrine karşı çıkmaktadır [60]. Çünkü bu yöntemler kirleticilerin hepsini ortadan kaldıramadıkları için kayda değer çözümler ortaya koyamamaktadır.

4.9.2. Biyoremediasyon Yöntemleri ile İyileştirme

Biyoremediasyon, soğuk bölgelerde petrol veya petrol ürünleriyle kirlenmiş zeminlerin iyileştirilmesi için kullanılan yollardan biridir. Etkili bir biyoremediasyon stratejisi, kirlenmiş alanlara fizikokimyasal parametrelerin değiştirilmesiyle, güçlü soğuğa uyum sağlayan mikroorganizmanın ortama ilave edilmesidir. Bununla birlikte, bu yaklaşım, mezofilik mikroorganizmaların kullanımı ile karşılaştırıldığında daha başlangıç aşamasındadır. Soğuk bölgelerde kullanılan mevcut biyoremediasyon uygulamaları, güçlü yağ bozucuların eksikliği, hidrokarbonların zayıf biyoyararlanımı ve düşük sıcaklık, oksijen ve besin seviyesi gibi çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Soğuk ortamlarda başarılı biyoremediasyon için bu yönleri anlamak ve doğru yorumlamak oldukça önemlidir. Yerinde biyoremediasyon ve yerinde olmayan biyoremediasyon şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Yerinde biyoremediasyon yöntemleri Natural Attenuation, Bioventing, Biosparging ve Phytoremediation şeklinde ayrılırken, yerinde olmayan biyoremediasyon yöntemleri ise Biopile, Bioreactor, Composting ve Landfarming olarak sınıflandırılmıştır.

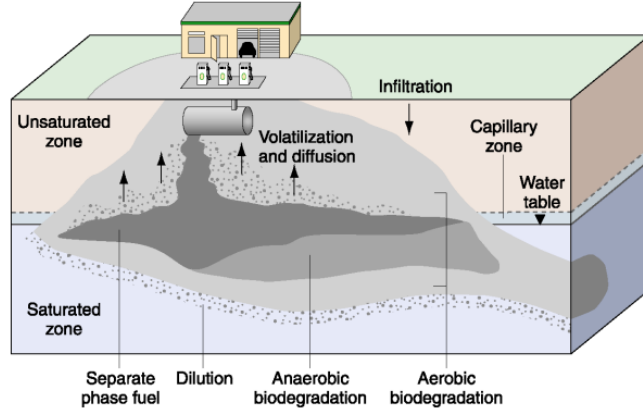
Yerinde Biyoremediasyon

Kirlenmiş zeminin kazı ve nakliye olmaksızın kirlenme alanından alındığı tekniğe yerinde biyoremediasyon denir ve bu teknik doğal biyojeokimyasal bir süreç olarak da kabul edilmektedir. Natural Attenuation, Bioventing, Biosparging ve Phytoremediation gibi çeşitli biyoremediasyon yöntemleri vardır. Yerinde biyoremediasyon arıtma yöntemleri kirleticilerin zeminde yayılmasının önüne geçmeye çalışır fakat yetersiz havalandırma, beslenme yetersizliği ve mikroorganizmaların kirleticileri ayrıştırma sırasındaki başarısızlığı yerinde biyoremediasyon yönteminin getirilerini kısıtlayabilir. Bu yöntem uygun maliyetli görülmektedir, çünkü kazı ve nakliye gerektirmemektedir fakat bahsedilen olumsuz özelliklerin dikkate alınıp buna göre iyileştirilmelerin yapılması ise maliyeti arttırmaktadır. Yerinde biyoremediasyon tekniği, birçok ülkede farklı soğuk iklim bölgelerinde petrol ve petrol ürünlerinin kirlenmesini gidermek ve/veya iyileştirmek için düzenli ve düzgün bir şekilde kullanılmış olup örnek çalışmalar mevcuttur [61].

Natural Attenuation Yöntemi

Zemindeki kirleticileri azaltabilen ve doğal olarak meydana gelen olaylar dizisine verilen addır. Yerli mikroorganizmalar aracılığıyla bozunma, buharlaşma, dağılım, kimyasal dönüşüm, kirleticilerin stabilize edilmesi ve seyreltme yollarıyla kirliliği gideren bir yoldur. Ağır bir işlem olup soğuk iklim bölgelerinde uygun olmama ihtimali vardır. Arktik sıcaklıklarındaki yavaş zayıflama oranı, petrol ve türevlerinin hidrokarbonlarının uzun süre kalmasını sağlamaktadır. Hidrokarbonlar, Natural Attenuation yöntemiyle işlenmesine rağmen dökülme sonrası 50 yıldan

fazla soğuk zeminlerde kalabilmektedir [62]. Donmuş zeminde Total Petrol Hidrokarbonlarının (TPH) iyileştirilmesi için bu yöntem kullanılarak çalışmalar yapılmıştır [63, 64]. Şekil 4.3' te Natural Attenuation yönteminin uygulanışı gösterilmiştir.



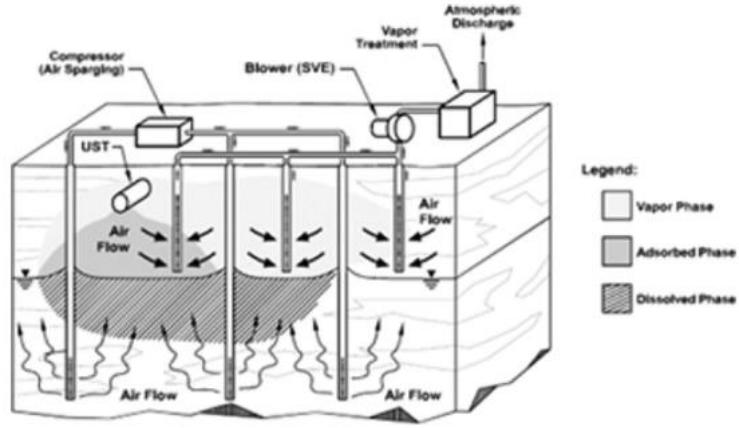
Şekil 4.3. Natural Attenuation yönteminin gösterimi [65]

Bioventing Yöntemi

Mikropların bozunma davranışlarını arttırmak için doymamış bir alanın kirli zeminine kontrollü hava akışı ile gerçekleştirilen yerinde biyoremediasyon yöntemine Bioventing adı verilmektedir. Mikrobiyal büyümeyi arttırmak için besinler ilave edilebilir. Düşük hava akış hızı, kirleticilerdeki azalmanın buharlaşma yerine mikrobiyal bozulmadan kaynaklandığını göstermektedir [66, 67].

Biosparging Yöntemi

Bioventing yöntemine benzer ve uçucu kirleticilerin doymuş bir bölgeden doymamış diğer bir alana doğru hareketine yardımcı olur [66]. Soğuk iklim bölgelerinde düşük sıcaklıklar sebebiyle bioventing ve biosparging yöntemlerinin uygulaması belirli şartlarda yapılabilir. Ek olarak, ısıtma ve yalıtım metotlarının uygulanması, bioventing ve biosparging yöntemlerinin getirilerini arttırabilir [68]. Şekil 4.4' te Biosparging yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Biosparging yönteminin gösterimi [69]

Phytoremediation Yöntemi

Zeminden ve sudan kirleticilerin biriktirilmesi, bozulması, buharlaştırılması, çıkarılması, filtrasyonu ve stabilizasyonu için bitkilerin gerektiği yüksek düzey teknoloji kullanan yöntem Phytoremediation denilmektedir. Bu yöntem aynı zamanda biyomadencilik metoduna yakın bir proses olan biyoakümülyasyon ile zehirli ağır metallerin uzaklaştırılmasında da kullanılabilir. Bitkilerden faydalanılan yöntemde doğal olarak soğuk iklim bölgeleri için kullanım söz konusu ise soğuğa karşı dayanıklı bitkilerin kullanımı gerekmektedir. Bu yöntemin uygulanmasına karar verilmeden önce bazı etkenler dikkate alınmalıdır. Kirleticilerin doğası, saha değerlendirilmesi ve uygun bitki seçimi phytoremediation için oldukça önemli etkenlerdir. Soğuk iklim bölgelerindeki kurulum ve bakım gereksinimlerinin çok düşük olması bu yöntemi faydalı kılabilir.

Yerinde Olmayan Biyoremediasyon

Başarılı arıtma için kirlenmiş toprakların güvenli ve güvenilir bir yere kazılması ve oraya taşınmasını sağlayan yöntemlere yerinde olmayan biyoremediasyon denir. Kirliliğinin ciddiyetine, durumuna, doğasına ve konumuna göre yerinde olmayan biyoremediasyon yöntemleri ayrılmaktadır. Yerinde olmayan biyoremediasyon, arıtılacak alanın uygun ve düzgün bir şekilde yönetilebildiği, yapılan işlemlerin kontrol altında olduğu bir iyileştirme yöntemidir. Soğuk iklim bölgelerindeki düşük sıcaklıklarda petrol ve/veya petrol ürünleriyle kirlenmiş toprakların yerinde olmayan biyoremediasyon yöntemleriyle başarılı bir şekilde uygulandığı ve güzel sonuçların alındığı çalışmalar bulunmaktadır [70, 71]. Yapılan işlemlerde kazı ve nakliye olduğundan bu işler için gerekli cihaz ve aletlerin temini iyileştirme yönteminin maliyetini arttırmaktadır. Bundan dolayı yerinde olmayan biyoremediasyonun en büyük dezavantajı olarak maliyet görülmektedir. Ek olarak, kazı ve nakliyenin yapıyor olması kirlenmiş toprağın ve buna bağlı olarak kirleticilerin

çevreye yayılması riskini de ortaya koymaktadır. Biopile, Composting, Landfarming ve Bioreactor yöntemleri vardır.

Biopile Yöntemi

Hafriyattan çıkarılan kirlenmiş zeminin havalandırma, sıcaklık- nem kontrolü ve besin değişiklikleri için arıtma bölgesinde yığıldığı yonteme Biopile denilmektedir. Bu yöntem soğuk iklim bölgelerindeki düşük sıcaklıklarda da alanların korunmasına katkı sağlayacak sıcaklık kontrollerinden oluşmaktadır. Bu sayede soğuk bölgelerin kirlenmiş zeminlerinde iyi sonuçlar alınmıştır. Gomez vd. (2013), Biopile yöntemini kullanarak 94 günde %82 toplam petrol hidrokarbon (TPH) bozulmasını bulmuştur [72]. Yapılan diğer çalışmalarda da Biopile yöntemi kullanılarak %70'in üzerinde TPH bozunma oranları bulunmuştur [30, 31].

Composting Yöntemi

Organik maddelerin humusa benzeyen ve zehirli olmayan maddelere dönüştürülmesiyle uygulanan yonteme Composting denilmektedir. Bu işlem sırasında meydana gelen yüksek sıcaklıklar, mikrobiyal katabolik faaliyetler aracılığıyla hidrokarbonların bozulmasını sağlar. Composting yöntemi, mikrobiyal davranışları idealize etmek için kendiliğinden oluşan yüksek sıcaklıkların getirdiği avantajdan yararlanır. Composting sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ile sıcaklık 60-70 ° C' ye kadar yükselir. Özel aletlerin kullanımı ile de soğuk iklim bölgelerinde bile yüksek sıcaklıklara erişilip bu sıcaklık korunabilir. Bu yöntem ile kirlenmiş zemin ve organik malzemeler karıştırılır. Ardından eldeki karışımlar yığınlar şeklinde yayılır. Dökme malzemeleri beslenme ve havalandırmaya da yardımcı olur.

Landfarming Yöntemi

Kirlenmiş zeminin bir yatakta toplanıp yayıldığı ve biyolojik arıtma için hazır hale getirildiği yonteme Landfarming denir. Düşük teknolojik alet gereksinimi, iş gücünün zahmetsiz oluşu ve düşük maliyetinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir biyoremediasyon yöntemidir. Bu yöntemde kirlenmiş zemin kazılıp, hazırlanmış bir yatağa yayılır ve peşi sıra periyodik olarak sürülür. Kurak zeminlerden soğuk zeminlere kadar farklı çevresel koşullarda uygulanan bir yöntemdir. Soğuk iklim bölgelerindeki stabil olmayan sıcaklık, donma- çözülme döngüleri, zemindeki nem ve kurumadan dolayı Landfarming uygulamasında aksaklıkların yanı sıra uygulamanın engellendiği bile görülmektedir. Bu yöntemde zeminlerin besin değişiklikleri, pH değerleri, hacim arttırıcı malzemelerin kullanımı ve periyodik toprak işleme planlarıyla programlanan soğuk bölgelerde etkilidir.

Bioreactor Yöntemi

Kontrollü biyolojik süreç hammaddelerinin ürünlere dönüştüğü yönteme Bioreactor denilmektedir. Bu yöntemde biyoremediasyonu gerçekleştirebilmek için reaktör gereklidir. Kazının yapıldığı kirlenmiş zemin ile su karıştırılıp bulamaç elde edilir. Bulamaç çalkalanarak reaktöre yerleştirilir ve sistemin farklı besleme ayarlarında çalışabilir. Bunlar:

- Toplu
- Yarı Sürekli
- Sürekli şeklindedir.

Kullanılan reaktörlerde fiziksel ve biyolojik parametreler kontrol edilebilmektedir. Bioreactor yöntemi soğuk iklim bölgelerinde umut verici sonuçlarıyla tercih edilebilir fakat iş gücü yüksek, zaman tasarrufu sağlamayan, pahalı, iyileştirme sonunda ve sonraki süreçlerde susuzlaştırma ve atık su arıtma gibi işlemleri ile ciddi dezavantajları bulunan bir tekniktir.

5. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında, atık motor yağı ile kirlenmiş kaolinin kilinin kirlenmiş haldeki fiziksel ve mühendislik özellikleriyle birlikte uçucu kül ve nanopartikül olarak nano-grafen ile iyileştirilmesi sonucundaki fiziksel ve mühendislik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla kullanılan kilin, uçucu külün ve nano-grafenin fiziksel özellikleri, atık motor yağının ise kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Kaolin kili, ağırlıkça %3, %5 ve %9 oranlarında atık motor yağı (AMY) ile karıştırılarak kirlenmiştir. Kirlenme süreleri için 1 ve 7 gün seçilip uygulanmıştır. Uçucu kül ile iyileştirmede kirlenmiş her oran için zeminin ağırlıkça %10, %25 ve %45 oranlarında ilave edilmiş olup nano-grafen ile iyileştirmede ise bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül %25 oranında sabit tutulup buna ek olarak %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen eklenmiştir. İyileştirmeler için de seçilen kür süresi 1 ve 7 gündür. Belirlenen oranlarda ve sürelerde hazırlanan numunelere tek eksenli basınç ve konsolidasyon testleri yürütülmüştür. Son olarak, yapılan deneyler sonucunda alınan numuneler mikroyapısal özelliklerin belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

5.1. Materyal

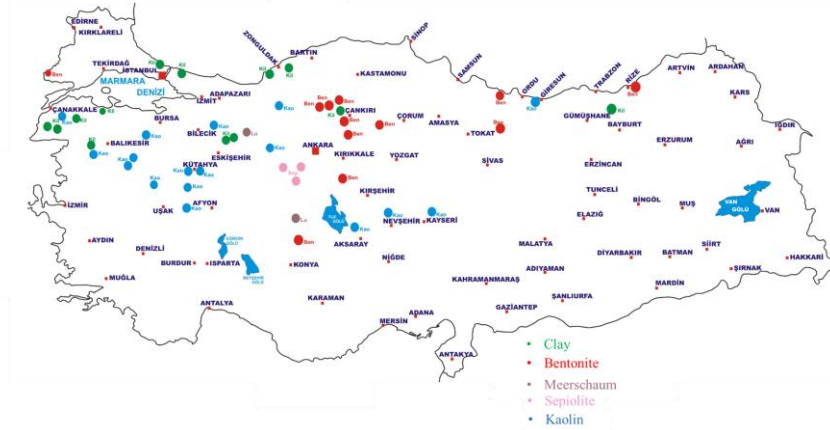
Laboratuvar ortamında yürütülen deneyler için malzemelerin temini, uygulanacak çalışmalar için ilk adımı oluşturmaktadır. Bu çalışmada kaolin kili Balıkesir yöresinden, atık motor yağı Elazığ Organize Sanayi Bölgesi'nden, uçucu kül Bursa'dan, nano-grafen ise ALGI LAB tarafından temin edilmiştir. Malzemeler Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarına getirilmiştir.

5.1.1. Zemin

Kaolin, granit veya volkanik kayaların kimyasal ayrışmasının bir sonucu olarak oluşur. İçlerindeki minerallere göre renkleri değişir, ancak doğada genellikle beyaz renkte bulunur. Kaolin killeri, Türkiye'de doğal olarak bulunan killerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır (Şekil 5.1). Bu çalışmada kullanılan kaolin kili, yüksek oranda feldspat minerali içeren, silis ve alüminyum tabakalarından oluşan bir kil türüdür [73]. Balıkesir yöresinden temin edilen bu kilin özellikleri Tablo 5.1. 'de verilmiştir

Tablo 5.1. Kaolin kilinin özellikleri

Dane Boyutu (μm)			Kimyasal İçerik				Nem	pH	Özgül Ağırlık, g/cm^3
D50	<10 μm	<2 μm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂			
1,3	97,1	60.8	%58,40	%37,74	%1,86	%0,63	% 0,37	6,83	2,65



Şekil 5.1. Türkiye kil yatakları haritası [74]

5.1.2. Motor Yağı

Bu tez çalışmasında kullanılan atık motor yağı Helix hx5 dizel 10w-30 olup Elâzığ Organize Sanayi Bölgesi'nden temin edilmiştir. Şekil 5.2' de gösterilen atık motor yağı (AMY) kirletici olarak seçilmiştir.



Şekil 5.2. Atık motor yağı (AMY)

Erzurum Atatürk Üniversitesi'nde Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi'nde (DAYTAM) ICP-MS analizi yapılmıştır. Şekil 5.3'te verilen ICP-MS analizi, katı ve sıvı örnekler için hassas, hızlı, ucuz ve doğruluğu yüksek oranlarda sağlayan ileri teknoloji analitik bir cihazdır. ICP-MS analizinin sonuçları Tablo 5.2' de verilmiştir.

Tablo 5.2. ICP-MS Analizi sonucu atık motor yağının sonuçları

Elementler	Al	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Sn	Hg	Pb
Değerler	13826,144	2320,268	119,664	1301,132	9700,507	949258,24	45,716	19730,723	<0,00	<0,00	1902,468



Şekil 5.3. ICP-MS Analiz Ekipmanları [75]

5.1.3. Uçucu Kül

Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, bu çalışmada kirlenmiş kaolini stabilize etmek için Bursa elektrik santralinden elde edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün kimyasal bileşikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Uçucu külün kimyasal içeriği

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
F sınıfı uçucu kül	48,53%	24,61%	7,59%	9,48%	2,28%



Şekil 5.4. F sınıfı uçucu kül

5.1.4. Nano-Grafen

Tez çalışmasında kullanılan nano-grafen (NG) ALGI LAB tarafından temin edilmiştir ve kirlenmiş kaolinin stabilizasyonu için kullanılmıştır. Grafenin tek başına bir bağlayıcılık özelliği olmadığından bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılmıştır. Şekil 5.5' te gösterilen nano-grafenin fiziksel özellikleri Tablo 5.4' te verilmiştir.

Tablo 5.4. Nano-grafenin özellikleri

	Safılık	Boyut	Yüzey Alanı	Çap
Nano-grafen	99,9%	3 nm	800 m ² /g	1,5 µm



Şekil 5.5. Nano-grafen (NG)

5.2. Metot

Çalışmanın temel amacı, F sınıfı uçucu kül ve uçucu külü bağlayıcı olarak kullanıp eklenen nano-grafenin atık motor yağı ile kirlenmiş kaolin kili üzerindeki fiziksel ve mekanik özelliklerinin stabilizasyon etkilerini belirlemektir. Numuneler kaolin içerisine ağırlıkça çeşitli oranlarda (%0, 3, 5 ve 9) atık motor yağı karıştırılarak kontamine edilmiştir. Kontamine kaolin çeşitli oranlarda (%0, 10, 25 ve 45) uçucu kül ve (%0,04, 0,08 ve 0,12) nano-grafen ilave edilerek stabilize edilmiştir. Nano-grafenin tek başına bir bağlayıcılık özelliği bulunmadığından uçucu kül ile birlikte kullanarak numunelere eklenmiştir. Uçucu kül ve nano-grafen ile stabilize edilmiş kirlenmiş kaolin numunelerinin mukavemet özelliklerini incelemek için serbest basınç testleri (UCS) ve konsolidasyon testleri uygulanmıştır. Kaolin numunelerinin kontaminasyon süreci ve stabilizasyon periyotları aşağıdaki metodoloji ile gerçekleştirilmiştir:

- (i) İstenilen kirlilik derecesini elde etmek için hesaplanan kirliliğin (atık motor yağı) ağırlık yüzdesi, her bir numune için belirlenen oranlarda (%0, %3, %5 ve %9) karıştırılmıştır.
- (ii) Kaolin-atık motor yağı karışımı elle toz haline getirilecek ve sızdırmaz bir tepside 1 saat boyunca iyice karıştırılmıştır.
- (iii) Atık motor yağının kaolin ile dengeye gelmesi için karışım belirli sürelerle kapalı bir kapta bekletilmiştir.
- (iv) Farklı kirlilik derecelerindeki kaolin-motor yağı karışımlarına Proktor testleri ile belirlenen optimum su oranlarına göre su ilave edilmiştir.
- (v) Kaolin-atık motor yağı karışımlarına belirli kirlilik dereceleri ve süreleri sonunda ağırlıkça belirtilen oranlarda kuru uçucu kül (%10, %25, %45) karıştırılmıştır.

(vi) Uçucu kül ilave edilmiş kontamine kaolinin Proktor testleri ile belirlenen optimum su içeriğine göre su ilave edilmiştir.

(vii) Karışımlar 24 saat plastik torbalarda kapatılarak elde edildi. Ardından, numune kalıplanmadan önce su içeriği tekrar kontrol edilmiştir.

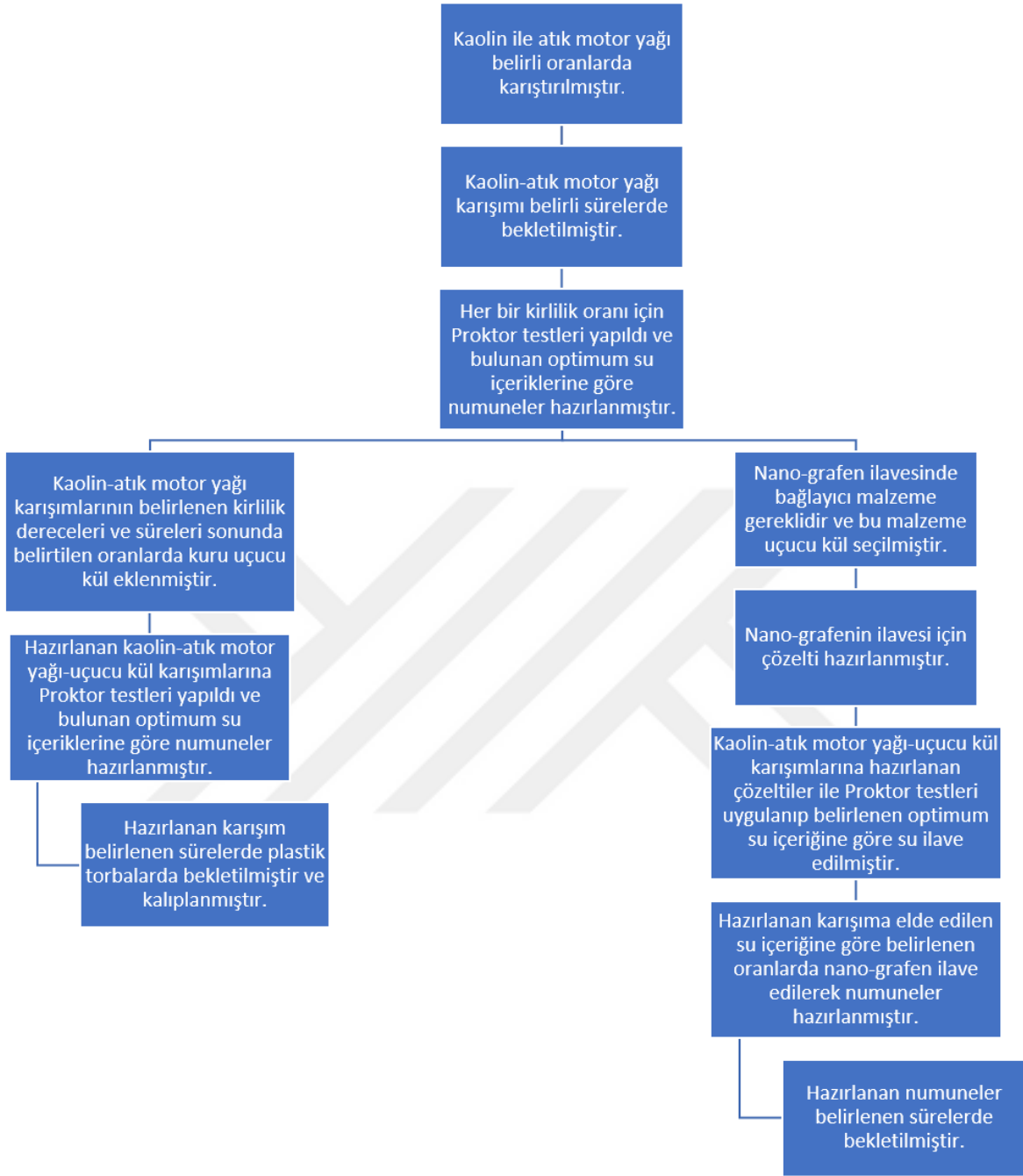
(viii) Nano-grafen eklenmesinde ise ilk beş madde aynı şekilde uygulanmıştır. %25 uçucu kül sabit olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır.

(ix) Nano-grafenin ilavesinde çözelti hazırlanmaktadır. Bu çözelti ihtiyaç kadar suya belirli oranlardaki nano-grafenin mikser yardımıyla 30-45 dakika karışmasıyla elde edilmektedir.

(x) Kaolin-atık motor yağı-uçucu kül karışımlarına hazırlanan çözeltiler ile Proktor testi uygulanıp belirlenen optimum su içeriğine göre su ilave edilmiştir.

(xi) Kaolin-atık motor yağı-uçucu kül karışımına elde edilen su içeriği ile belirlenen oranlarda nano-grafen ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır ve belirlenen sürelerde bekletilip ardından kalıplanmıştır.

Şekil 5.6’da bu çalışmanın deneysel programı şema olarak verilmiştir.



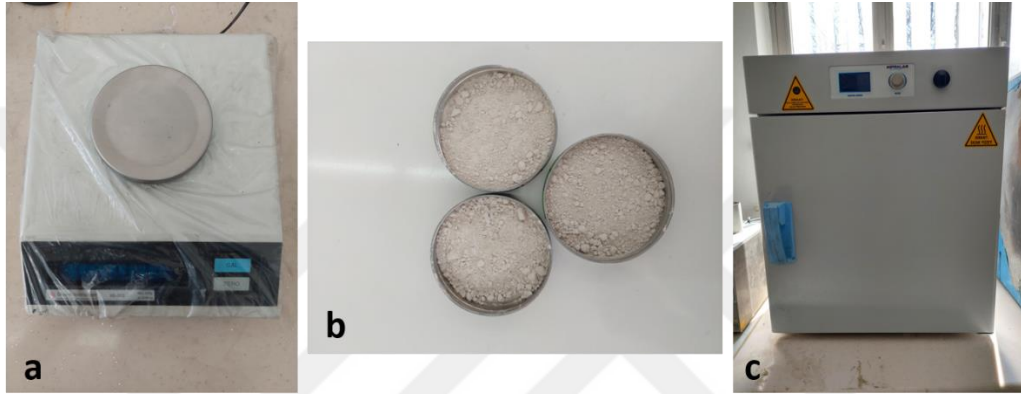
Şekil 5.6. Deneysel metodun şema gösterimi

5.2.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Bu bölümde, tezin deneysel çalışmaları için kullanılacak zeminin fiziksel özelliklerini belirleyen deneyler anlatılacaktır. Bu deneyler sırasıyla su muhtevasının tayini, zemin dane büyüklüğü deneyleri (elek analizi ve hidrometre), Atterberg limitleri, özgül ağırlık ve standart proktor deneyleridir.

Su Muhtevasının Tayini

Zeminin su muhtevasının tayini için ASTM D2216-19 esas alınmıştır [76]. Üç adet paslanmaz metal kap temizlendikten sonra 0,01 hassasiyete sahip tartıda boş bir şekilde tartılmıştır ve değer, kap notu ile kaydedilmiştir. Ardından zemin örnekleri boş kaplara doldurulmuştur ve tartılıp kap+yaş notuyla kaydedilmiştir. Bu işlemlerden sonra zemin dolu kaplar 24 saat boyunca 105 °C'lik etüve yerleştirilmiştir. Kaplar 24 saat sonunda etüvden çıkarılıp son olarak kap+kuru notuyla kaydedildikten sonra Denklem 5.1 kullanılarak zeminin su muhtevası tayin edilmiştir. Deneyde kullanılan malzemeler Şekil 5.7' de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. (a) Hassas terazi (b) Kaolin kili (c) Etüv

$$w(\%) = \frac{w_{yaş} - w_{kuru}}{w_{kuru} - w_{kap}} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada w = Su muhtevası (%), w_{kap} = kap ağırlığı, $w_{yaş}$ =yaş zemin + kap ağırlığı ve w_{kuru} = kuru zemin + kap ağırlığıdır.

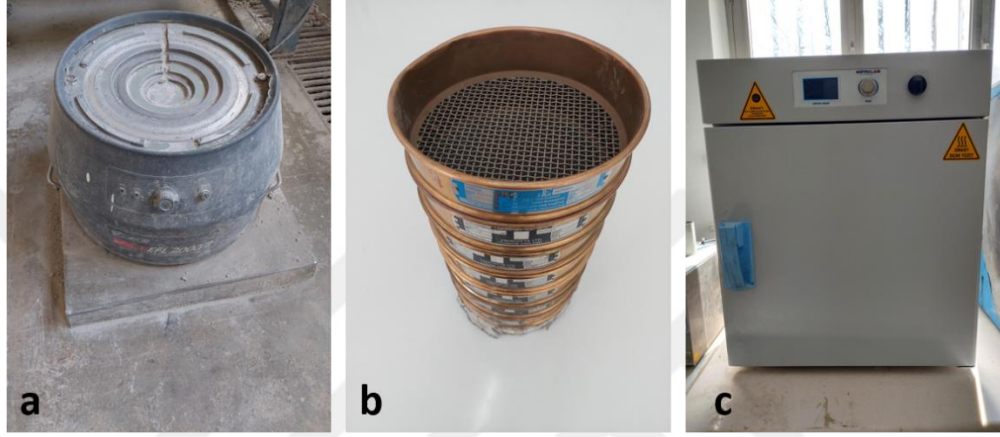
Elek Analizi ve Hidrometre

Zeminlerin sınıflandırılmasının yapılabilmesi için dane büyüklükleri ve zemin içerisindeki yüzdelere bilinmesi gereklidir. Bunun için uygulanan deney elek analizidir. Zeminler ince ve iri daneli olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İri daneli kısımlar çakıl ve kum olarak iki alt gruba ayrılırken bunları belirlemek için elek analizi yapılır. İnce daneli kısımlar ise silt ve kil olarak farklı bir alt gruba ayrılırlar ve bunları belirlemek için hidrometre deneyi yapılır. Bu tez çalışmasında hidrometre deneyi için ASTM D7928, elek analizi deneyi için de ASTM D6913 / D6913M-17 standartları dikkate alınarak uygulanmıştır [77, 78].

İlk olarak kuru zemin numunesi alınıp 200 nolu elekten geçirilmiştir. Bu esnada numuneler yıkanmıştır çünkü iri parçalara yapışmış ince danelerin ayrılması gereklidir. Ardından elek üstünde

kalan zemin etüvde 24 saat boyunca 105 °C’de kurutulmuştur ve elek analizine tabi tutulmuştur. Elek analizi için kullanılan malzemeler Şekil 5.8’de verilmiştir. 4, 10, 30, 40, 50, 100 ve 200 nolu elekler sırasıyla dizilmiştir ve sarsma tablası ile deney yürütülmüştür. Sarsma işlemi bittikten sonra her elek üstünde kalan zemin tartılmış ve not edilmiştir. Tüm eleklerden geçen yüzde (%P) Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%P = \frac{\text{Elekten geçen zeminin miktarı}}{\text{Elenen bütün zemin}} \times 100 \quad (5.2)$$

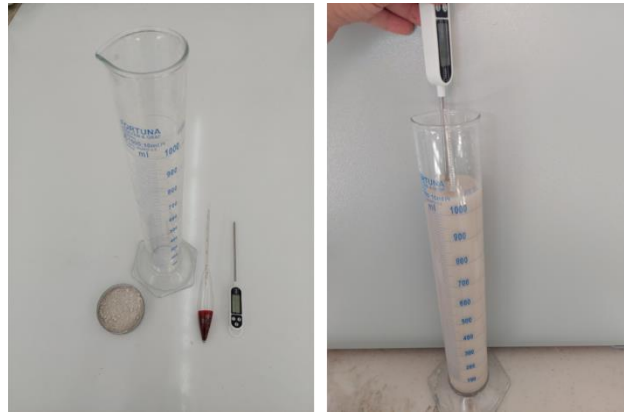


Şekil 5.8. (a) Sarsma tablası (b) Elekler (c) Etüv

Hidrometre deneyi 200 nolu elek altında kalan numunelerin geçen yüzdeleri belirlemek için yapılmaktadır. Şekil 5. 9’da gösterildiği gibi bu çalışmada uygulanan hidrometre deneyinde 151-H tipi hidrometre kullanılmıştır. Deneyin başlangıç özellikleri Tablo 5.5’te verilmiştir.

Tablo 5.5. Hidrometre deneyi başlangıç özellikleri

Özgül Ağırlık (g/cm ³):	2,65	Menisküs Düzeltmesi:	0,0005
Başlangıç kuru ağırlık (g):	50,00	200 Nolu elekten geçen yüzde (%):	88,9



Şekil 5.9. Hidrometre deney malzemeleri

Özgöl Ağırlık Deneyi

Bu tez çalışmasında ASTM D854-02 standardına göre piknometre deneyi uygulanarak numunelerin özgül ağırlıkları belirlenmiştir [79]. Yapılan dane boyutu belirleme testlerine göre zeminin ince daneli olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.10’ da görüldüğü gibi özgül ağırlık deneyinde 50-100 ml’lik piknometre şişeleri kullanılmıştır. Özgül ağırlık deneyi sadece saf kaoline değil, aynı zamanda kaolin+motor yağı ve kaolin+motor yağı+uçucu kül karışımlarına da uygulanmıştır. İlk olarak boş piknometre şişeleri hassas tartıda tartılmıştır. Ardından piknometre şişeleri damıtık suyla doldurulup, içindeki hava alınmıştır ve şişelerin dışı düzgünce kurutulduktan sonra tartılmıştır. Ağırlık w_1 olarak kaydedilmiş ve suyun sıcaklığı termometre ile ölçülüp kaydedilmiştir. Deneyin uygulanabilmesi için alınan 20 gr numuneler w_k olarak not edilmiştir ve piknometrenin içine kayıpsız bir şekilde dökülüp üzerine damıtık su eklenmiştir. Piknometredeki hava, cam desikatöre yerleştirilip alınmıştır. 45 dakika boyunca havası alınan piknometre içindeki zemin+su karışımlarına kayıp verilmeyecek şekilde tekrar su eklenmiştir ve kapağı kapatılarak yeniden tartılmıştır. Elde edilen değer w_2 olarak kaydedilmiştir. Devamında termometre ile bu sefer zemin+su sıcaklığı ölçülüp deney tamamlanmıştır. Her numuneden üç kez yapılarak aritmetik ortalaması alınarak özgül ağırlıkları hesaplanan zeminlerin hesabı Denklem 5.3’te, deney fotoğrafları ise Şekil 5.10’da verilmiştir.

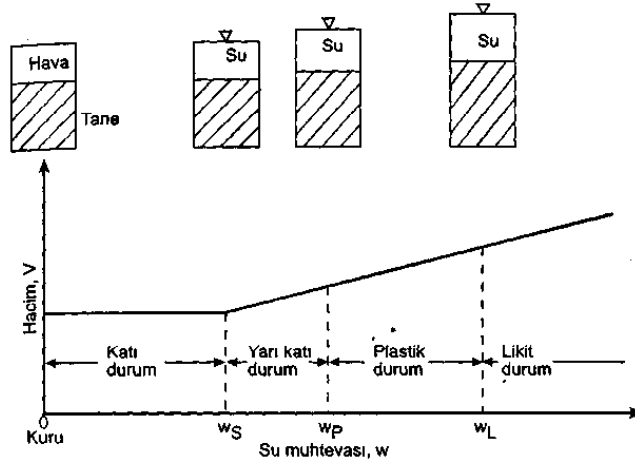
$$G_s = \frac{w_k}{w_k - (w_2 - w_1)} \quad (5.3)$$



Şekil 5.10. Özgül ağırlık deneyi

Atterberg Limitleri

Atterberg limitleri zeminlerin kıvam durumları hakkında bilgi edinmek için yapılan deneylerdir. Zeminlerde katı, yarı katı, plastik ve likit durum olmak üzere 4 farklı kıvam bulunmaktadır. Şekil 5.11’de zeminlerin hacim-su muhtevası ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Zeminlerin hacim-su muhtevası ilişkisi [80]

Likit Limit (LL) değerinin belirlenmesi (Casagrande Yöntemi):

Likit limit Şekil 5.11’de verilen hacim-su muhtevası grafiğinde de görüldüğü gibi plastik durum ile likit durumu birbirinden ayıran su içeriği değeri olarak bilinir. Bu tez çalışmasında zeminin likit limit değerini belirlemek için ASTM D4318-10e1 standardında bulunan Casagrande yöntemi kullanılmıştır [81]. Likit limit deneyinde özgül ağırlık deneyindeki karışımlara ek olarak kaolin+motor yağı+uçucu kül+nano grafen karışımlarına uygulanmıştır. Casagrande deney cihazındaki tasın içerisine bir miktar su ile karıştırılan zeminler düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Ardından yarık açma bıçağı ile iki eşit parçaya bölünen numuneler saniyede 1 vuruş yapacak şekilde deney üzerindeki kol döndürülerek boşluğun kapanması sağlanmıştır. Casagrande tası 10 mm yükseklikten düşürülmüştür ve boşluğun kapandığı andaki vuruş sayısı not edilmiştir. Su muhtevasını belirlemek için kapanmanın olduğu kısımdan bir miktar numune alınıp yaş ağırlığı tartılmıştır. Ardından 24 saat boyunca 105 °C’lik etüvde bekleyen numunenin kuru ağırlığı da tartılıp kaydedilmiştir. Bu işlemler 4 kez ve her seferde su içeriği artacak şekilde tekrarlanmıştır. Son olarak yatay eksende vuruş sayılarının, dikey eksen de su içeriklerinin bulunduğu grafik çizilip 25 vuruşa denk gelen su içeriği not alınmıştır. Bu değer likit limit değeri olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12. Likit limit deneyi

Plastik limit (PL) değerinin belirlenmesi:

Plastik limit, Şekil 5.11’de verilen hacim-su muhtevası grafiğinde de görüldüğü gibi yarı katı ile plastik durumun ayrıldığı su içeriği değeridir. Bu deneyde likit limit değerinde kullanılan tüm karışımlar aynı şekilde uygulanmıştır. Zeminlerin plastik limit değerlerini belirlemek için ASTM D4318-10e1 standardı kullanılmıştır [81]. İlk olarak kuru zemin numunesi bir miktar su ile karıştırılmıştır. Ardından numune cam plaka üzerinde ve el ayasında yuvarlanmıştır. Yuvarlama işlemi numunelerin çapı 3 mm oluncaya kadar devam edilmiştir ve bu esnada kopmaların yaşandığı durumda işlem durdurulmuştur. Elde edilen numuneler paslanmaz metal kaba alınıp öncelikle yaş ağırlıkları tartıldıktan sonra kaydedilmiştir. 24 saat boyunca 105 °C’de bekletilen numunelerin kuru ağırlıkları da tartılıp kaydedilmiştir. Bu deney 3 kere tekrar edilip aritmetik ortalamaları alınmıştır ve plastik limit değeri olarak hesaplanmıştır. Plastik limit deneyi Şekil 5.13’te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Plastik limit deneyi

Plastisite İndisi (PI) değerin belirlenmesi:

Zeminlerin su muhtevalarının değışimi plastisite indisi (PI) olarak ifade edilmektedir ve Denklem 5.4'te hesabı verilmiştir.

$$PI = LL - PL \quad (5.4)$$

Standart Proktor Deneyi

Bu tez çalışmasında, ASTM D698-00a1 standardına uygun olacak şekilde standart Proktor deneyi yürütölmüştür [82]. Ağırlığı 4326 gr, hacmi 923,355 cm³ olan proktor kabının içersine 5 kg zemin belirli bir oranda suyla karıştırılıp, 3 tabaka olarak yerleştirilmiştir. Her tabaka için 25 vuruş uygulanmıştır. 2,5 kg kütleli ve 0,305 m'den serbest bir şekilde düşen tokmak bu sıkıştırma işlemini gerçekleştirmiştir. Proktor kabının üst kısmındaki yaka çıkarılıp sıkışmış zemin + proktor kabı ağırlığı tartılıp, kaydedilmiştir. Deneyin ilk bölümünü oluşturan bu örneğin orta kısmından su muhtevasını belirlemek için parçalar alınmıştır. Tekrardan belirli orandaki su eklenerek zemin örneği ile karıştırılmıştır ve aynı adımlar sıkışmış zemin + proktor kabı ağırlık değeri düşene kadar uygulanmaya devam etmiştir. Her tekrarlanan adım sonunda Denklem 5.5 ve Denklem 5.6 kullanılarak w ile γ_k değeri hesaplanmıştır. Sonuçlar $\gamma_k - w$ grafiğı çizilerek aktarılmıştır. Grafikteki eğrinin tepe noktasının apsisi W_{opt} , ordinatı ise γ_{kmax} olarak bulunmuştur. Standart Proktor deneyi Şekil 5.14'te verilmiştir.

$$\gamma_n = \frac{W_{yaş}}{V_{proktor}} \quad (5.5)$$

$$\gamma_n = \frac{W_{yaş}}{V_{proktor}} \quad (5.6)$$



Şekil 5.14. Standart Proktor deneyi

5.2.2. İncelenen Zemin Numunelerinin Sınıflandırılması

Bu çalışmada, ASTM D2487-00 standardı dikkate alınarak sınıflandırma yapılmıştır [83]. Elek analizi ve Atterberg limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlar ile birlikte birleştirilmiş sınıflandırma sistemi (USCS) kullanarak sınıflandırma tamamlanmıştır (Tablo 5.6 ve Tablo 5.7).

Tablo 5.6. Birleşik zemin sınıflandırma sistemi [84]

Ana Gruplar			Grup Sembolü	Zemin Cinsi
İn Daneli Zeminler (No.200 Elekten Geçen <%50)	Çakıllar	Temiz çakıllar (No.200 Elek altı <%5)	GW	İyi derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları
			GP	Kötü derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları
		Siltli ve killi çakıllar (No.200 Elek altı >%12)	GM	Siltli çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları
			GC	Killi çakıllar, çakıl-kum-silt karışımları
	Kumlar	Temiz kumlar (No.200 Elek altı <%5)	SW	İyi derecelenmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar
			SP	Kötü derecelenmiş temiz kumlar, çakıllı kumlar
		Siltli ve killi kumlar (No.200 Elek altı >%12)	SM	Siltli kumlar
			SC	Killi kumlar
İnce Daneli Zeminler (No.200 Elekten Geçen >%50)	Siltler ve Killi	Düşük plastisiteli siltler ve killi (w_L <%50)	ML	Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler
			CL	Düşük plastisiteli inorganik killi ve siltli killi
			OL	Düşük plastisiteli organik siltler ve killi siltler
		Yüksek plastisiteli siltler ve killi (w_L >%50)	MH	Yüksek plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler
			CH	Yüksek plastisiteli inorganik killi ve siltli killi
			OH	Yüksek plastisiteli organik killi ve siltler
Organik Zeminler			Pt	Turba zeminler ve diğer organik zeminler

Tablo 5.7. Birleşik zemin sınıflandırma sistemi devamı [84]

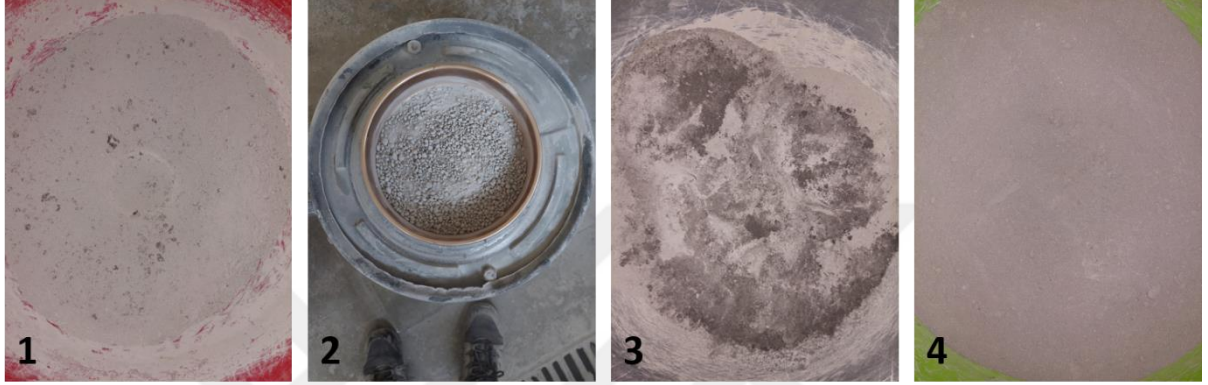
Laboratuvar Sınıflama Kriterleri	
6	
Fraksiyonu tanımlama "arazi tanınması" başlığı altındaki tane boyu eğrisini kullanınız. Tane boyu eğrisinden çakıl ve kumun yüzdeliklerini tanımlayınız. İnce tane yüzdesine (200 No'lu elekten geçen fraksiyona) bağlı olarak İri taneli zeminler şöyle sınıflanır: %5'den az : GW, GP, SW, SP 12'den çak : GM, GC, SM, SC %5-12 arası : İkili simge kullanımı gerekli sınırlar	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ 4'den büyük $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ 1 ile 3 arasında (bkz. Altbölüm 2.5) GW için tüm gradasyon şartları sağlanmaz Atterberg limitleri A hattının altında veya PI 4'den küçük Atterberg limitleri A hattının üstünde veya PI 7'den büyük A hattının üstünde ve PI 4 ile 7 arasında ise ikili simge kullanımı gerektiren sınır durumu
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ 6'dan büyük $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ 1 ile 3 arasında (bkz. Altbölüm 2.5) SW için tüm gradasyon şartları sağlanmaz Atterberg limitleri A hattının altında veya PI 4'den küçük Atterberg limitleri A hattının üstünde veya PI 7'den büyük PI 4 ile 7 arasında ve limitler taralı alana düşerse ikili simge kullanımı gerektiren sınır durumu
İnce Taneli Zeminlerin Laboratuvar Sınıflaması İçin Plastisite Aşağı	

5.2.3. Numunelerin Hazırlanması

Fiziksel özellikleri belirlenmiş zeminlerin tek eksenli serbest basınç dayanımlarını (UCS) ve konsolidasyon parametrelerini belirlemek amacıyla 2 farklı türde numune hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanışı bir yere kadar ortak ilerleyip ardından deneylere göre farklılık göstermiştir.

Kirlenmiş Zeminin Hazırlanışı:

Her deney için belirlenen miktarlarda saf kaolin alınmış ve atık motor yağı (AMY) kirlenme derecelerine göre (%0, %3, %5 ve %9) karıştırılmıştır. İlk olarak kaolin-AMY karışımı elle toz haline getirilecek ve sızdırmaz bir tepside 1 saat boyunca iyice karıştırılmıştır ve homojenliğin sağlanması için elekten geçirilmiştir. Atık motor yağının kaolin ile dengeye gelmesi için karışım belirli sürelerle kapalı bir kapta bekletilmiştir. Kirlenme süreci Şekil 5.15'te verilmiştir.



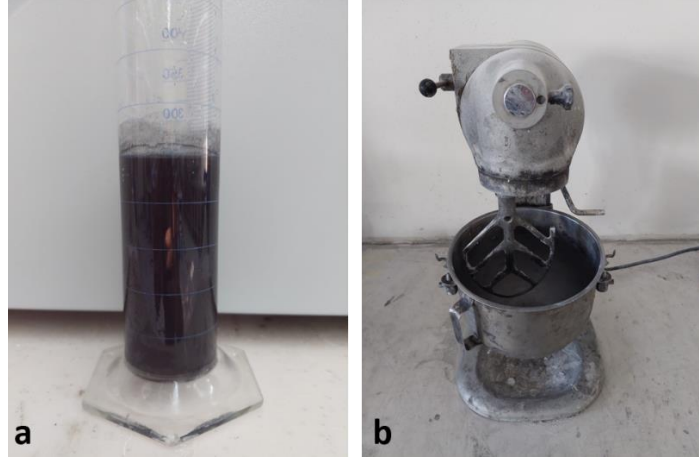
Şekil 5.15. Zemini kirlenme adımları

Uçucu Kül Katkılı Zeminin Hazırlanışı:

Farklı oranlarda kirlenmiş her zemine belirlenen oranlarda (%10, %25, %45) uçucu kül (UK) kuru bir şekilde eklenmiştir ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır.

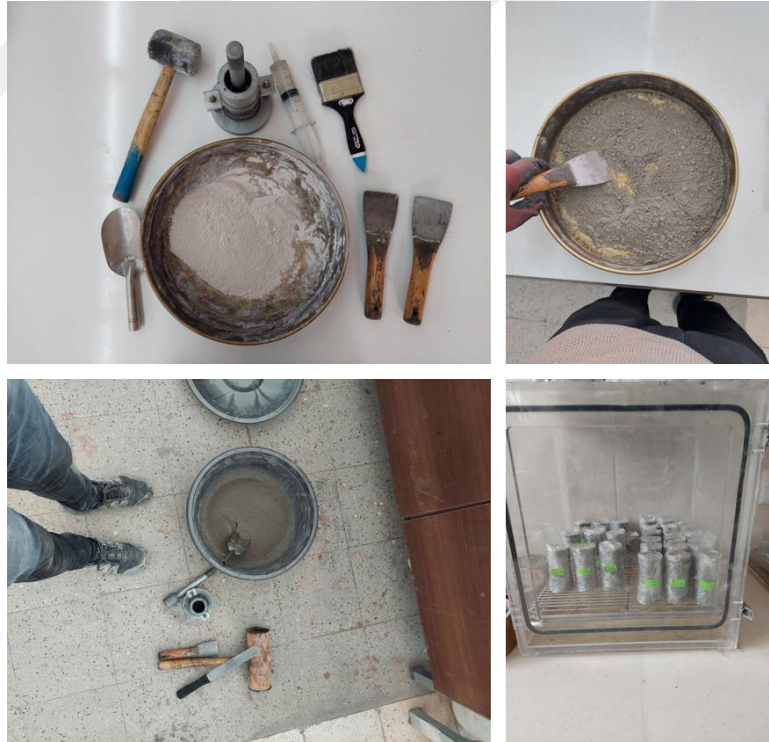
Nano-Grafen Katkılı Zeminin Hazırlanışı:

Nano-grafen (NG) ilavesinde sulu çözelti hazırlanarak zemine ilavesi yapılmıştır. Bu çözelti proktor deneyleri sonucu elde edilen su içeriği kadar suya belirli oranlardaki nano-grafenin (%0.04, %0.08 ve %0.12) mikser yardımıyla 30-45 dakika karışmasıyla elde edilmektedir. Nano-grafenin hazırlanışı Şekil 5.16'da verilmiştir. Elde edilen nano-grafen çözeltisi kaolin-AMY-UK-NG karışımına eklenmiştir. Bu karışımın uçucu külün bulunma nedeni ise nano-grafenin tek başına bir bağlayıcılık özelliği gösteremiyor olmasıdır. Nano-grafen ilaveli tüm karışımlara %25 oranında uçucu kül eklenmiştir, çünkü elde edilen deneysel sonuçlara ve literatür taramaları bu oranı uygun kılmaktadır. Bose (2012)'nin yaptığı çalışmada da %20 lik uçucu kül ilavesinin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir [85].



Şekil 5.16. Nano-grafen hazırlığı (a) Nano-grafen çözeltisi (b) Mikser

Fiziksel özellikleri belirlenmiş kirlenmiş zeminlerin hazırlanışı ve stabilizasyon yöntemlerinin uygulanışı anlatılmıştır. Zeminlerin serbest basınç dayanımlarını (UCS) belirlemek amacıyla çapı 38 mm ve yüksekliği 76 mm olan numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler proktor deneyi sonucu elde edilen optimum su muhtevası değerlerine göre ve Harvard minyatür kompaksiyon aleti kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. Zemin numunelerinin UCS deneyi için hazırlanması

Hazırlanan zemin numunelerine yavaş yavaş su ilave edilmiş ve yoğrulmuştur. İlave edilen suyun miktarı standart proktor deneyinde elde edilen optimum su muhtevasına göre belirlenmiştir. Zemin+su karışımının homojen bir şekilde dağılması için plastik torbalarda 24 saat bekletilmiştir. Deneye başlamadan önce su muhtevaları kontrol edilen numuneler ardından deneye tabi tutulmuştur. Çapı 38 mm, yüksekliği 76 mm olan numuneleri oluşturmak için Harvard minyatür kompaksiyon aleti iyice yağlanmıştır ve 3 tabakada doldurulmuştur. Her tabaka 25 defa tokmaklanmış olup numuneler hasar görmeyecek şekilde çıkarılmıştır ve zaman kaybetmeden plastik ambalajlara sarıldıktan sonra nem kabinine yerleştirilmiştir.

Saf kaolin, kaolin+AMY, kaolin+AMY+UK karışımları için belirlenen tüm oranlarda, kaolin+AMY+UK+NG içinse nano-grafenin en yüksek oranı olan %0.12 için standart proktor deneyleri uygulanmıştır. Bulunan optimum su içerik değerleri ile numuneler hazırlanmıştır ve bulunan değerler “Bulgular ve Tartışma” bölümünde sunulmuştur. Nano-grafen için sadece en büyük oranda standart proktor deneyinin yapılmasına ise literatür taramaları sonucunda karar verilmiştir. Naseri vd. (2016), yaptıkları çalışmada nano-grafen katkısız zemin ile %0.1 katkılı zemin arasındaki optimum su içeriği farkı yaklaşık %1 iken [86], Aziz vd. (2022) yaptıkları farklı bir çalışmada da nano-grafen katkısız zemin ile %0.1 katkılı zemin arasındaki optimum su içeriği farkı yaklaşık %2 civarındadır [87]. İki çalışmada da kullanılan nano-grafen aslında grafen oksittir ve bağlayıcı madde olarak çimento kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında nano-grafen paletleri kullanılmış ve bağlayıcı malzeme olarak da F sınıfı uçucu kül kullanıldığından bu fark daha da azdır ve sonuçları “Bulgular ve Tartışma” bölümünde sunulmuştur.

Konsolidasyon deneyi için numunelerin hazırlanışı UCS deneyinde olduğu gibidir. Aradaki farklar, zemin numunelerinin standart proktor aletinde sıkıştırılması ve karıştırılan su miktarının optimum şu içeriklerinden 1,5 kat fazla olmasıdır. Proktor aletinde sıkıştırılma sebebi, deney için kullanılan ring çapının 5 cm olmasıdır. Su miktarının 1,5 kat fazla olma sebebi ise ringlere yerleştirilen zeminin daha rahat yerleştirilmesi ve zarar görmemesi içindir. Konsolidasyon deneyi için numune hazırlama aşamaları Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18. Konsolidasyon deneyi için numune hazırlama aşamaları

5.2.4. Serbest Basınç Dayanım (UCS) Deneyi

Bu çalışmada UCS testi ASTM D2166 standardına göre yapılmıştır [88]. Numunelerin serbest basınç dayanımları Fırat Üniversitesi-Teknoloji Fakültesi-İnşaat Mühendisliği Bölümü-Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda üç eksenli deney cihazı (ELE marka) ile belirlenmiştir. Aynı makine serbest basınç testleri için de kullanılmıştır. Numunelere yük uygulamak için dakikada 0,760 mm gerinim hızı uygulanmıştır. Yükleme prosedürü, numune başarısız olana kadar veya gerinim %20'ye ulaşana kadar tekrarlanmıştır. Şekil 5.19'da UCS deneyi cihazı ve çalışma şekli verilmiştir.



Şekil 5.19. UCS deneyi seti ve çalışma şekli

5.2.5. Konsolidasyon Deneyi

Bu çalışmada yapılan konsolidasyon testleri ASTM D4186-98 ve ASTM D2435-02 standartlarına göre uygulanmıştır [89, 90]. Deneyler, ELE markalı 4 adet konsolidasyon deney seti

ile yapılmıştır (Şekil 5.20). Deney setinde 5 cm çapında ve 2 cm yüksekliğindeki ringler kullanılmıştır. Deney için 25, 50, 100, 200 ve 400 kPa'lık yüklemeler seçilmiştir. Her bir yükleme için 10, 15 ve 30. saniye ile 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480 ve 1440. Dakika okumaları alınmıştır. Deney sonucunda konsolidasyon parametreleri olan boşluk oranı (e), sıkışma katsayısı (a_v), hacimsel sıkışma katsayısı (m_v), konsolidasyon katsayısı (c_v), sıkışma indisi (cc) ve şişme indisi (cs) değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.20. Konsolidasyon deney seti

5.2.6. Mikroyapısal Analizlerin Belirlenmesi

Bu çalışmada yapılan mikroyapısal analizler Marmara Üniversitesi'nin Nanoteknoloji ve Biyomalzemeler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Üniversitede bulunan Zeiss EVO MA10 markalı cihaz ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır (Şekil 5.21). Zemin numuneleri ayrı ayrı toz haline getirilerek paketlenmiştir. SEM cihazına yerleştirilen numunelerden farklı yakınlaştırma boyutlarında görüntüler alınmıştır. Aynı numunelere EDX analizi de yapılmıştır.



Şekil 5.21. SEM (Taramalı elektron mikroskobu) [91]

5.2.7. Grey Korelasyon Analizi

Grey korelasyon analizi, bir tasarım içindeki farklı diziler arasındaki geometrik yaklaşımları değerlendirmek için kullanılır. Başka bir deyişle, sistem parametrelerinin tüm sistem içerisindeki etki derecelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılır. Bu tez çalışmasında, atık motor yağıyla kirlenmiş kaolinin kilini etkileyen ana parametrelerin zemini etkileme derecelerini sıralandırmak için Grey korelasyon analizinden faydalanılmıştır. Özgül ağırlık (Gs), optimum su içeriği (OSİ), maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}), likit limit (LL), plastisite indisi (PI) ve maksimum gerilme (UCS_{max}) parametreleri Grey korelasyon analizi için seçilmiştir. Atık motor yağı içeriği referans dizisi olarak seçilmiş ve diğer parametreler (Gs, LL, PI, UCS_{max} , γ_{kmax} , OSİ) karşılaştırma dizisi olarak alınmıştır. Bu sayede hangi parametrenin atık motor yağı kirliliği veya uygulanan iyileştirmeler sonucunda zemini ne derecede etkilediği hesaplanmıştır. Grey korelasyon derecesini ve Grey korelasyon sırasını elde etmek için aşağıdaki adımlar kullanılmıştır.

1. Referans dizisi olarak $x_0(k) = \{x_0(k_1), x_0(k_2), x_0(k_3), \dots, x_0(k_n)\}$, karşılaştırma dizisi olarak $x_i(k) = \{x_i(k_1), x_i(k_2), x_i(k_3), \dots, x_i(k_n)\}$ tanımlanır.
2. Referans ve karşılaştırma dizilerinde farklı boyutlara sahip denklemleri boyutsuzlaştırmak için, referans ve karşılaştırma dizileri Denklem 5.7 ve Denklem 5.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$x'_0(k) = x'_0(k) / x_0(k_1) = \{x'_0(k_1), x'_0(k_2), \dots, x'_0(k_n)\} \quad (5.7)$$

$$x'_i(k) = x'_i(k) / x_i(k_1) = \{x'_i(k_1), x'_i(k_2), \dots, x'_i(k_n)\} \quad (5.8)$$

Burada $x'_0(k)$ ve $x'_i(k)$ normalleştirilmiş referans veya karşılaştırma dizileridir.

3. Korelasyon katsayıları Denklem 5.9'a göre hesaplanır.

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5.9)$$

ρ korelasyon katsayısıdır ve bu çalışmada 0,50 olarak alınmıştır.

4. Gri Korelasyon (r_{0i}) Denklem 5.10 ile elde edilir:

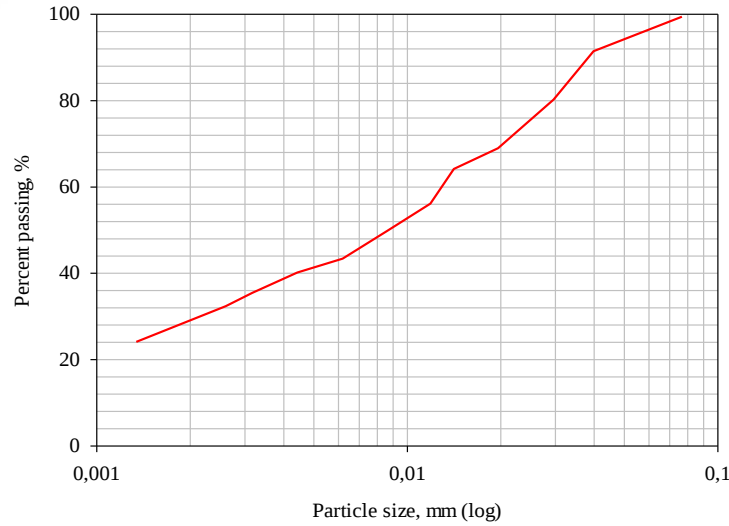
$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(k) \quad (5.10)$$

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, saf kaolin kilinin atık motor yağı ile kirlenmesi sonucu meydana gelen fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimin araştırılması, uçucu kül ve nano-grafen kombinasyonlarının çeşitli oranlardaki stabilizasyon sonuçlarının serbest basınç dayanım deneyi (UCS) ve konsolidasyon deneyi ile araştırılması amaçlanmıştır. İlk olarak deneysel çalışmalarda kullanılacak zemin türlerinin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak farklı kirlenme ve kürlenme derecelerine sahip zemin numunelerinin tek eksenli serbest basınç dayanımı (UCS) ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar bu başlık altında anlatılmış ve yorumlanmıştır.

6.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Çalışmada kullanılan kaolin kili Balıkesir bölgesinden, atık motor yağı Elazığ Organize Sanayi Bölgesi'nden, uçucu kül Bursa elektrik santralinden, nano-grafen ise ALGI LAB tarafından temin edilmiştir. Oluşturulan tüm zemin kombinasyonlarının fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla laboratuvar da elek analizi, hidrometre, likit limit, plastik limit, özgül ağırlık ve standart proktor deneyleri uygulanmıştır. Saf kaolinin granülometri eğrisi Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Granülometri eğrisi

Zemin kombinasyonlarına ve her birine özel olarak uygulanan likit limit, plastik limit, özgül ağırlık ve standart proktor deneylerine ait sonuçlar Tablo 6.1' verilmiştir. Tablo 6.1'e göre özgül ağırlık ve standart proktor deneyleri sadece 1 günlük numunelere uygulanmıştır. Nano-grafen içeren numunelere ise özgül ağırlık deneyi uygulanmamıştır. Çünkü nano-grafenin ilave edilen oranından dolayı içerdiği miktar az olduğundan bir etkisinin olmadığı ve literatür taramalarında da nano-grafen ilavesinde özgül ağırlık deneylerinin yapılmadığı görülmektedir. Atterberg limitlerinin

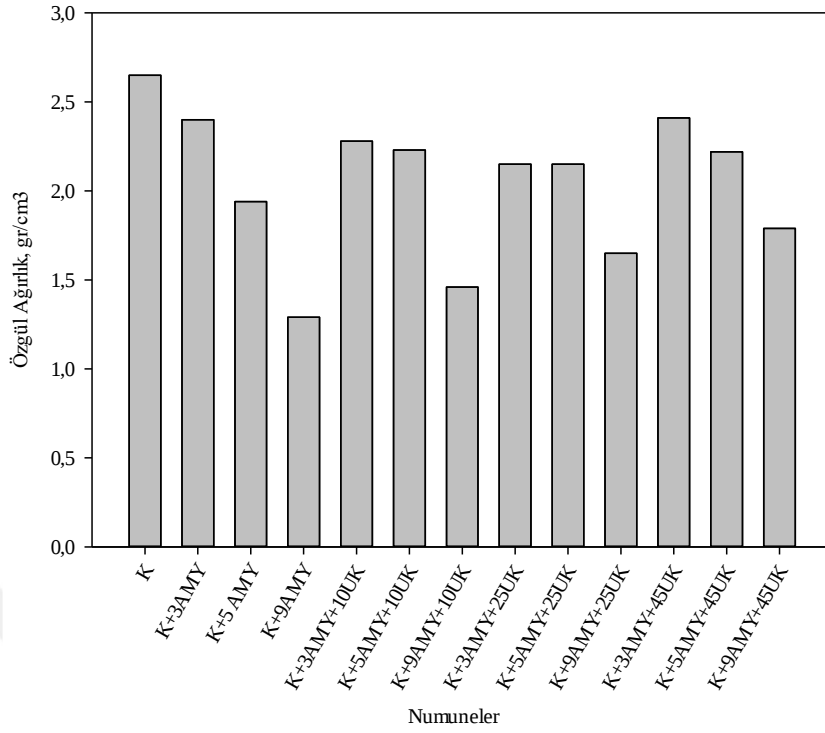
bulunmasında saf kaolin ve kirlenmiş durumlarında 1 ve 7 gün için likit limit ve plastik limit deneyleri uygulanmıştır. Stabilizatör ilavesinde ise likit limit ve plastik limit deneyleri sadece 1 gün için uygulanmıştır. Bunun nedeni ise, kirlenmiş zeminlerle ilgili çalışmalarda zeminin hem fiziksel hem de mekanik özellikleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır ancak bu zeminlerin stabilizasyonunda düşen mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlandığından sadece mekanik özellikleri belirlemek için kirlenme ve kirlenme sürelerine uygun olarak deneyler yürütülmüştür.

Tablo 6.1. Zemin kombinasyonlarının fiziksel özellikleri

ÖRNEK	ZEMİN	AMY (%)	SÜRE (gün)	STBLZTR (%)	GS (gr/cm ³)	LL (%)	PL (%)	PI	OSİ (%)	γ _k max (gr/cm ³)
S1	K	-	1	-	2,65	26	17	9	19	1,65
S2	K	3	1	-	2,4	27,15	18	9,15	18	1,73
S3	K	3	7	-	-	27,19	17,4	9,79	-	-
S4	K	5	1	-	1,94	26,23	18,6	7,63	16	1,73
S5	K	5	7	-	-	26,7	17,1	9,6	-	-
S6	K	9	1	-	1,29	27,33	18,8	8,53	11	1,75
S7	K	9	7	-	-	26,91	14,5	12,41	-	-
S8	K	3	1	10 UK	2,28	27,7	17,6	10,1	17,96	1,65
S9	K	5	1	10 UK	2,23	25,9	17,8	8,1	15,55	1,87
S10	K	9	1	10 UK	1,46	26,9	16,7	10,2	11,52	1,85
S11	K	3	1	25 UK	2,15	25,2	17	8,2	16,71	1,68
S12	K	5	1	25 UK	2,15	26,6	17,4	9,2	13,81	1,76
S13	K	9	1	25 UK	1,65	26	17,7	8,3	10,97	1,85
S14	K	3	1	45 UK	2,41	24,7	17,1	7,6	15,68	1,89
S15	K	5	1	45 UK	2,22	26,4	17,2	9,2	15,66	1,65
S16	K	9	1	45 UK	1,79	24,8	16,7	8,1	13,74	1,78
S17	K	3	1	25UK + 0,12 NG	-	25,3	16,8	8,5	18,06	1,75
S18	K	5	1	25 UK + 0,12 NG	-	25,3	17,6	7,7	15,25	1,69
S19	K	9	1	25 UK + 0,12 NG	-	25,7	17	8,7	12,3	1,78

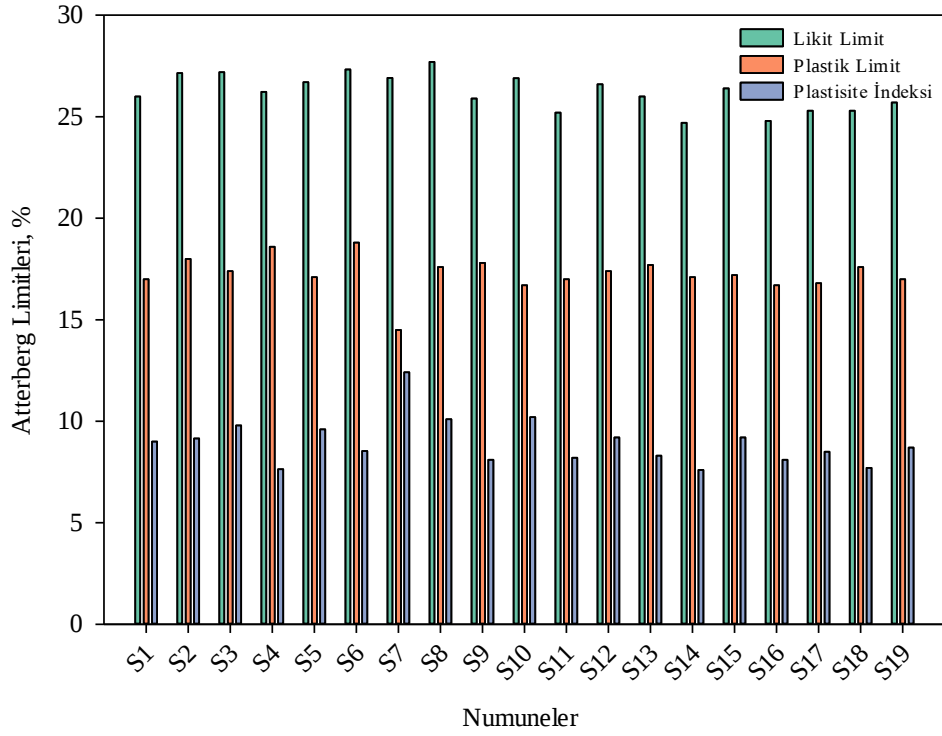
K: kaolin, AMY: atık motor yağı, STBLZTR: stabilizatör, UK: uçucu kül, NG: nano-grafen, GS: özgül ağırlık, LL: likit limit, PL: plastik limit, PI: plastisite indisi, OSİ: optimum su içeriği, γ_k max: maksimum kuru birim hacim ağırlık

Tablo 6.1’ de verilen fiziksel özelliklerin daha iyi anlaşılabilmesi için ayrıca bar grafiklerinden faydalanılmıştır. Özgül ağırlıklara ait grafik Şekil 6.2’ de verilmiştir. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi AMY oranı arttıkça zeminlerin özgül ağırlıklarında azalma görülmektedir. Tüm karışımlar içerisinde maksimum özgül ağırlık değeri 2,65 gr/cm³ ile saf kaolindedir. %9 AMY kirlenmesinde uçucu kül oranı arttıkça özgül ağırlıkta artış görülmüştür ve bu artış oranı %28’dir. %3 ve %5 AMY için bu durum dalgalı olsa da nihai olarak %45 UK katkısında maksimum özgül ağırlığa ulaşmıştır.



Şekil 6.2. Zeminlerin özgül ağırlık değerleri

Zeminlerin kıvam limitlerini belirlemek amacıyla likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Deneylerin uygulanışı “Materyal ve Metot” başlığı altında detaylıca anlatılmıştır. Atterberg limitleri için çizilen bar grafiği Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.3. Zeminlerin Atterberg limit değerleri

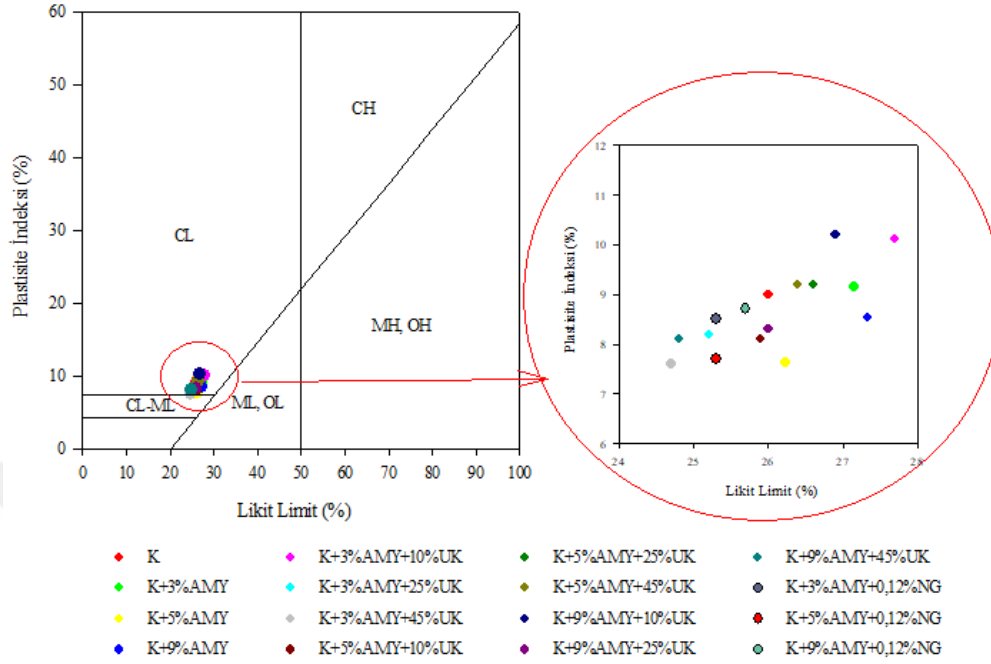
Bu tez çalışmasında kullanılan saf kaolinin LL değeri 26, PL değeri 17 ve bu değerlere bağlı olarak PI ise 9'dur. PI, denklem (5.4) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denkleme göre diğer zemin karışımlarının da PI değerleri hesaplanmış olup Tablo 6.1 ve Şekil 6.3'te tüm kıvam limitleri gösterilmiştir.

Kirlenme süresi fark etmeksizin sadece AMY eklenmiş karışımlarda LL değeri saf kaolinden her zaman yüksek çıkmıştır. PL değerinde ise 7 günlük %9 AMY zemin dışındaki tüm karışımlar saf zeminden yüksektir. Ayrıca PL değerleri, sadece AMY'li zeminlerde kirlenme süresine bağlı olarak, kirlenme süresi arttıkça PL'de azalma görülmüştür. LL içinse bu durum %3 ve %5 AMY zeminlerde artış, %9 AMY zeminde azalma şeklindedir.

Uçucu kül ilavelerinde iki farklı durum görülmüştür. %10 uçucu kül ilavesinde maksimum LL %3 AMY'de, maksimum PL %5 AMY'de ve maksimum PI ise %9 AMY zeminedir fakat %25 ve %45 uçucu kül ilavesinde maksimum LL ve PI değerleri %5 AMY zeminedir. Nano-grafen ilavesinde ise maksimum LL ve PI değerleri %9 AMY zeminedir.

Tablo 6.1 ve Şekil 6.3 dikkatle incelendiğinde sayısal değerler üzerinden yorum yapılabilir fakat bulunan kıvam limit değerleri birbirine oldukça yakındır. Zemin karışımlarının plastisite kartındaki yerleri aşağıda verilmiştir (Şekil 6.4). Sağlıklı yorumların AMY ile karıştırılmış zeminde olduğu görülmektedir ve bunun başlıca sebebi kullanılan kaolin kilidir. Kaolinin kilinin AMY ile

kariştirildiğinde emme kapasitesinin iyi olduğu görölmüştür. Kaolin kiline ilave malzemeler geldikçe değerlerde pek değışim görölmemiştir.



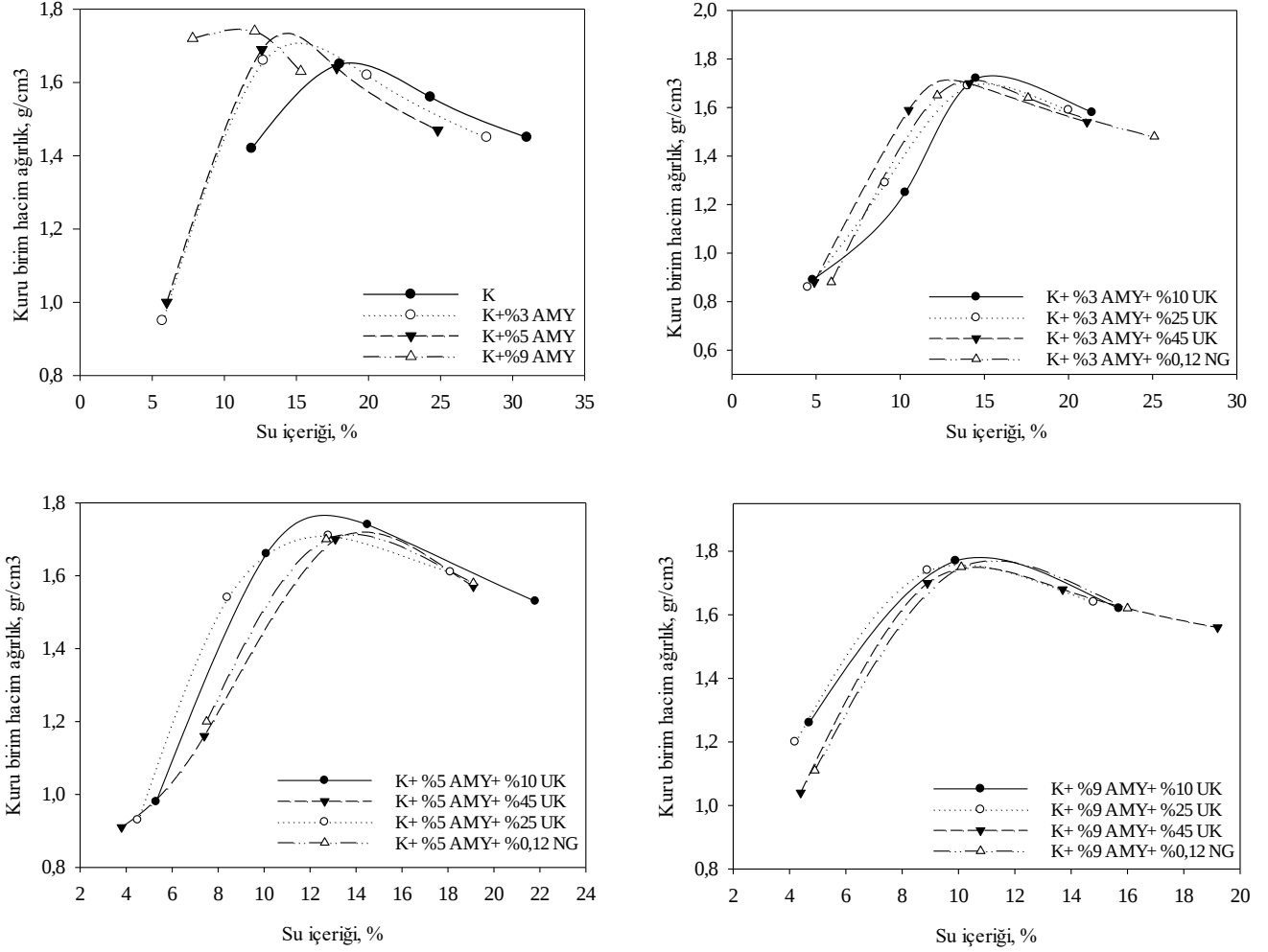
şekil 6.4. Zemin karişimlarının plastisite kartındaki konumları

Yapılan standart Proktor deneyleri sonucunda elde edilen eğriler şekil 6.5'te, sonuçları ise Tablo 6.1 ve şekil 6.6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, saf kaolinin W_{opt} değeri %19 iken AMY oranı arttıkça bu değerler sırasıyla %18, %16 ve %11 olmuştur. W_{opt} değerleri düştükçe γ_{kmax} değerlerinde de artış görölmektedir.

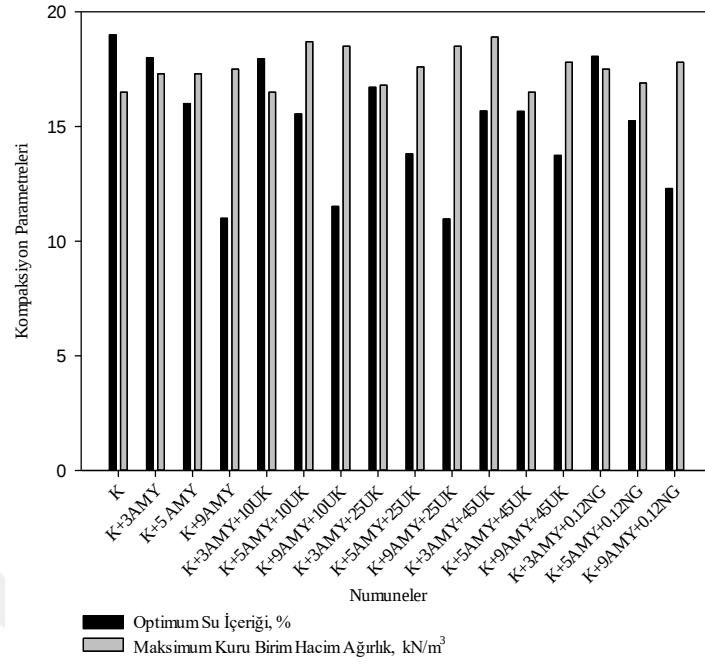
Uçucu kül ilavelerinde iki farklı durum görölmüştür. İlki %3 AMY zeminde uçucu kül oranı arttıkça W_{opt} değerleri azalmıştır ve literatür taramalarında uçucu kül ilavesinin zeminlerde OSİ düşürdüğu görölmektedir [85, 92]. İkinci durumda ise %5 ve %9 AMY için en düşük OSİ değeri %25 UK ilavesinde görölmüştür. Bunun nedenleri arasında AMY oranı arttıkça zeminin karakteristik özelliklerinde meydana gelen başlıca değışiklikler gösterilebilir. AMY oranı arttıkça W_{opt} değeri düşen zeminlerde belli bir UK oranından sonra W_{opt} için arttırma gözlenmiştir. AGA Ahmed'in (2014) yaptığı çalışmada %15 UK ilavesine kadar zeminin W_{opt} değerinde düşüş ardından artış görölmektedir [93]. Nano-grafen ilavelerinde ise bağlayıcılık özelliğinden dolayı önceki bölümlerde detaylıca anlatılan %25 UK ilavesiyle kıyaslama yapıldığında tüm AMY oranları için W_{opt} değerlerinde artış görölmüştür.

Nano-grafen ilavesinde oranlar oldukça küçük olduğundan ilaveler içindeki en yüksek oran olan %0,12 için kompaksiyon parametreleri incelenmiştir (şekil 6.5 ve şekil 6.6). %3, %5 ve %9 AMY ile kirlenmiş nano-grafen katkılı zeminlerin OSİ değerleri sırasıyla %18,06 , %15,25 ve %12,3 şeklindedir. Numunelerin hazırlanışında nano-grafenin bağlayıcılık özelliğinin

olmamasından dolayı %25 UK ilavesi Standart Proktor deneyleri için de kullanılmıştır ve bu bağlamda nano-grafen katkısını sadece %25 UK katkılı zeminlerle karşılaştırıldığı durumda OSİ değerlerinin sırasıyla %8,1 , %10,4 ve %12,1 arttığı görülmüştür.



Şekil 6.5. Standart Proktor deney eğrileri



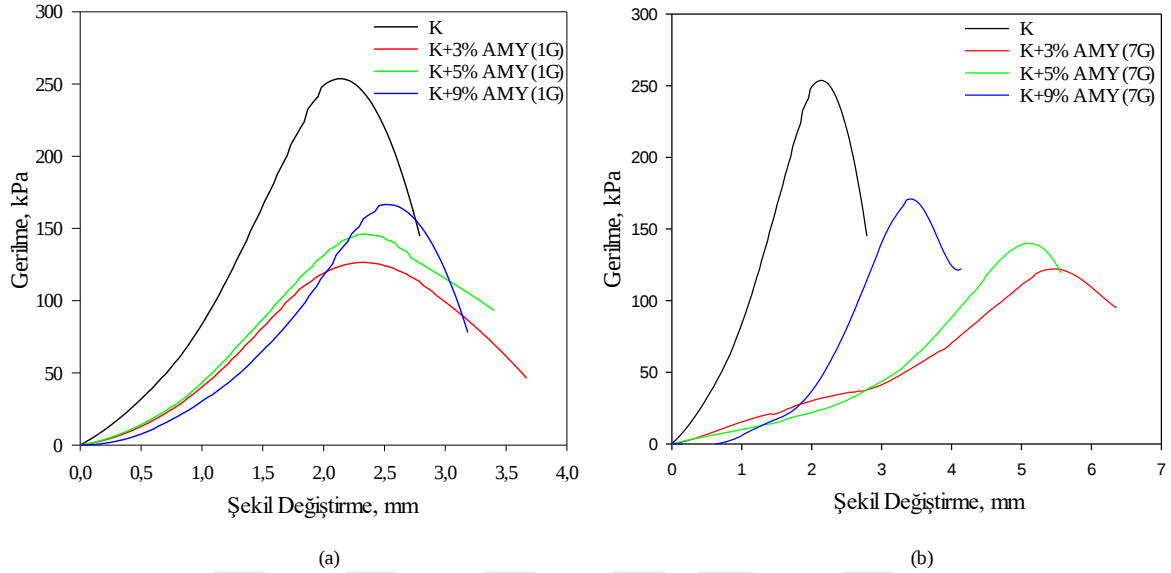
Şekil 6.6. Zeminlerin kompaksiyon parametreleri

6.2. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin UCS Tek Eksenli Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışları

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan UCS deneyleri sonucunda numunelerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenmiştir. Numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de gösterilmiştir.

Şekil 6.7’de saf kaolin kili ve farklı kirlenme süreleri (1 ve 7 gün) ve derecelerine (%0, %3, %5, %9) bağlı olarak tek eksenli basınç dayanımları sonucu ortaya çıkan gerilme-deformasyon davranışları verilmiştir. Görüldüğü üzere saf kaolinin UCS dayanımı kirlenmiş zeminlerden daha yüksek çıkmıştır. Kirlenmiş zeminlerde ise durum kirlenme derecesi arttıkça UCS dayanımlarının arttığını göstermektedir. Kirlenme derecesi arttıkça numunelerdeki dayanımın düşmesi daha sık rastlanan bir durumdur ancak kullanılan zeminin türü ve kirlenici malzemenin özellikleriyle birlikte belli bir orana kadar dayanım özelliklerinde artışa sebep olduğu görülmektedir. Kontaminasyon oranına bağlı olarak elde edilen sonuçlar Li vd. (2022) yaptıkları çalışmaya benzer sonuçlar göstermektedir. Çalışmalarında uyguladıkları yöntemlerden biri bu çalışmada kullanılan yöntemle aynıdır ve motor yağının zemin üzerindeki etkilerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca mukavemeti en yüksek çıkan numune saf zemin iken en düşük değer %3 motor yağı ilaveli zemindir. Dalgalı değerler gösteren grafiklerde saf durum en yüksek iken, değerlerde bir düşüş gözlenmekte ve ardından tekrar artış görülmektedir. Saf halini geçmeyen motor yağlı zeminlerde en yüksek değer, iki farklı kuru birim hacim ağırlık değerine göre %16 katkı zeminlerdedir [94]. Bu çalışmada motor yağlı zeminler kendi aralarında karşılaştırıldığında %9 motor yağı katkı

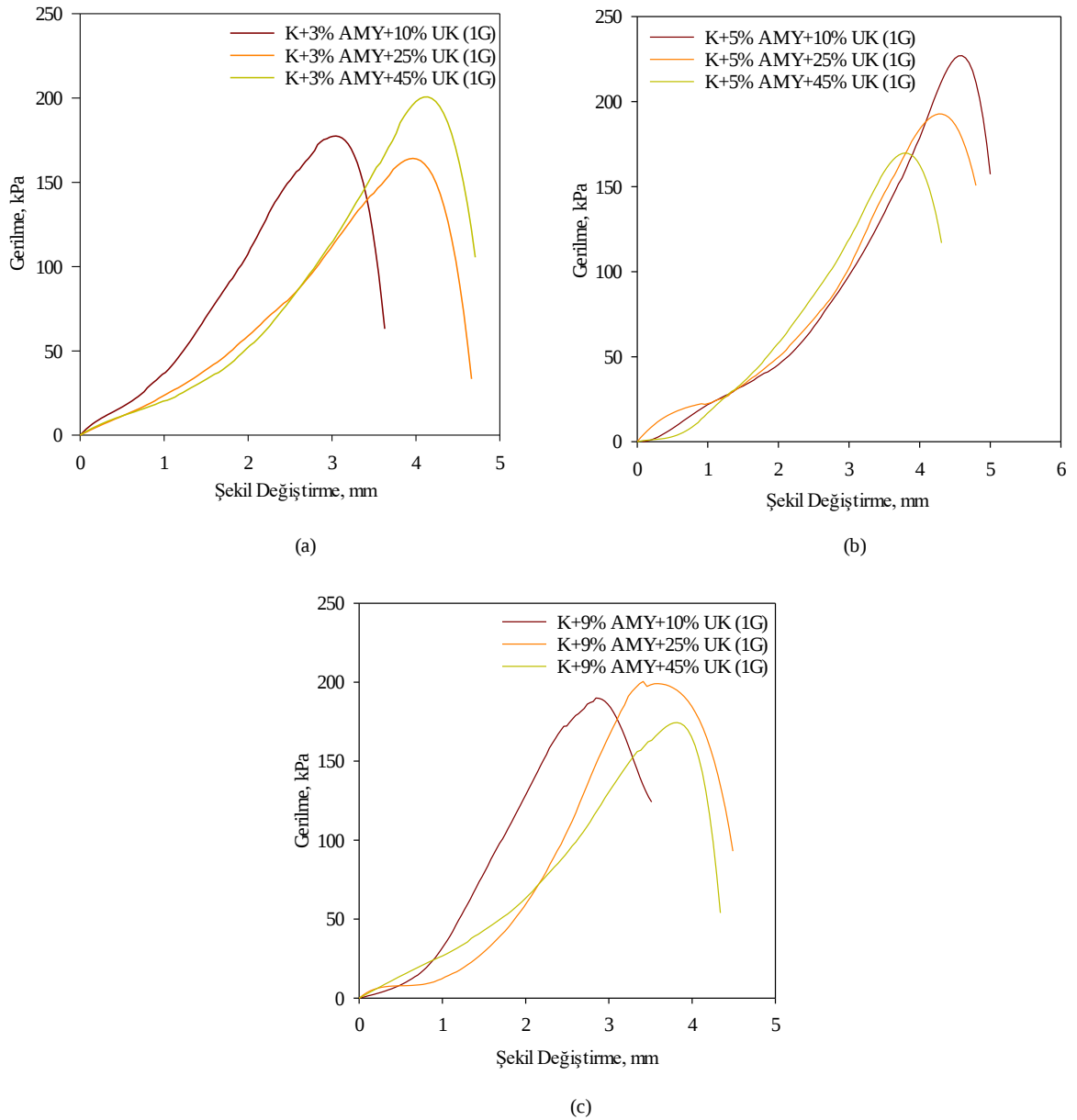
kaolin kili en yüksek değere ulaşmıştır. Farklı oranlarda AMY ile kirlenmiş (%3, %5, %9) ve kirlenme süresi 1 gün olan zeminlerin saf kaoline göre dayanımlarının azalma oranları sırasıyla %49,33, %43,14 ve %36,18'dir. Kirlenme süresi 7 gün olan numunelerde ise dayanımlarının azalma oranı sırasıyla %53,80, %46,33 ve %36,67 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre kirlenme süresi arttıkça dayanımların azaldığı sonucuna varılmaktadır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Farklı kirlenme süreleri ve derecelerine sahip zeminlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) 1 gün, (b) 7 gün

Şekil 6.8'de farklı oranlarda AMY ile kirlenmiş (%3, %5 ve %9), çeşitli oranlarda uçucu kül (%10, %25 ve %45) ilave edilmiş ve kirlenme-kürlenme süresi 1 gün olan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Kirlenmiş zeminlere uçucu kül ilave edildiği zaman dayanımlarında artış görülmüştür. Şekil 6.8.a'da %3 AMY ile kirlenmiş zemine %10, %25 ve %45 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu kül katılmamış zeminle kıyaslandığı zaman dayanımlarında sırasıyla %33,31, %21,32 ve %50,88 artış görülmüştür. Şekil 6.8.b'de %5 AMY ile kirlenmiş zemine %10, %25 ve %45 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu kül katılmamış zeminle kıyaslandığı zaman dayanımlarında sırasıyla %49,91, %29,19 ve %13,03 artış görülmüştür. Şekil 6.8.c'de %9 AMY ile kirlenmiş zemine %10, %25 ve %45 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu kül katılmamış zeminle kıyaslandığı zaman dayanımlarında sırasıyla %12,12, %19,77 ve %0,001 artış görülmüştür.

Şekil 6.8'de %3, %5 ve %9 AMY zeminler için en yüksek artış gösteren uçucu kül oranları sırasıyla %45, %10 ve %25 olarak görülmektedir. 1 günlük kirlenme-kürlenme süresindeki bu zemin grubu için optimum uçucu kül oranı bulunamamıştır. Her bir AMY için farklı değişimler gözlenmiştir.

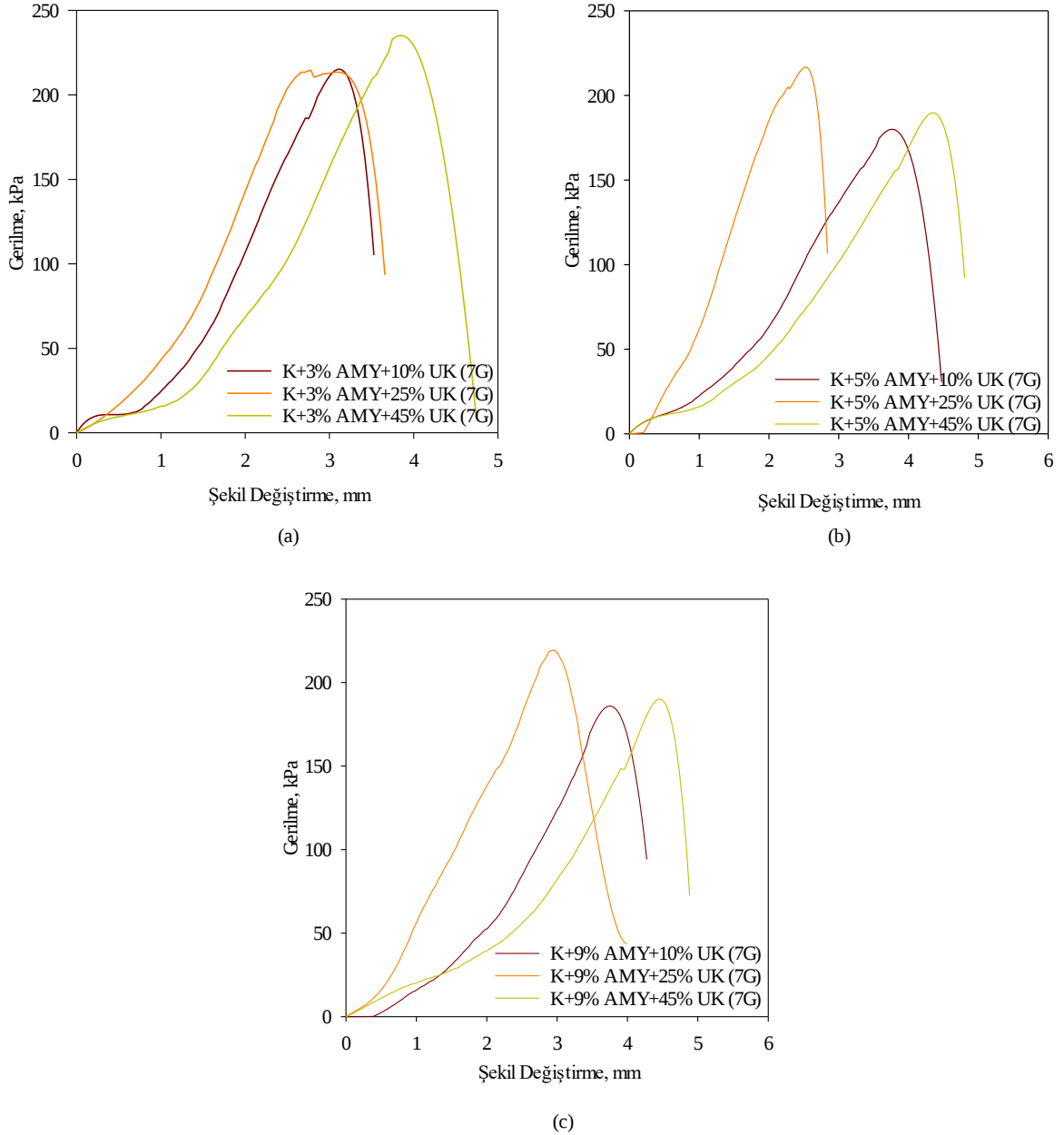


Şekil 6.8. Kirlenme-Kürlenme süresi 1 gün olan numunelerin uçucu kül katkılarında gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY

Şekil 6.9’da farklı oranlarda AMY ile kirlenmiş (%3, %5 ve %9), çeşitli oranlarda uçucu kül (%10, %25 ve %45) ilave edilmiş ve kirlenme-kürlenme süresi 7 gün olan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Kirlenmiş zeminlere uçucu kül ilave edildiği zaman dayanımlarında artış görülmüştür. Şekil 6.9.a’da %3 AMY ile kirlenmiş zemine %10, %25 ve %45 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu kül katılmamış zeminle kıyaslandığı zaman dayanımlarında sırasıyla %74,58, %79,27 ve %94,19 artış görülmüştür. Şekil 6.9.b’de %5 AMY ile kirlenmiş zemine %10, %25 ve %45 oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Uçucu kül katılmamış zeminle kıyaslandığı zaman dayanımlarında sırasıyla %26,81, %48 ve %28,38 artış görülmüştür. Şekil 6.9.c’de %9 AMY ile kirlenmiş zemine %10, %25 ve %45 oranlarında uçucu

kül ilave edilmiştir. Uçucu kül katılmamış zeminle kıyaslandığı zaman dayanımlarında sırasıyla %12,02, %27,45 ve %0,05 artış görülmüştür.

Şekil 6.9'da %3 AMY zemin için en yüksek artış %45 katkılı uçucu kül ilavesinde, %5 ve %9 AMY zeminler için en yüksek dayanım artışı %25 uçucu kül ilavesinde gerçekleşmiştir. 1 günlük numunelere kıyaslandığında daha bağlantılı sonuçlar çıkmıştır. Bu sonuçlara göre AMY oranı arttıkça uçucu kül ihtiyacı azalmaktadır.



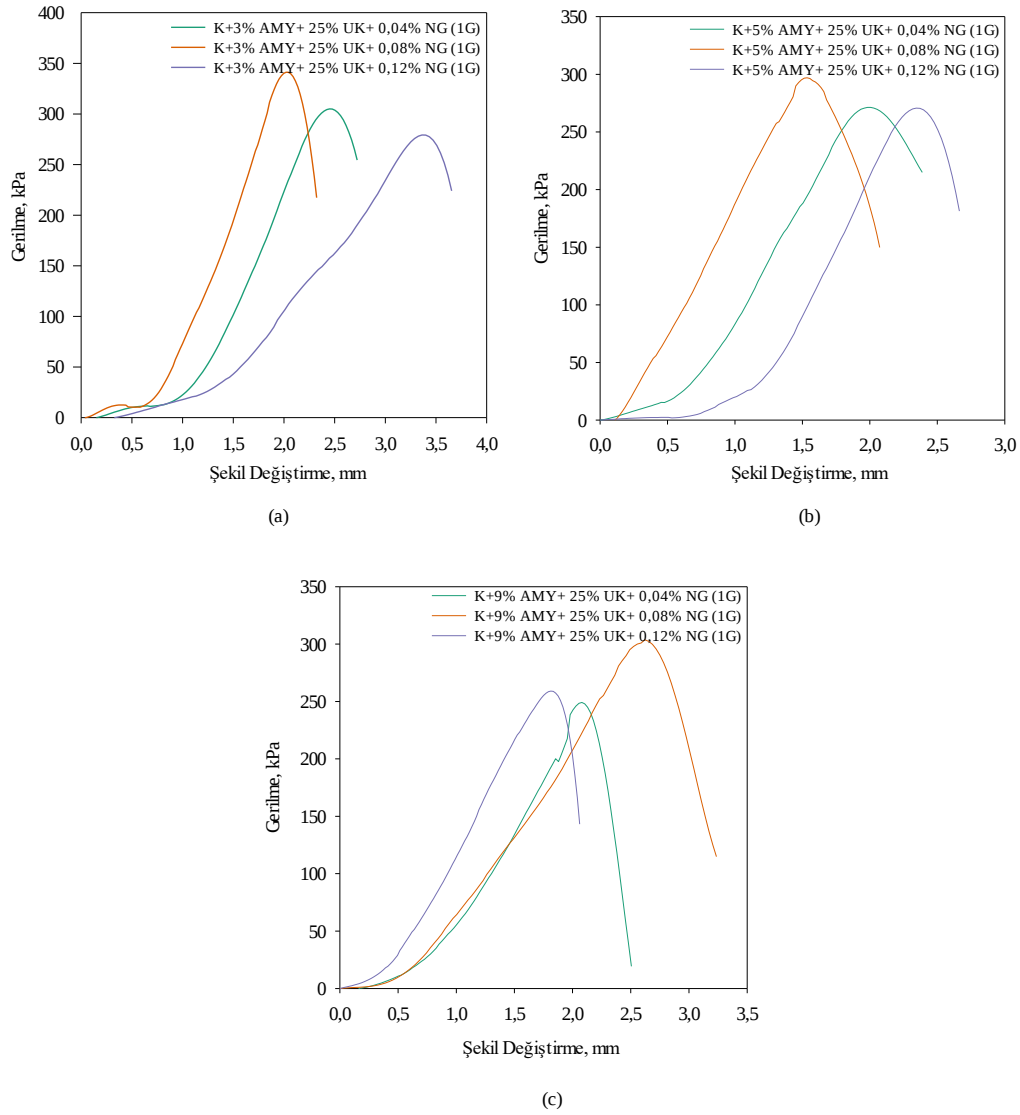
Şekil 6.9. Kirlenme-Kürleme süresi 7 gün olan numunelerin uçucu kül katkılarında gerilme-şekil değiştime grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY

Şekil 6.10'da farklı oranlarda AMY ile kirlenmiş (%3, %5 ve %9), çeşitli oranlarda nano-grafen (%0,04, %0,08 ve %0,12) ilave edilmiş ve nano-grafenin bağlayıcılık özelliği

bulunmamasından dolayı bu özelliği sağlamak için %25 oranında uçucu kül eklenen, kirlenme-kürlenme süresi 1 gün olan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Tüm numunelerde uçucu kül oranının %25 seçilme sebebi ise Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'daki dayanım sonuçlarına göre çeşit olarak en fazla dayanım artışını gösteren oran olmasıdır. Kirlenmiş zeminlere nano-grafen ve uçucu kül ilave edildiği zaman dayanımlarında artış görülmüştür.

Şekil 6.10.a'da 1 günlük %3 AMY ile kirlenmiş zemine %25 uçucu küle beraber %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilave edilmiştir. Sadece kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında nano-grafen katkılarının sağladığı dayanım artışı sırasıyla %128,46, %157,15 ve %109,10'dur. %3 AMY+%25 UK zemin karşılaştırmasında %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilavesinin sağladığı dayanım artışı sırasıyla %88,32, %111,97 ve %72,36'dır. Şekil 6.10.b'de 1 günlük %5 AMY ile kirlenmiş zemine %25 uçucu küle beraber %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilave edilmiştir. Sadece kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında nano-grafen katkılarının sağladığı dayanım artışı sırasıyla %77,29, %98,39 ve %75,87'dir. %5 AMY+%25 UK zemin karşılaştırmasında %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilavesinin sağladığı dayanım artışı sırasıyla %37,23, %53,57 ve %36,14'tür. Şekil 6.10.c'de 1 günlük %9 AMY ile kirlenmiş zemine %25 uçucu küle beraber %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilave edilmiştir. Sadece kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında nano-grafen katkılarının sağladığı dayanım artışı sırasıyla %50,51, %75,05 ve %51,19'dur. %9AMY+%25 UK zemin karşılaştırmasında %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilavesinin sağladığı dayanım artışı sırasıyla %25,66, %46,15 ve %26,23'tür.

Şekil 6.10'daki grafikler ve elde edilen dayanım artışları göz önüne alındığında tüm zemin karışımları için optimum nano-grafen oranı %0,08 olmuştur.

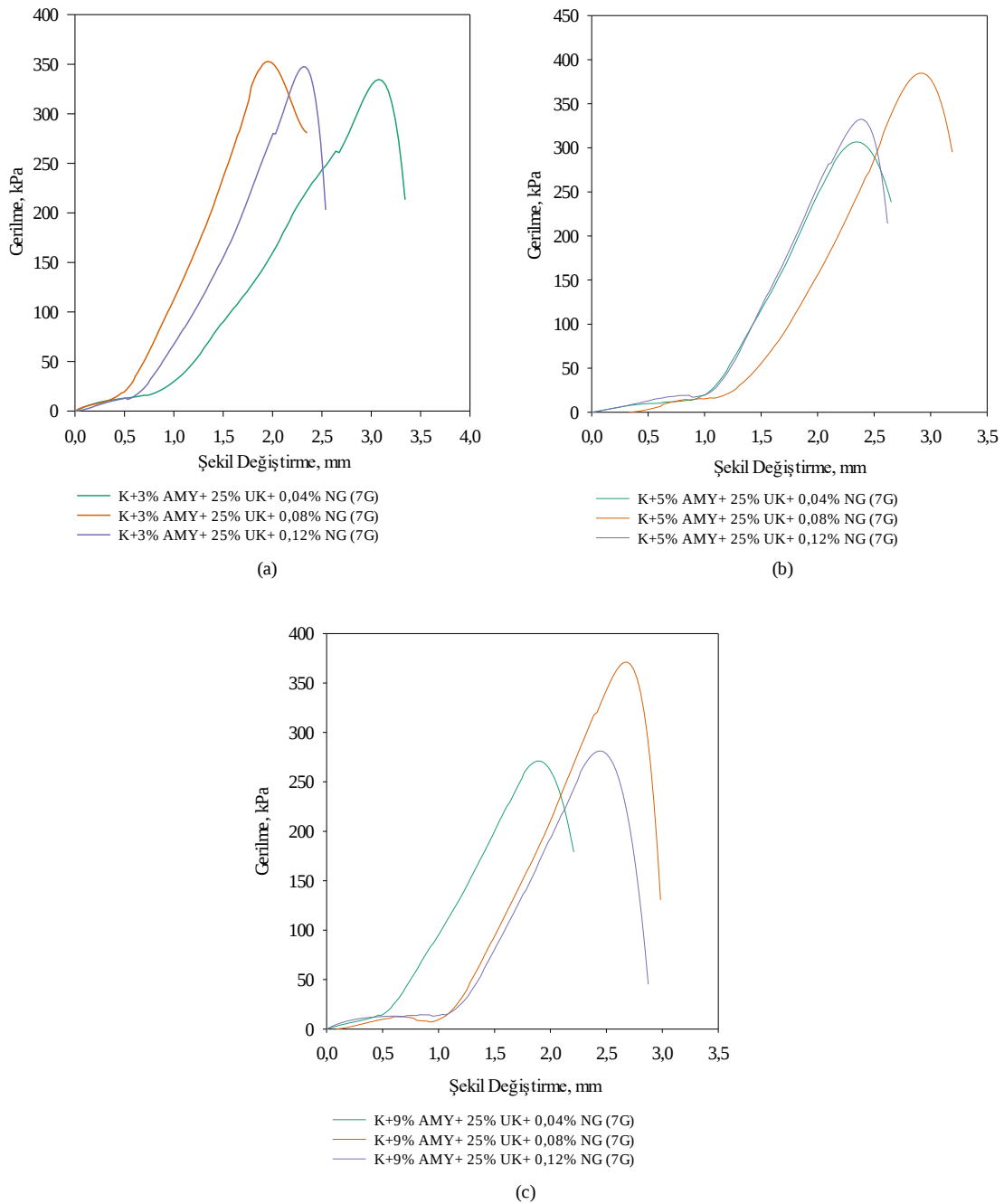


Şekil 6.10. Kirlenme-Kürlenme süresi 1 gün olan numunelerin uçucu kül ve nano-grafen katkılarında gerilme-şekil değiştirme grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY

Şekil 6.11’de farklı oranlarda AMY ile kirlenmiş (%3, %5 ve %9), çeşitli oranlarda nano-grafen (%0,04, %0,08 ve %0,12) ilave edilmiş ve nano-grafenin bağlayıcılık özelliği bulunmamasından dolayı bu özelliği sağlamak için %25 oranında uçucu kül eklenen, kirlenme-kürlenme süresi 7 gün olan zeminlerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.

Şekil 6.11.a’da 7 günlük %3 AMY ile kirlenmiş zemine %25 uçucu küle beraber %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilave edilmiştir. Sadece kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında nano-grafen katkılarının sağladığı dayanım artışı sırasıyla %166,18, %195,34 ve %172,67’dir. %3 AMY+%25 UK zemin karşılaştırmasında %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilavesinin sağladığı dayanım artışı sırasıyla %48,48, %64,75 ve %52,10’dur. Şekil 6.10.b’de 7 günlük %5 AMY ile kirlenmiş zemine %25 uçucu küle beraber %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilave edilmiştir. Sadece kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında nano-

grafen katkılarının sağladığı dayanım artışı sırasıyla %114,65, %178,39 ve %125,68'dir. %5 AMY+%25 UK zemin karşılaştırmasında %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilavesinin sağladığı dayanım artışı sırasıyla %45,03, %88,10 ve %52,48'dir. Şekil 6.10.c'de 7 günlük %9 AMY ile kirlenmiş zemine %25 uçucu küle beraber %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilave edilmiştir. Sadece kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında nano-grafen katkılarının sağladığı dayanım artışı sırasıyla %63,52, %114,10 ve %70,27'dir. %9AMY+%25 UK zemin karşılaştırmasında %0,04, %0,08 ve %0,12 oranlarında nano-grafen ilavesinin sağladığı dayanım artışı sırasıyla %28,30, %67,99 ve %33,60'dır.



Şekil 6.11. Kirlenme-Kürlenme süresi 7 gün olan numunelerin uçucu kül ve nano-grafen katkılarında gerilme-şekil değişime grafikleri: (a) %3 AMY, (b) %5 AMY, (c) %9 AMY

Yapılan UCS deneyleri genel olarak incelendiğinde saf kaolinin UCS dayanımı kirlenmiş zeminlerden daha yüksek çıkmıştır. Kirlenmiş zeminlerde ise durum kirlenme derecesi arttıkça UCS dayanımlarının arttığını göstermektedir. Kirlenme sürelerindeki artış ise dayanımı olumsuz etkilemektedir. Kirlenmiş zeminlere uygulanan uçucu kül iyileştirmelerinde ise tüm oranlarda dayanımda artış görülmektedir ve kür süresi arttıkça ortaya çıkan dayanım artışı daha fazladır. Tüm kirlenme dereceleri bütün olarak ele alındığında en önemli katkıyı 25% UK katkı oranı sağlamıştır ve bu bağlamda nano-grafen için bağlayıcılık oranı da bu sonuçlara göre seçilmiştir. Nano-grafen katkısı, uçucu kül katkısına göre daha yüksek dayanımlara ulaştırmıştır ve kür süresi arttıkça bu değer de artmıştır. Nano-grafen katkısı için optimum oran 0.08% olarak tespit edilmiştir.

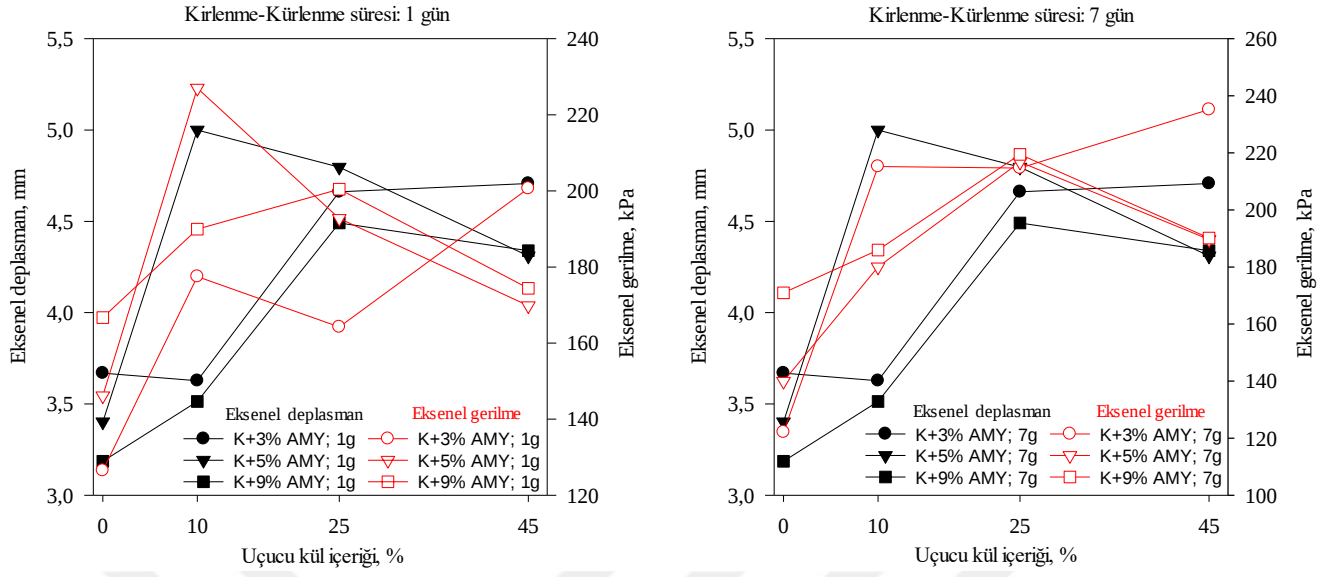
6.3. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin Maksimum Kayma Gerilmeleri

Tez çalışmasının bu başlığı altında yapılan tek eksenli serbest basınç dayanım deneyleri sonucunda elde edilen, numunelerin maksimum kayma gerilmelerinin kirlenme derecesine, kirlenme süresine ve meydana getirilen zemin karışımlarının oranlarına göre değişimi incelenmiştir.

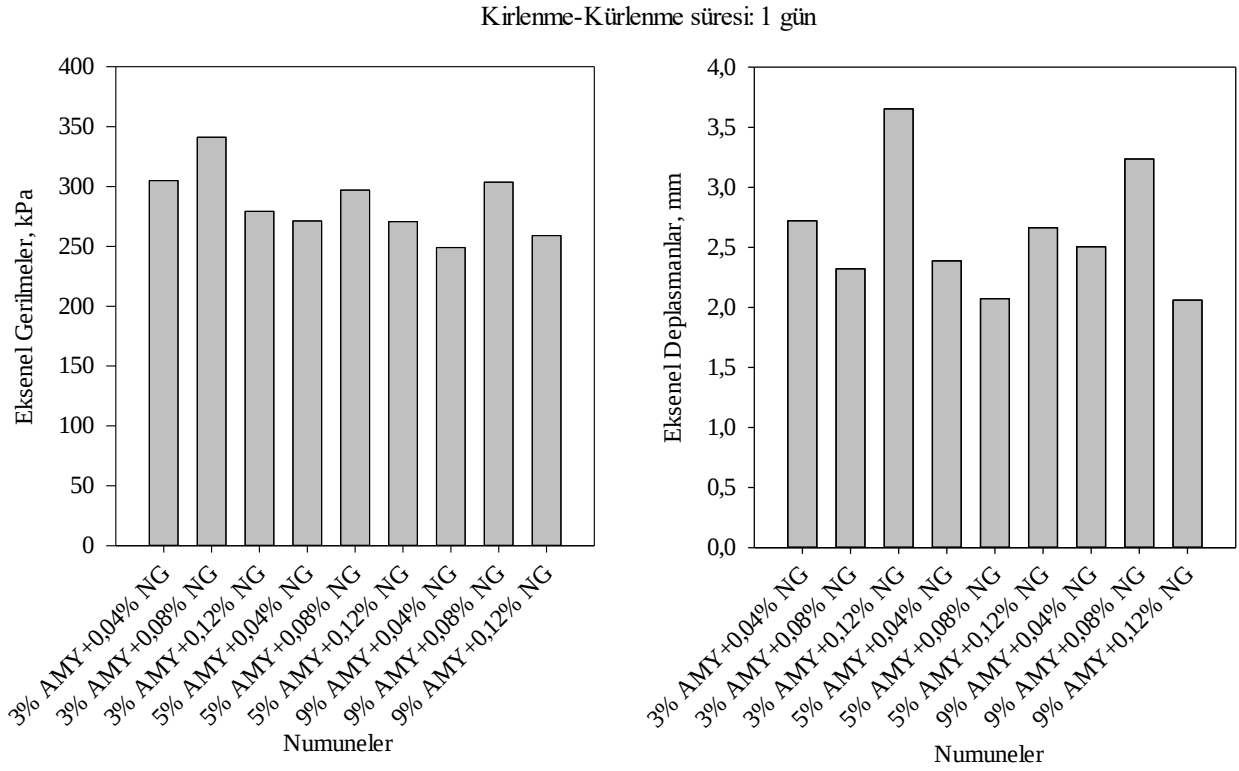
Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14' teki grafikler ikiye ayrılmaktadır. İlk kısım farklı oranlardaki atık motor yağı kirlenmesi ve bu kirliliğin belirlenen oranlarda uçucu külle iyileştirilmesi sonucu ortaya çıkan eksenel gerilme ve eksenel deplasman değerlerinden oluşmaktadır. İkinci kısım ise nano-grafen ilavesi sonunda meydana gelen maksimum kayma gerilmelerini vermektedir.

Atık motor yağı ile kirlenmiş zeminlerin maksimum gerilmeleri saf zemine göre her zaman düşük çıkmıştır. Motor yağı zeminler kendi içinde karşılaştırıldığında ise motor yağı oranı arttıkça maksimum gerilmelerinde artış görülmüştür. Kirlenme süreleri bakımından karşılaştırıldığında ise kirlenme süresi arttıkça maksimum gerilmelerinde azalma görülmüştür.

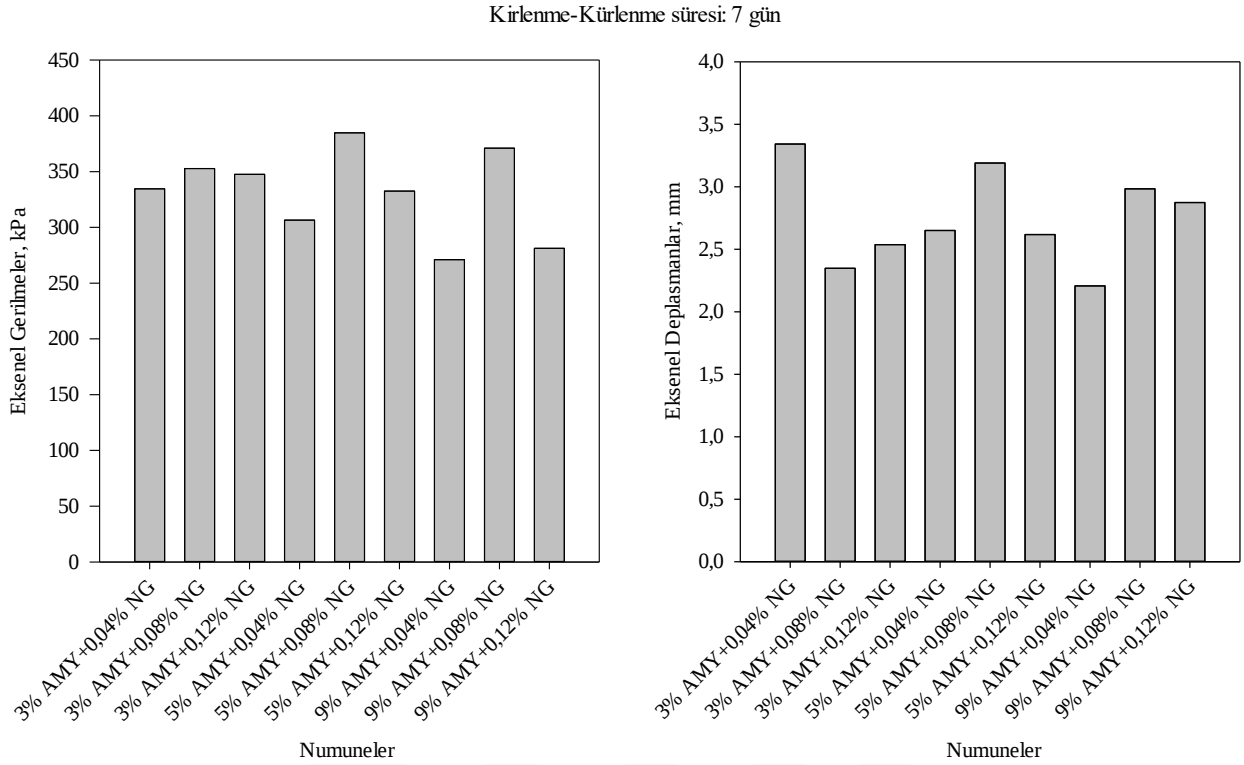
Kirlenmiş zeminlere uygulanan iyileştirmeler sonucu her iki yöntem için de maksimum gerilmelerinde artış görülmektedir. Alt başlık 6.2'de detaylıca anlatılan artış yüzdeleri dikkate alındığında ise nano-grafen ve uçucu kül ilavesinin sadece uçucu kül ilavesine göre oldukça yüksek çıktığı görülmektedir. Şekil 6.12 de kirlenmiş zeminlerin ve bu zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi sonucu ortaya çıkan eksenel gerilme ve eksenel deplasman değerleri, kirlenme-kürlenme sürelerine göre verilmiştir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te ise nano-grafen ve uçucu kül kombinasyonlarının kirlenmiş zemin üzerindeki maksimum gerilmeleri verilmiştir.



Şekil 6.12. Kirlenmiş ve uçucu kül katkıli zeminlere ait eksenel gerilme ve eksenel deplasman grafikleri



Şekil 6.13. Nano-grafen ve uçucu kül katkıli kirlenmiş zeminlerin eksenel gerilme ve eksenel deplasman grafikleri



Şekil 6.14. Nano-grafen ve uçucu kül katkılı kirlenmiş zeminlerin eksenel gerilme ve eksenel deplasman grafikleri

6.4. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin Konsolidasyon Parametreleri

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda numunelerden elde edilen konsolidasyon parametreleri incelenmiştir. Konsolidasyon deney programı Tablo 6.2’de verilmiştir. Boşluk oranı (e), sıkışma katsayısı (av), hacimsel sıkışma katsayısı (mv), konsolidasyon katsayısı (cv), sıkışma indisi (cc) ve şişme indisi (cs) incelenen parametreler olup Şekil 6.15 ile Şekil 6.29 arasında ve Tablo 6.3 ile Tablo 6.30 arasında gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Konsolidasyon Deney Programı

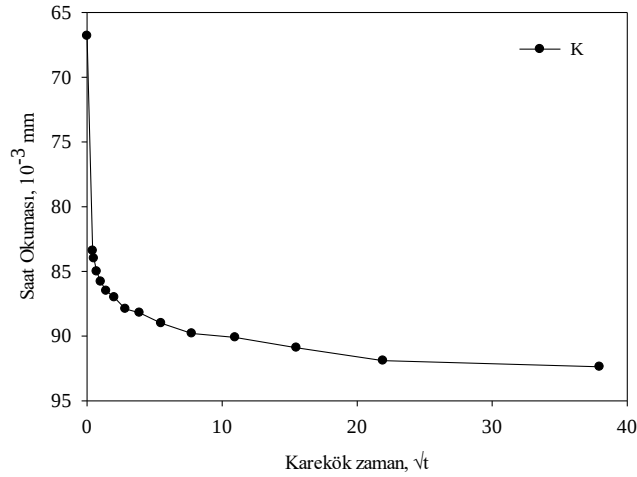
Numune	ZEMİN	AMY (%)	STBLZTR (%)	Test Numunelerinin Boyutu (cm)		Kirlenme- Kürlenme Süresi (Gün)	Uygulanan Basınç (kPa)
				H	D		
N1	K	-	-				
N2	K	3	-				
N3	K	5	-				
N4	K	9	-				
N5	K	3	10 UK				
N6	K	5	10 UK				
N7	K	9	10 UK				
N8	K	3	25 UK	2	5	1, 7	25, 50, 100, 200, 400
N9	K	5	25 UK				
N10	K	9	25 UK				
N11	K	3	45 UK				
N12	K	5	45 UK				
N13	K	9	45 UK				
N14	K	3	25 UK+ 0,08 NG				
N15	K	5	25 UK+ 0,08 NG	2	5	7	25, 50, 100, 200, 400
N16	K	9	25 UK+ 0,08 NG				

K: Kaolin, AMY: Atık Motor Yağı, STBLZTR: Stabilizatör, UK: Uçucu Kül, NG: Nano-grafen H: Yükseklik, D: Çap

Şekil 6.15'te karekök zaman- saat okuması grafiği verilen saf kaolin kilinin konsolidasyon parametreleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3. Saf kaolinin konsolidasyon parametreleri

Saf Kaolin (K)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,661358	0,652988	0,635831	0,618003	0,596598
av	m ² /kN	0,000279	0,000186	0,000127	0,000079	0,000048
mv	m ² /kN	0,000167	0,000111	0,000076	0,000047	0,000028
cv	cm ² /dk	0,221342	0,230228	0,252584	0,356024	0,462635
	m ² /yıl	11,633721	12,100809	13,275803	18,712603	24,316080
cs	-	0,027803				
cc	-	0,071106				



Şekil 6.15. Saf kaolinin karekök zaman-saat okuması grafiği

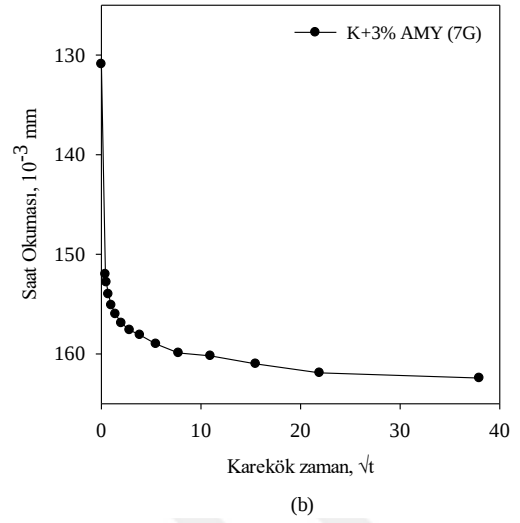
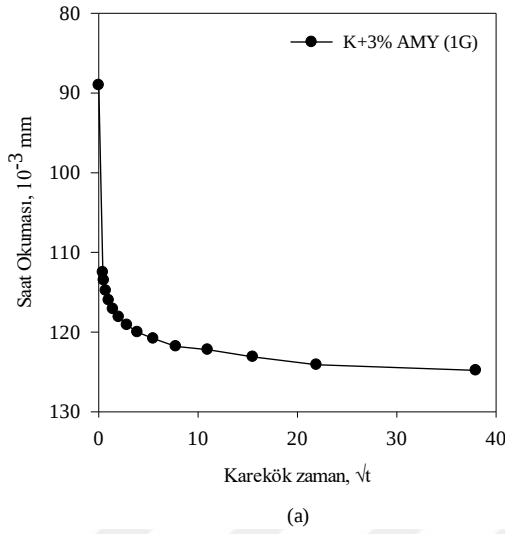
Şekil 6.16 ile Şekil 6.18 arasındaki grafiklerde ve Tablo 6.4 ile Tablo 6.9 arasında da kirlenmiş zeminlerin günlere bağlı konsolidasyon parametreleri verilmiştir. Tablolar incelendiğinde kirlenmiş zeminlerin güne bağlı değişimlerinde boşluk oranı (e) 3% AMY için artış, 5% ve 9% AMY için azalma göstermiştir. Boşluk oranı, AMY oranlarına göre incelendiğinde ise en yüksek AMY oranında en düşük boşluk oranı değeri elde edilmiştir. Konsolidasyon katsayısında (cv) kirlenme oranları açısından bakıldığında, AMY arttıkça cv değerlerinde artış görülmektedir. Kirlenme günleri dikkate alınarak karşılaştırıldığında ise 3% ve 5% AMY de azalma görülürken, 9% AMY içinse cv değerinde artış görülmektedir fakat bu değişimler birbirine yakındır. Kirlenmiş zeminler, saf kaolin ile karşılaştırıldığında ise boşluk oranı ve konsolidasyon katsayısı saf kaolinde en yüksek değere sahiptir. Buna göre, boşluk oranlarındaki azalma 1 günlük numunelerde %3, %5 ve 9% AMY zemin için sırasıyla %20,38, %6,18 ve %20,68'dir. 7 günlük numunelerde ise sırasıyla %16,70, %10,38 ve %25,45 şeklindedir. Konsolidasyon katsayısındaki azalma ise 1 günlük numunelerde %3, %5 ve 9% AMY zemin için sırasıyla %27,01, %22,77 ve %10,32 iken 7 günlük numunelerde ise sırasıyla %40,69, %24,33 ve %10,17 olmuştur. Saf kaolin ve AMY ile kirlenmiş zeminlerin cv değerlerinde meydana gelen değişiklikler Singh vd. (2008) çalışmasında da görülmektedir. Saf zemin ve kirlenmiş zeminler karşılaştırıldığında en yüksek cv değeri saf zeminedir. Aynı zamanda AMY zemin karşılaştırılmasında da AMY arttıkça cv değeri artmıştır [95].

Tablo 6.4. K+3% AMY zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

K+3% AMY (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,559956289	0,552877019	0,531481895	0,503164818	0,475005059
av	m ² /kN	0,000660732	0,000353963	0,000356585	0,000283171	0,000140799
mv	m ² /kN	0,00042	0,000225	0,000226667	0,00018	0,0000895
cv	cm ² /dk	0,058233501	0,207508446	0,214311085	0,308148708	0,337676201
	m ² /yıl	3,060752828	10,9066439	11,26419062	16,19629608	17,74826115
cs	-	0,023516823				
cc	-	0,093544696				

Tablo 6.5. K+3% AMY zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

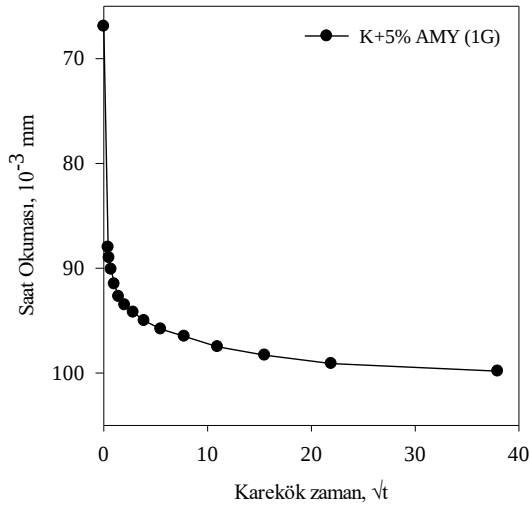
K+3% AMY (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,594189432	0,573171451	0,545473337	0,522663124	0,496981269
av	m ² /kN	0,000780254	0,000467066	0,000205171	0,000101379	5,70708E-05
mv	m ² /kN	0,000478889	0,000286667	0,000125926	6,22222E-05	3,50278E-05
cv	cm ² /dk	0,181511807	0,193208328	0,244650699	0,25092402	0,274386268
	m ² /yıl	9,540260593	10,15502972	12,85884076	13,18856648	14,42174227
cs	-	0,069820222				
cc	-	0,085313275				

**Şekil 6.16.** 3% AMY zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün**Tablo 6.6.** K+5% AMY zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

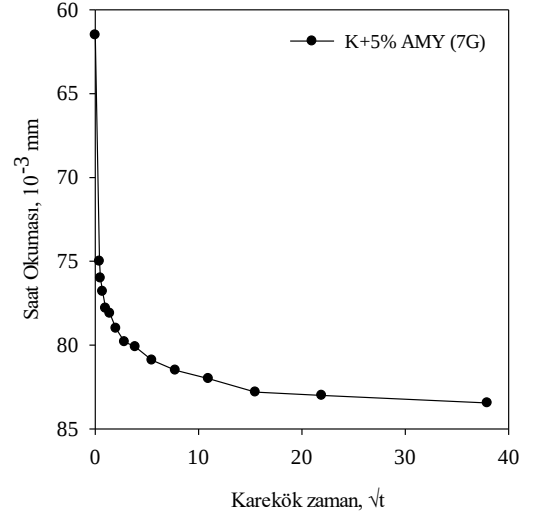
K+5% AMY (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,6336226	0,62894385	0,609736353	0,586753018	0,559727079
av	m ² /kN	0,00040221	0,00023394	0,000320125	0,000229833	0,00013513
mv	m ² /kN	0,000245	0,0001425	0,000195	0,00014	8,23125E-05
cv	cm ² /dk	0,18457975	0,20192126	0,209310111	0,302851592	0,3573035
	m ² /yıl	9,70151181	10,6129812	11,00133944	15,91787966	18,77987195
cs	-	0,01554247				
cc	-	0,08977823				

Tablo 6.7. K+5% AMY zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+5% AMY (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,59228811	0,58716332	0,569867157	0,552250693	0,534674266
av	m ² /kN	0,00046043	0,00025624	0,000288269	0,000176165	8,78821E-05
mv	m ² /kN	0,0002875	0,00016	0,00018	0,00011	0,000054875
cv	cm ² /dk	0,08497163	0,08694903	0,216656679	0,314733068	0,350068781
	m ² /yıl	4,46610893	4,5700412	11,38747505	16,54237003	18,39961511
cs	-	0,01702418				
cc	-	0,05838762				



(a)



(b)

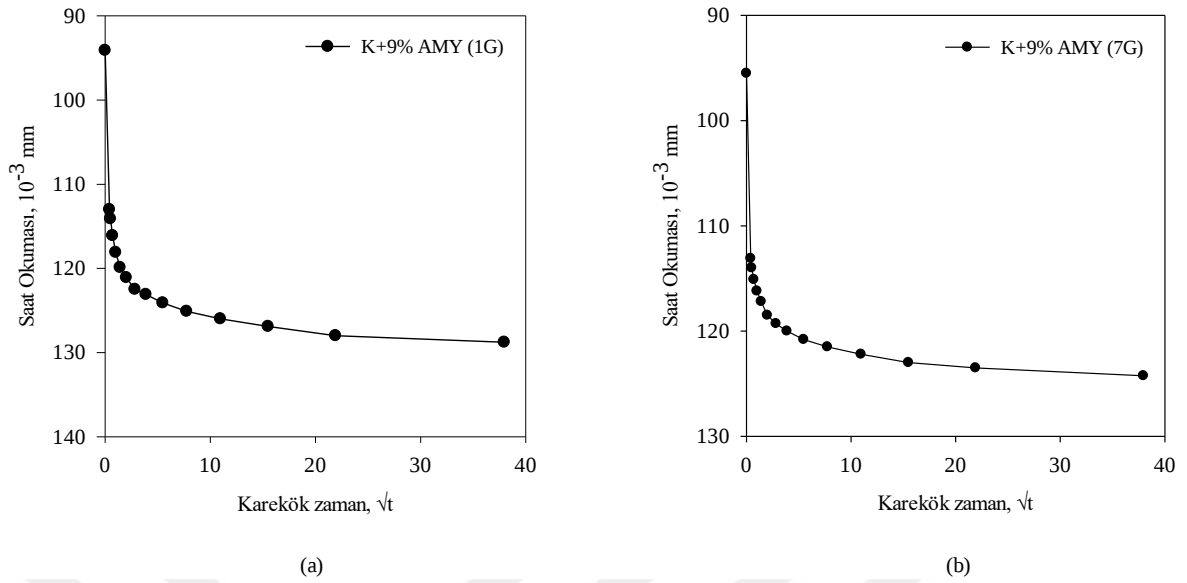
Şekil 6.17. 5% AMY zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

Tablo 6.8. K+9% AMY zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,56509912	0,55336816	0,525890943	0,50053947	0,473239399
av	m ² /kN	0,0002117	0,00026069	0,000203535	0,000112673	6,06668E-05
mv	m ² /kN	0,00013444	0,00016556	0,000129259	7,15556E-05	3,85278E-05
cv	cm ² /dk	0,09365304	0,15718386	0,360322342	0,305916331	0,414888166
	m ² /yıl	4,92240378	8,26158376	18,93854231	16,07896237	21,80652202
cs	-	0,03896941				
cc	-	0,09068887				

Tablo 6.9. K+9% AMY zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,5227246	0,5111713	0,486986398	0,466883661	0,444739841
av	m ² /kN	0,00039367	0,00025674	0,000179147	8,93455E-05	4,92085E-05
mv	m ² /kN	0,00025556	0,00016667	0,000116296	0,000058	3,19444E-05
cv	cm ² /dk	0,20956901	0,2162612	0,277880188	0,346454923	0,415574965
	m ² /yıl	11,0149471	11,3666887	14,60538266	18,20967075	21,84262015
cs	-	0,03837922				
cc	-	0,07356018				



Şekil 6.18. 9% AMY zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

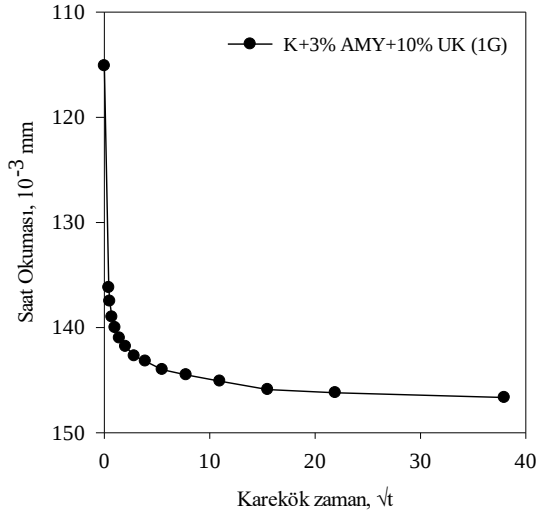
Şekil 6.19 ile Şekil 6.21 arasındaki grafiklerde ve Tablo 6.10 ile Tablo 6.15 arasında kirlenmiş zeminlerin (3%, 5% ve 9%) ve uçucu kül ilavesi (10%) sonucunda günlere bağlı konsolidasyon parametreleri verilmiştir. Numuneler kirlenme-kürlenme sürelerine göre kendi içinde karşılaştırılmıştır. 1 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında e ve cv değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı için sırasıyla %28,57, %51,97 ve %50,93 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (cv) için sırasıyla %19,44, %45,12 ve %45,72 şeklindedir. 7 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında da e ve cv değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı için sırasıyla %39,01, %31,28 ve %38,75 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (cv) için sırasıyla %27,32, %43,19 ve %46,71 şeklindedir.

Tablo 6.10. K+3% AMY+10% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

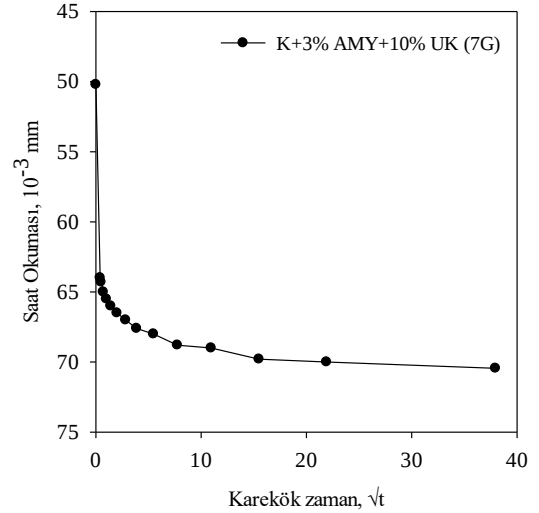
K+3% AMY+10% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,410355833	0,402985013	0,382462338	0,362084188	0,33928523
av	m ² /kN	0,000775622	0,000163796	0,00015202	9,05696E-05	5,06644E-05
mv	m ² /kN	0,000536667	0,000113333	0,000105185	6,26667E-05	3,50556E-05
cv	cm ² /dk	0,206911111	0,204908002	0,257133349	0,264537928	0,272047454
	m ² /yıl	10,87524798	10,76996458	13,51492883	13,9041135	14,29881416
cs	-	0,024485334				
cc	-	0,075736499				

Tablo 6.11. K+3% AMY+10% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+3% AMY+10% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,341207466	0,337087946	0,327633311	0,316760482	0,303085028
av	m ² /kN	0,000472732	0,000205976	0,000157577	0,000108728	6,83773E-05
mv	m ² /kN	0,00035	0,0001525	0,000116667	0,0000805	0,000050625
cv	cm ² /dk	0,087624806	0,133376517	0,155987693	0,193369053	0,199403973
	m ² /yıl	4,605559816	7,010269714	8,198713134	10,16347741	10,4806728
cs	-	0,013684747				
cc	-	0,045428874				



(a)



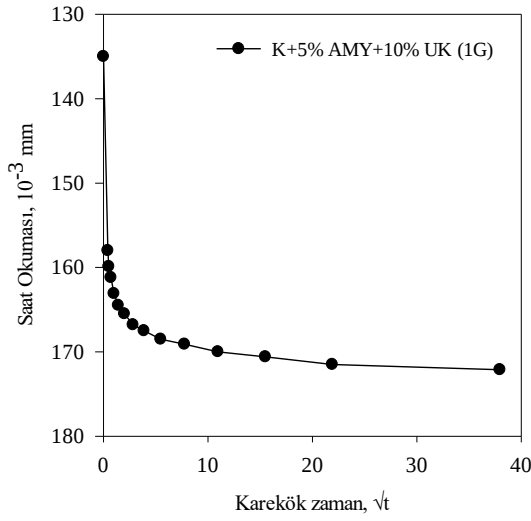
(b)

Şekil 6.19. 3% AMY+10% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün**Tablo 6.12.** K+5% AMY+10% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

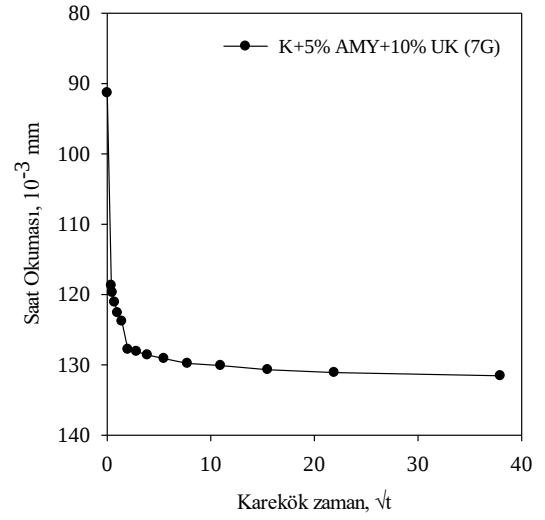
K+5% AMY+10% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,35737826	0,34675801	0,314619629	0,294559168	0,268789458
av	m ² /kN	0,00154445	0,00053101	0,00053564	0,000200605	0,000128849
mv	m ² /kN	0,0011125	0,0003825	0,000385833	0,0001445	9,28125E-05
cv	cm ² /dk	0,20939798	0,18239305	0,4274991	0,196937396	0,196066153
	m ² /yıl	11,005958	9,58657882	22,46935267	10,35102953	10,30523699
cs	-	0,03527969				
cc	-	0,08560512				

Tablo 6.13. K+5% AMY+10% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+5% AMY+10% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,43945479	0,43499057	0,421378363	0,396861745	0,367405212
av	m ² /kN	0,00121119	0,00022321	0,00022687	0,000245166	0,000147283
mv	m ² /kN	0,0008275	0,0001525	0,000155	0,0001675	0,000100625
cv	cm ² /dk	0,11440654	0,12573961	0,166812123	0,196489958	0,198854357
	m ² /yıl	6,01320768	6,60887416	8,767645203	10,3275122	10,451785
cs	-	0,01482982				
cc	-	0,09785249				



(a)



(b)

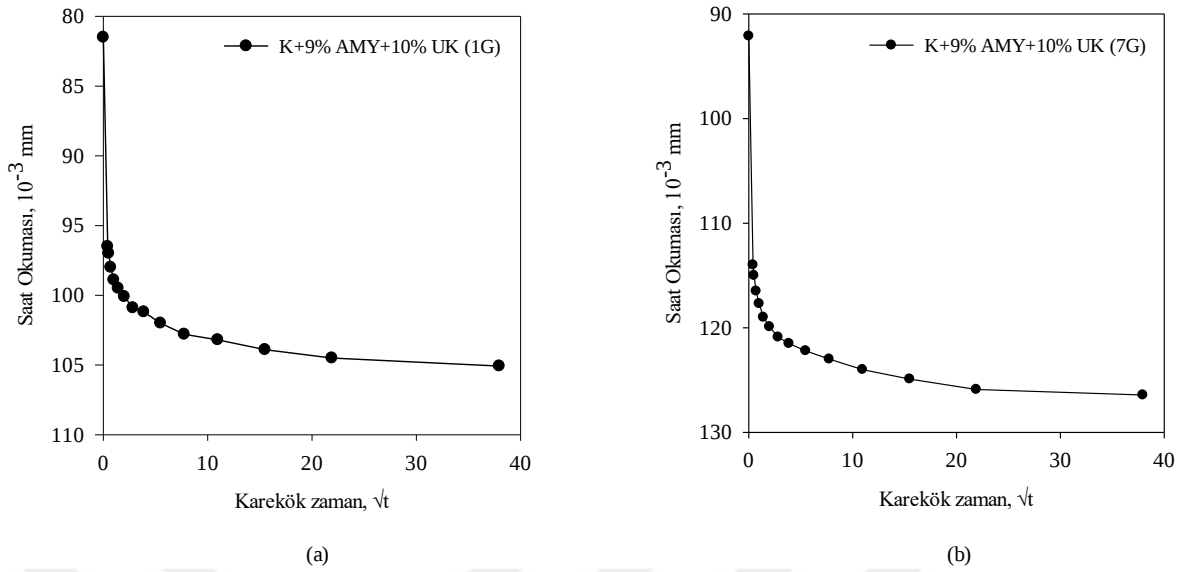
Şekil 6.20. 5% AMY+10% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

Tablo 6.14. K+9% AMY+10% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY+10% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,28687283	0,27848443	0,26079724	0,247531851	0,232201872
av	m ² /kN	0,00068278	0,00041942	0,000294786	0,000132654	7,66499E-05
mv	m ² /kN	0,000525	0,0003225	0,000226667	0,000102	5,89375E-05
cv	cm ² /dk	0,20564635	0,1870481	0,212543938	0,218453003	0,22519712
	m ² /yıl	10,8087722	9,83124839	11,17130939	11,48188986	11,83636061
cs	-	0,02786569				
cc	-	0,05092509				

Tablo 6.15. K+9% AMY+10% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY+10% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,33599816	0,32669398	0,311345489	0,29572534	0,272413965
av	m ² /kN	0,00111378	0,00046521	0,000255808	0,000156201	0,000116557
mv	m ² /kN	0,00082	0,0003425	0,000188333	0,000115	8,58125E-05
cv	cm ² /dk	0,16477033	0,1938632	0,199923465	0,205398666	0,221439392
	m ² /yıl	8,66032879	10,1894497	10,5079773	10,7957539	11,63885443
cs	-	0,0309078				
cc	-	0,07743871				



Şekil 6.21. 9% AMY+10% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

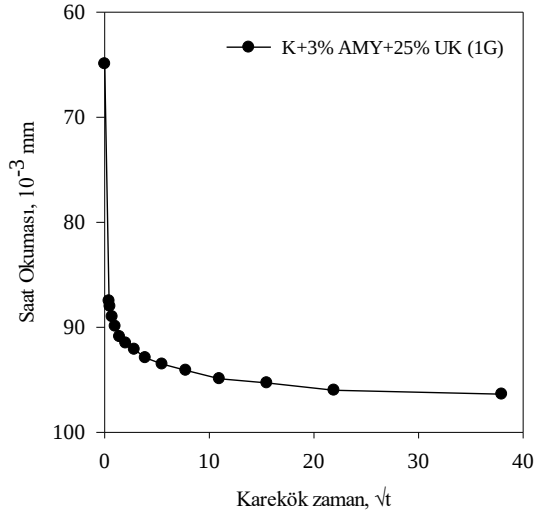
Şekil 6.22 ile Şekil 6.24 arasındaki grafiklerde ve Tablo 6.16 ile Tablo 6.21 arasında kirlenmiş zeminlerin (3%, 5% ve 9%) ve uçucu kül ilavesi (25%) sonucunda günlere bağlı konsolidasyon parametreleri verilmiştir. Numuneler kirlenme-kürlenme sürelerine göre kendi içinde karşılaştırılmıştır. 1 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında e ve c_v değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı (e) için sırasıyla %30,33, %55,26 ve %52,31 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (c_v) için sırasıyla %35,93, %36,11 ve %42,24 şeklindedir. 7 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında da e ve c_v değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı (e) için sırasıyla %47,14, %56,29 ve %58,32 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (c_v) için sırasıyla %37,10, %39,67 ve %49,92 şeklindedir.

Tablo 6.16. K+3% AMY+25% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

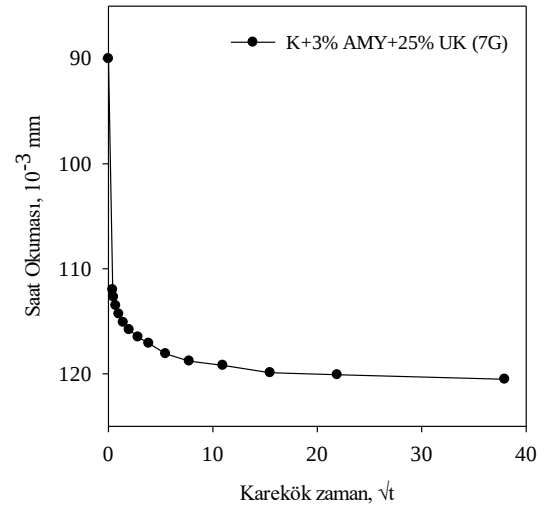
K+3% AMY+25% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,389226658	0,383423648	0,369999817	0,352940365	0,330934372
a_v	m^2/kN	0,000454453	0,000290151	0,000223731	0,000170595	0,00011003
m_v	m^2/kN	0,000325	0,0002075	0,00016	0,000122	7,86875E-05
c_v	cm^2/dk	0,210624239	0,230891732	0,227700615	0,222686755	0,216342911
	$m^2/yıl$	11,07041001	12,13566946	11,96794432	11,70441584	11,37098342
c_s	-	0,019277183				
c_c	-	0,073102328				

Tablo 6.17. K+3% AMY+25% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+3% AMY+25% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,332921455	0,321567437	0,300807722	0,283205635	0,262697859
av	m ² /kN	0,000238875	0,000252312	0,000153776	7,82315E-05	4,55728E-05
mv	m ² /kN	0,000177778	0,000187778	0,000114444	5,82222E-05	3,39167E-05
cv	cm ² /dk	0,093469952	0,098382061	0,110767462	0,125446798	0,17258195
	m ² /yıl	4,912780677	5,170961133	5,821937797	6,593483685	9,070907311
cs	-	0,037717233				
cc	-	0,068125357				



(a)



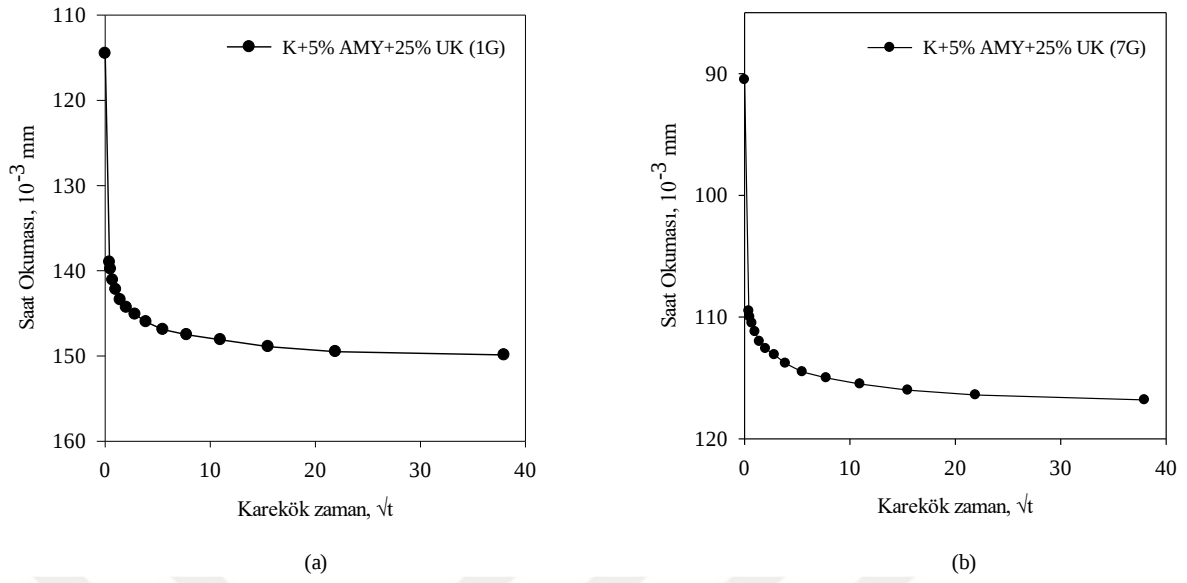
(b)

Şekil 6.22. 3% AMY+25% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün**Tablo 6.18.** K+5% AMY+25% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

K+5% AMY+25% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,33176427	0,31926102	0,294930391	0,274316938	0,250408711
av	m ² /kN	0,00099688	0,00062516	0,000405511	0,000206135	0,000119541
mv	m ² /kN	0,0007375	0,0004625	0,0003	0,0001525	8,84375E-05
cv	cm ² /dk	0,18946443	0,19404124	0,219655255	0,212167401	0,228274503
	m ² /yıl	9,95825029	10,1988078	11,54508022	11,15151862	11,99810787
cs	-	0,04153487				
cc	-	0,07942141				

Tablo 6.19. K+5% AMY+25% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+5% AMY+25% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,28872821	0,28145651	0,266061474	0,250928482	0,233699145
av	m ² /kN	0,00107438	0,00036358	0,000256584	0,00015133	8,61467E-05
mv	m ² /kN	0,00082	0,0002775	0,000195833	0,0001155	0,00006575
cv	cm ² /dk	0,18914962	0,19796428	0,200366337	0,205751957	0,211186256
	m ² /yıl	9,94170397	10,4050025	10,53125467	10,81432288	11,09994962
cs	-	0,02415606				
cc	-	0,05723462				



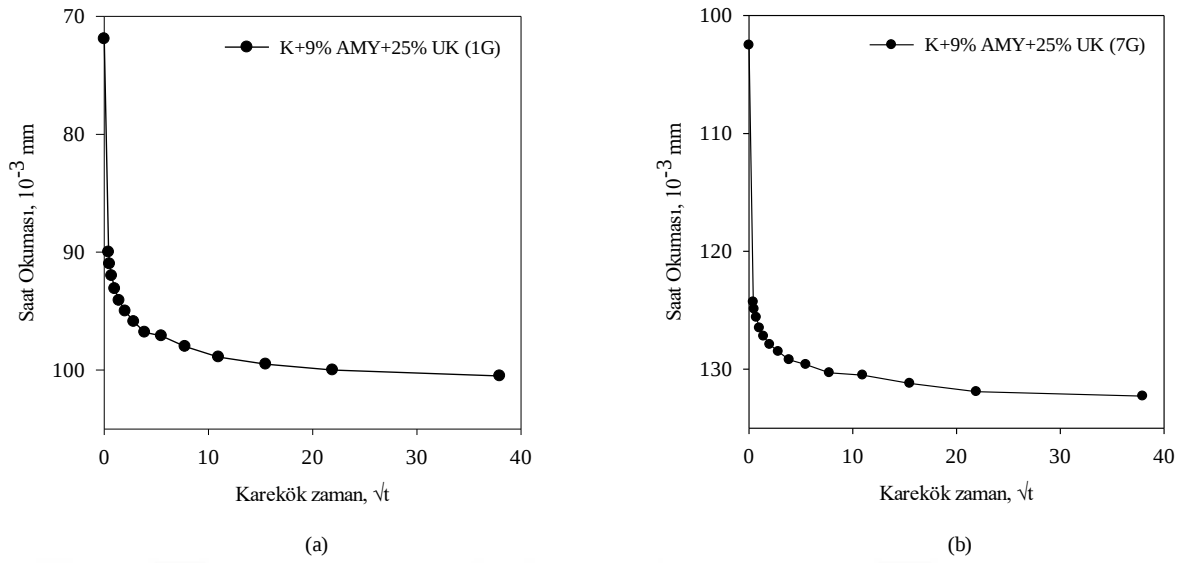
Şekil 6.23. 5% AMY+25% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

Tablo 6.20. K+9% AMY+25% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY+25% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,28204266	0,27494458	0,260167666	0,244164717	0,225709704
av	m ² /kN	0,00042588	0,0003549	0,000246282	0,000160029	9,22751E-05
mv	m ² /kN	0,00033	0,000275	0,000190833	0,000124	0,0000715
cv	cm ² /dk	0,21060311	0,21015038	0,215131686	0,22113422	0,239653597
	m ² /yıl	11,0692994	11,0455042	11,30732141	11,62281459	12,59619304
cs	-	0,02357932				
cc	-	0,06130623				

Tablo 6.21. K+9% AMY+25% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY+25% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,24722002	0,24055616	0,223039742	0,204254014	0,185357222
av	m ² /kN	0,0011043	0,00033319	0,00029194	0,000187857	9,4484E-05
mv	m ² /kN	0,00087	0,0002625	0,00023	0,000148	7,44375E-05
cv	cm ² /dk	0,17217128	0,18466613	0,21002595	0,203881908	0,208137596
	m ² /yıl	9,04932237	9,70605197	11,03896394	10,71603306	10,93971207
cs	-	0,02213685				
cc	-	0,06277379				



Şekil 6.24. 9% AMY+25% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

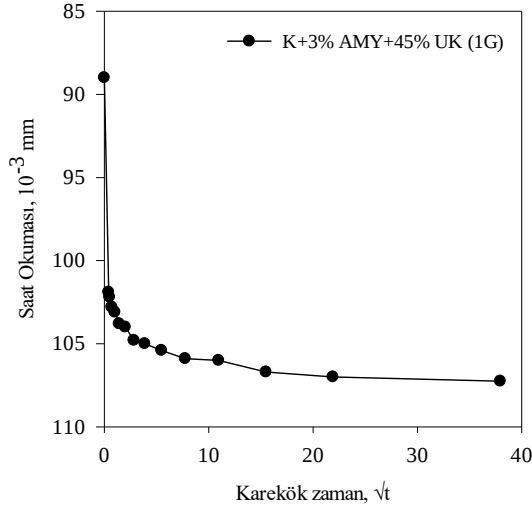
Şekil 6.25 ile Şekil 6.27 arasındaki grafiklerde ve Tablo 6.22 ile Tablo 6.27 arasında kirlenmiş zeminlerin (3%, 5% ve 9%) ve uçucu kül ilavesi (45%) sonucunda günlere bağlı konsolidasyon parametreleri verilmiştir. Numuneler kirlenme-kürlenme sürelerine göre kendi içinde karşılaştırılmıştır. 1 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında e ve c_v değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı (e) için sırasıyla %2,48, %42,55 ve %49,96 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (c_v) için sırasıyla %21,42, %38,80 ve %31,67 şeklindedir. 7 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında da e ve c_v değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı (e) için sırasıyla %21,69, %38,95 ve %40,71 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (c_v) için sırasıyla %27,59, %31,94 ve %37,49 şeklindedir.

Tablo 6.22. K+3% AMY+45% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

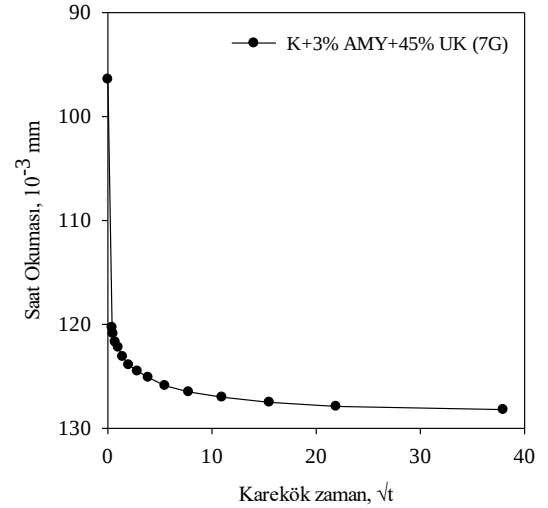
K+3% AMY+45% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,513072577	0,505960239	0,489339015	0,477356272	0,463247558
a_v	m^2/kN	0,001654392	0,000355617	0,00027702	0,000119827	7,05436E-05
m_v	m^2/kN	0,00107	0,00023	0,000179167	0,0000775	0,000045625
c_v	cm^2/dk	0,207487472	0,16700023	0,245562581	0,25485699	0,265339531
	$m^2/yıl$	10,90554152	8,777532088	12,90676927	13,39528338	13,94624576
c_s	-	0,023626675				
c_c	-	0,046868133				

Tablo 6.23. K+3% AMY+45% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+3% AMY+45% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,472300671	0,460203433	0,433708255	0,412779291	0,389178545
av	m ² /kN	0,000267178	0,000268828	0,000196261	9,30176E-05	5,24461E-05
mv	m ² /kN	0,00018	0,000181111	0,000132222	6,26667E-05	3,53333E-05
cv	cm ² /dk	0,115383417	0,187636485	0,191752682	0,194911384	0,198670136
	m ² /yıl	6,064552393	9,86217366	10,07852096	10,24454236	10,44210237
cs	-	0,040186155				
cc	-	0,078399984				



(a)



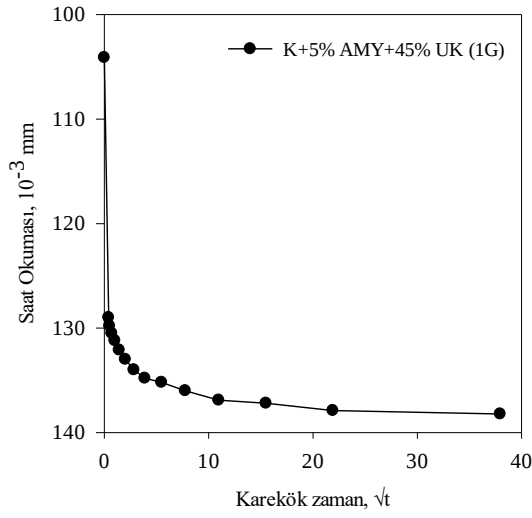
(b)

Şekil 6.25. 3% AMY+45% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün**Tablo 6.24.** K+5% AMY+45% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

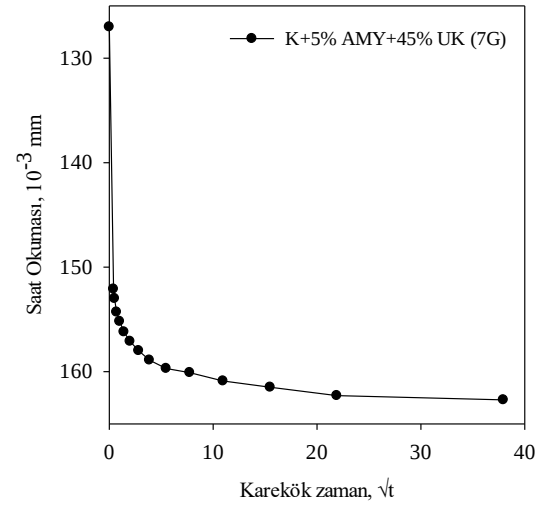
K+5% AMY+45% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,40481574	0,39260674	0,367265966	0,345758252	0,321535455
av	m ² /kN	0,00032967	0,00027131	0,000187709	9,55898E-05	5,38284E-05
mv	m ² /kN	0,00023222	0,00019111	0,000132222	6,73333E-05	3,79167E-05
cv	cm ² /dk	0,2206868	0,22802451	0,24728952	0,214473065	0,218660755
	m ² /yıl	11,5992981	11,9849684	12,99753718	11,27270431	11,49280929
cs	-	0,04055742				
cc	-	0,08046639				

Tablo 6.25. K+5% AMY+45% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+5% AMY+45% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,41277946	0,39906246	0,373505508	0,35220805	0,326434517
av	m ² /kN	0,00069147	0,00030482	0,000189311	9,46554E-05	5,72745E-05
mv	m ² /kN	0,00047889	0,00021111	0,000131111	6,55556E-05	3,96667E-05
cv	cm ² /dk	0,19745962	0,20099544	0,216531752	0,233173831	0,238241725
	m ² /yıl	10,3784776	10,5643202	11,38090888	12,25561657	12,52198507
cs	-	0,04556691				
cc	-	0,08561782				



(a)



(b)

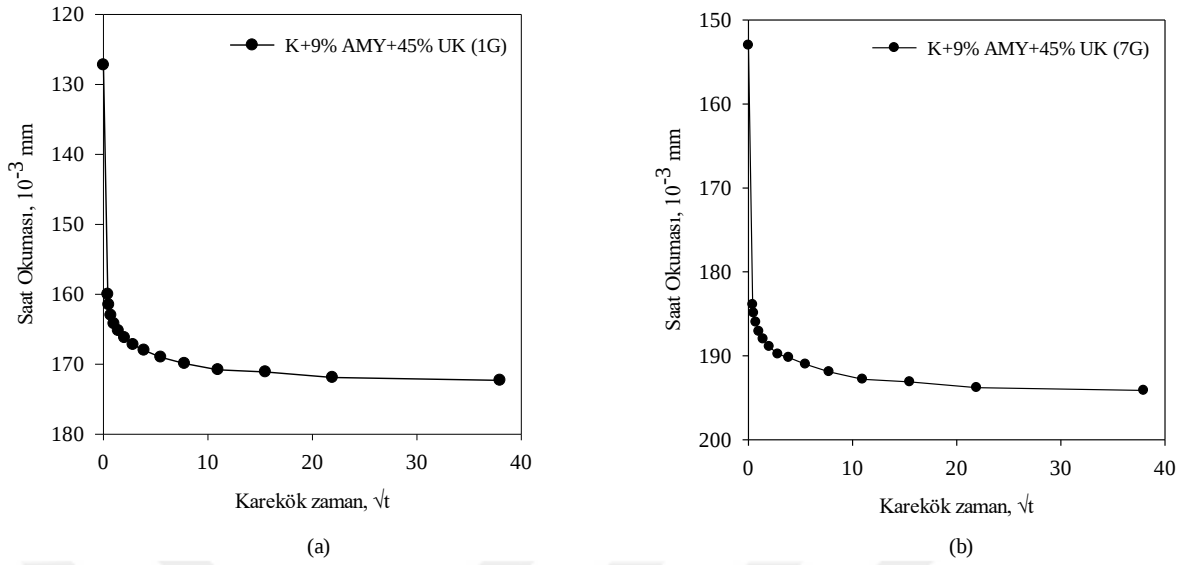
Şekil 6.26. 5% AMY+45% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

Tablo 6.26. K+9% AMY+45% UK zeminin 1 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY+45% UK (1G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,33275473	0,31752905	0,28809273	0,267318133	0,236799098
av	m ² /kN	0,00045865	0,00033835	0,000218047	9,23315E-05	6,78201E-05
mv	m ² /kN	0,00033889	0,00025	0,000161111	6,82222E-05	5,01111E-05
cv	cm ² /dk	0,20877933	0,20947861	0,206652614	0,209363825	0,283502388
	m ² /yıl	10,9734414	11,0101956	10,86166137	11,00416266	14,90088551
cs	-	0,05057862				
cc	-	0,10138204				

Tablo 6.27. K+9% AMY+45% UK zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

K+9% AMY+45% UK (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,37098423	0,36111751	0,324029843	0,292470334	0,263692401
av	m ² /kN	0,00063446	0,00021926	0,000274723	0,000140264	6,3951E-05
mv	m ² /kN	0,00045333	0,00015667	0,000196296	0,000100222	4,56944E-05
cv	cm ² /dk	0,13292624	0,20197715	0,205227483	0,228699397	0,259763187
	m ² /yıl	6,98660339	10,615919	10,7867565	12,02044032	13,65315309
cs	-	0,03277653				
cc	-	0,09559822				



Şekil 6.27. 9% AMY+45% UK zemin için karekök zaman-saat okuması grafiği: (a) 1 gün, (b) 7 gün

Şekil 6.28'teki grafiklerde ve Tablo 6.28 ile Tablo 6.30 arasında kirlenmiş zeminlerin (3%, 5% ve 9%), uçucu kül (25%) ve nano-grafen (0,08%) ilavesi sonucunda günlere bağlı konsolidasyon parametreleri verilmiştir. Numunelerin kirlenme-kürlenme süreleri 7 gün olarak seçilmiştir. 7 günlük iyileştirilmiş numuneler, kirlenmiş zeminle karşılaştırıldığında e ve c_v değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma boşluk oranı (e) için sırasıyla %51,54, %43,58 ve %42,59 şeklindeyken konsolidasyon katsayısı (c_v) için sırasıyla %14,12, %53,11 ve %50,97 şeklindedir.

Tablo 6.28. K+3% AMY+25% UK+0.08% NG zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

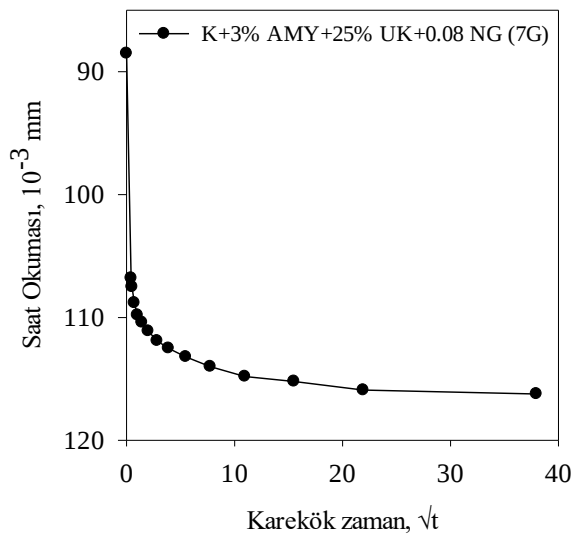
K+3% AMY+25% UK+0.08% NG (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,296183724	0,289003928	0,274249118	0,25909909	0,240836719
av	m ² /kN	0,000471334	0,000159551	0,000109295	6,73335E-05	4,0583E-05
mv	m ² /kN	0,000357778	0,000121111	8,2963E-05	5,11111E-05	3,08056E-05
cv	cm ² /dk	0,212835974	0,204093329	0,211066057	0,229060905	0,235622825
	m ² /yıl	11,18665879	10,72714536	11,09363193	12,03944118	12,38433569
cs	-	0,023850766				
cc	-	0,060666283				

Tablo 6.29. K+5% AMY+25% UK+0.08% NG zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

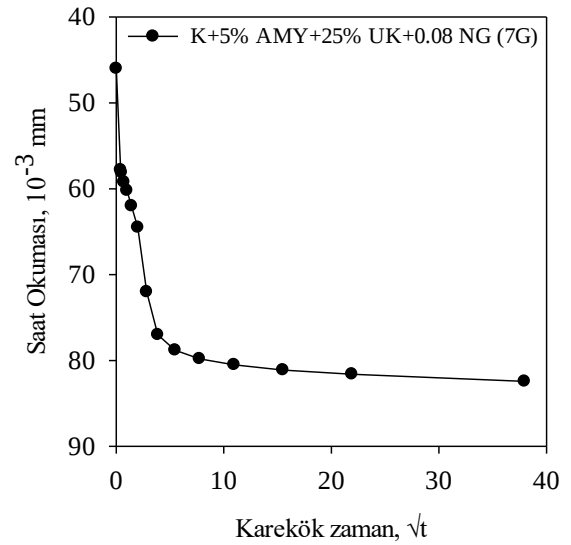
K+5% AMY+25% UK+0.08% NG (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,34682556	0,34295635	0,33582885	0,326393401	0,301667772
av	m ² /kN	0,00053965	0,00019346	0,000118792	9,43545E-05	0,000123628
mv	m ² /kN	0,0003975	0,0001425	0,0000875	0,0000695	9,10625E-05
cv	cm ² /dk	0,21031795	0,20804363	0,241164072	0,214387608	0,164136762
	m ² /yıl	11,0543114	10,9347733	12,67558361	11,26821268	8,62702821
cs	-	0,01285325				
cc	-	0,08213676				

Tablo 6.30. K+9% AMY+25% UK+0.08% NG zeminin 7 günlük konsolidasyon parametreleri

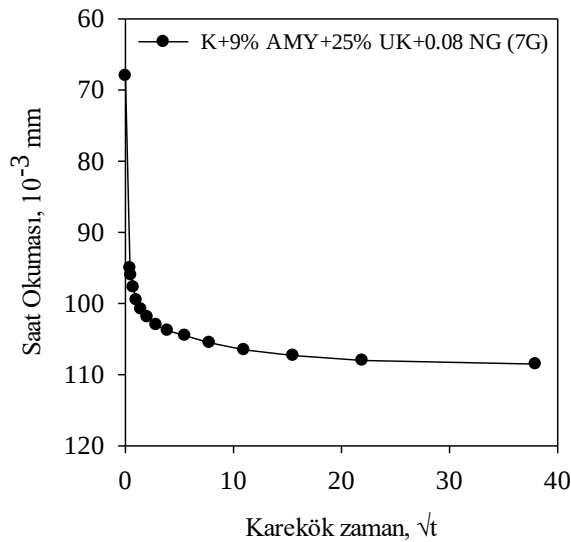
K+9% AMY+25% UK+0.08% NG (7G)		25 kPa	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
e	-	0,3180354	0,31398706	0,302638412	0,282197581	0,255319216
av	m ² /kN	0,00046456	0,00020242	0,000189144	0,000204408	0,000134392
mv	m ² /kN	0,00035	0,0001525	0,0001425	0,000154	0,00010125
cv	cm ² /dk	0,24604073	0,24891852	0,24072427	0,200995438	0,203764647
	m ² /yıl	12,9319006	13,0831574	12,65246764	10,56432024	10,70986983
cs	-	0,01344832				
cc	-	0,089288				



(a)



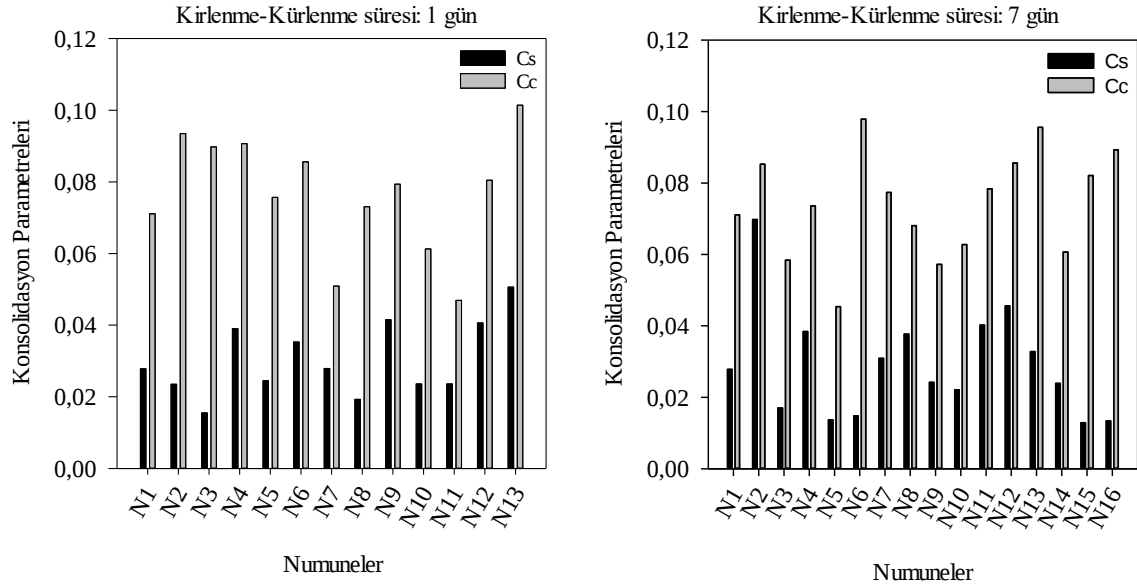
(b)



(c)

Şekil 6.28. Kirlenmiş zeminlere %25 uçucu kül ve %0.08 nano-grafen katkı ile karekök zaman-saat okuması grafiği (Kirlenme-Kürlenme süresi: 7 gün): (a) 3% AMY, (b) 5% AMY, (c) 9% AMY

Tablo 6.2’ deki numune adlandırmalarına göre zeminlerin sıkışma indisi (cc) ve şişme indisi (cs) değerleri kirlenme-kürlenme süreleri dikkate alınarak Şekil 6.29’da verilmiştir. Saf kaolinin cc değeri kirlenmiş zeminlerle kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmektedir ve bu durum Singh vd. (2008) çalışmasında da görülmektedir. Cc değerini AMY katkılı zeminler içerisinde en düşük saf kilde bulunmuştur [95]. İyileştirilmiş zeminler içerisinde ise genel olarak %25 uçucu kül katkısı optimum sonuçları vermiştir.



Şekil 6.29. Kirlenme-Kürlenme süresine göre cc ve cs değerleri

Konsolidasyon deneyi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde kirlenmiş zeminlerin güne bağlı değişimlerinde boşluk oranı (e) 3% AMY için artış, 5% ve 9% AMY için azalma göstermiştir. Boşluk oranı, AMY oranlarına göre incelendiğinde ise en yüksek AMY oranında en düşük boşluk oranı değeri elde edilmiştir. Konsolidasyon katsayısında (cv) kirlenme oranları açısından bakıldığında, AMY arttıkça cv değerlerinde artış görülmektedir. Kirlenme günleri dikkate alınarak karşılaştırıldığında ise 3% ve 5% AMY de azalma görülürken, 9% AMY içinse cv değerinde artış görülmektedir fakat bu değişimler birbirine yakındır. Kirlenmiş zeminler, saf kaolin ile karşılaştırıldığında ise boşluk oranı ve konsolidasyon katsayısı saf kaolinde en yüksek değere sahiptir. Uçucu kül katkılarında en düşük boşluk oranı (e) bütün kirlenme derecelerinde 25% UK katkısında meydana gelmiştir. Konsolidasyon katsayısında (cv) ise en düşük değer 3% ve 9% AMY ile kirlenmiş zeminlerde 25% UK ilavesinde meydana gelirken, 5% AMY ile kirlenmiş zeminlerde 10% UK ilavesinde meydana gelmiştir. Nano-grafen ilavesinde ise bazı kirlenme oranları belirli parametrelerde uçucu kül katkısına göre iyileşmeler görülmüştür. 3% AMY zeminlerde en düşük boşluk oranı nano-grafen katkılı zeminlerde görülmüştür. 5% ve 9% AMY zeminler içerisinde de en düşük cv değeri nano-grafen katkılı zeminlerdedir.

6.5. Farklı Kirlenme Derecelerine Sahip Katkılı ve Katkısız Zeminlerin Kırılma Modları ve Mikroyapısal Analizleri

Tez çalışmasının bu bölümünde zemin numunelerinin yenilme modları ve mikroyapısal analizleri sonucunda elde edilen SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri incelenmiştir.

6.5.1. Kırılma Modları

Zemin numunelerinde yükleme sonunda meydana gelen kırılma modları, mekanik özelliklerin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Tezin bu bölümünde, atık motor yağıyla kirlenmiş zeminlerin hem katkısız hem de uçucu kül ve nano-grafen katkısıyla iyileşmesi sonucu ortaya çıkan kırılma modları değerlendirilmiştir. Şekil 6.30'da kirlenme-kürlenme derecelerine ve sürelerine göre kırılma modları verilmiştir. Kırılma modları incelendiğinde numuneler üzerindeki kayma yüzeyleri belirgindir. 45° ye yakın şekilde numuneler kırılmıştır.



Şekil 6.30. Zemin numunelerinin kirlenme-kürlenme derecelerine ve sürelerine göre kırılma modları



Şekil 6.30. (Devamı) Zemin numunelerinin kirlenme-kürlenme derecelerine ve sürelerine göre kırılma modları

6.5.2. Mikroyapısal Analizler

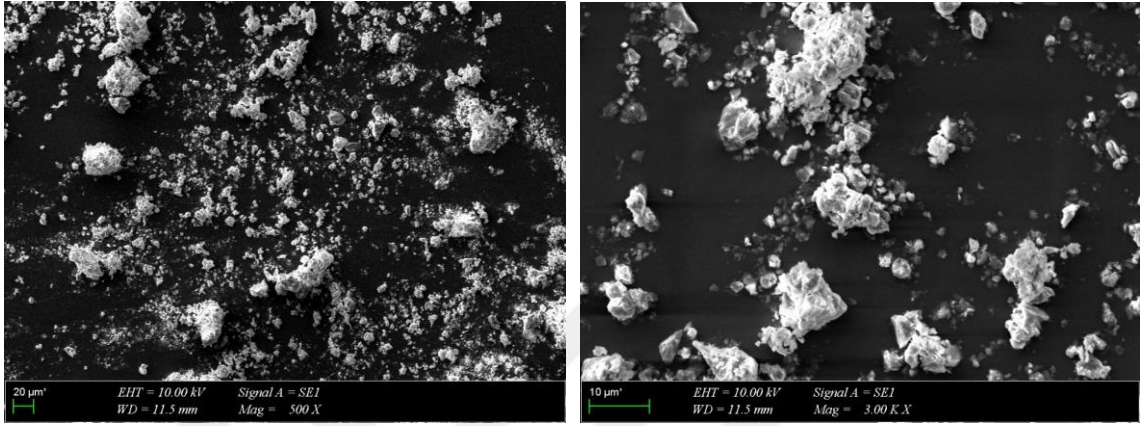
Tez çalışmasının bu bölümünde Tablo 6.31. Mikroyapısal Analiz Programı' de özet şeklinde verilen örneklerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelenmiştir. Örnekler için 500X ve 3000X yakınlaştırma oranları ile görüntüler alınmış olup, Şekil 6.31 ve Şekil 6.43 arasında SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 6.31. Mikroyapısal Analiz Programı

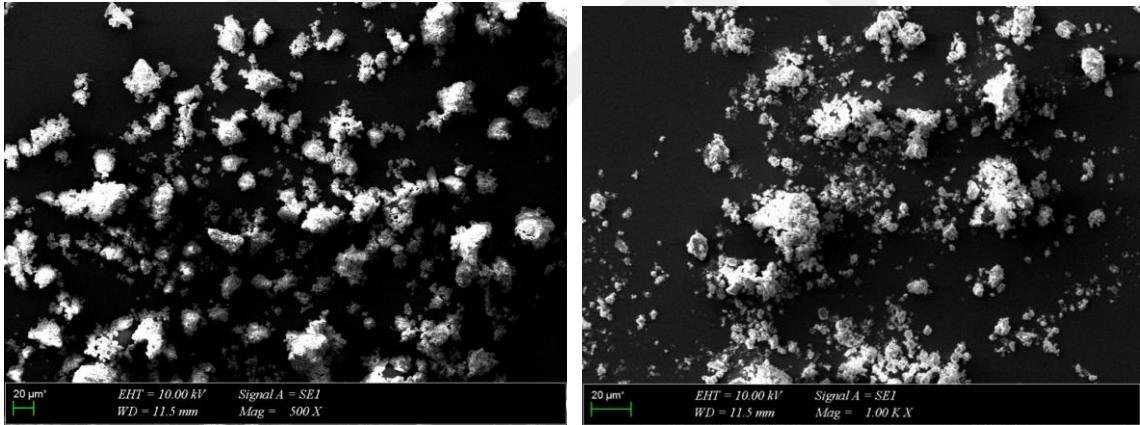
ÖRNEK	ZEMİN	AMY (%)	STBLZTR (%)
Ö1	K	-	-
Ö2	K	3	-
Ö3	K	9	-
Ö4	K	3	10 UK
Ö5	K	3	25 UK
Ö6	K	3	45 UK
Ö7	K	9	10 UK
Ö8	K	9	25 UK
Ö9	K	9	45 UK
Ö10	K	3	25 UK+0,04 NG
Ö11	K	3	25 UK+0,04 NG
Ö12	K	9	25 UK+0,12 NG
Ö13	K	9	25 UK+0,12 NG

K: Kaolin, AMY: Atık Motor Yağı, STBLZTR: Stabilizatör, UK: Uçucu Kül, NG: Nano-grafen

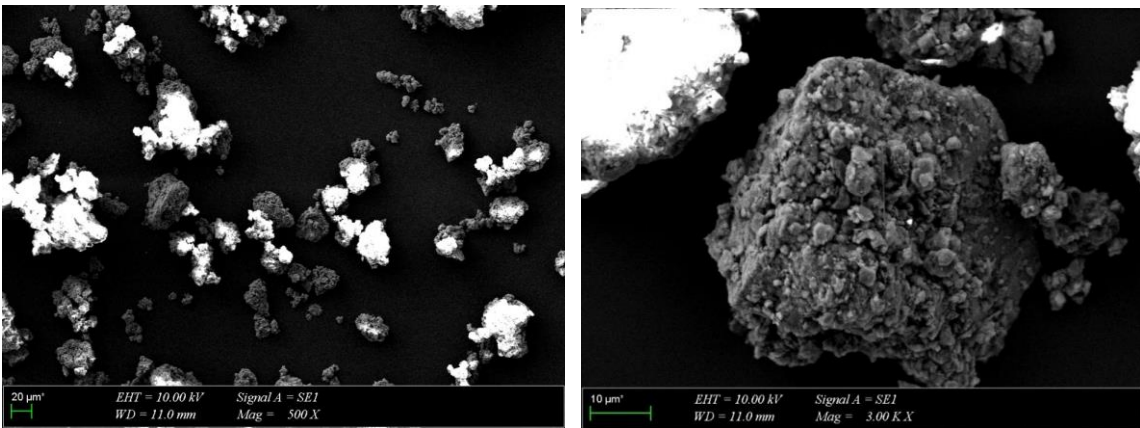
Şekil 6.31 ve Şekil 6.33 arasında sırasıyla saf kaolin, %3 AMY ve 9% AMY ile kirlenmiş zeminlerin 500X ve 3000X yakınlaştırma oranlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir. Saf kaolin için görüntüler daha açık renkli görünürken, AMY oranı arttıkça görüntülerin daha koyu hale geldiği ve oran arttıkça topaklaşma eğiliminin arttığı görülmektedir.



Şekil 6.31. Ö1 numunesinin SEM görüntüleri

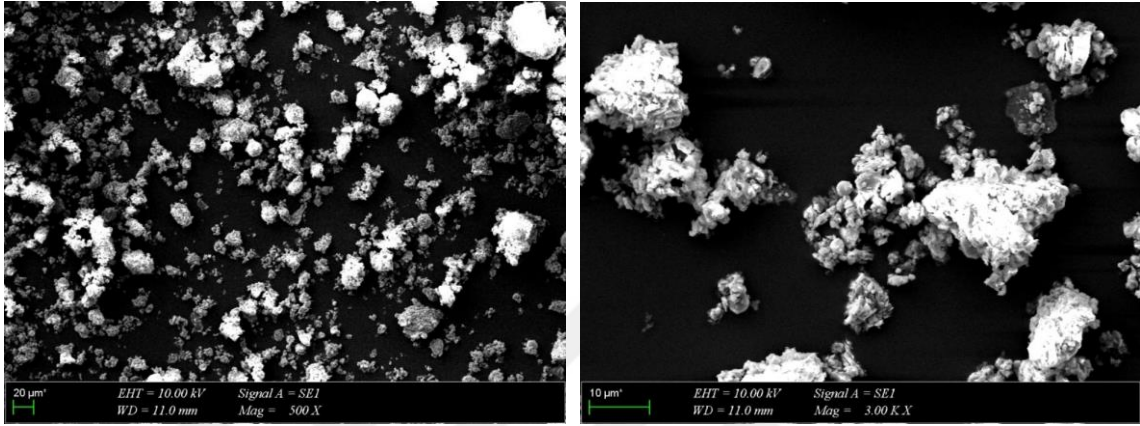


Şekil 6.32. Ö2 numunesinin SEM görüntüleri

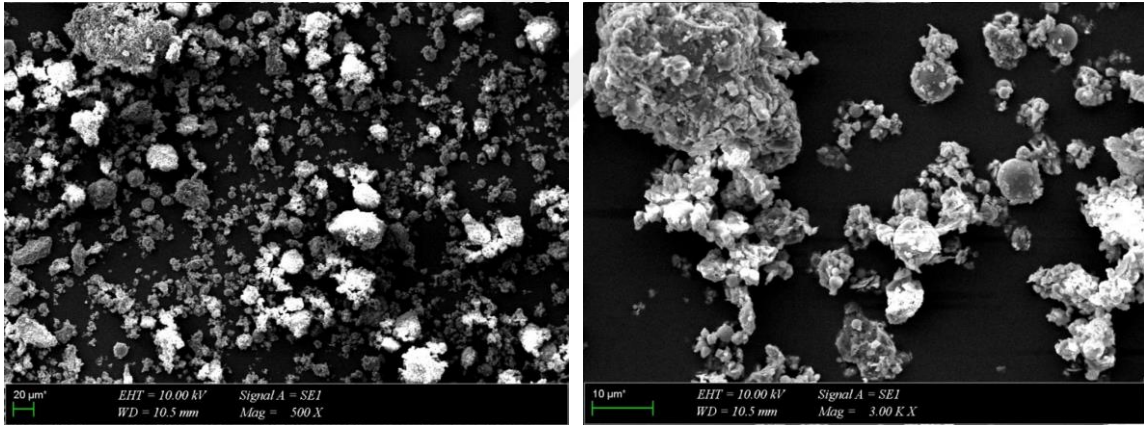


Şekil 6.33. Ö3 numunesinin SEM görüntüleri

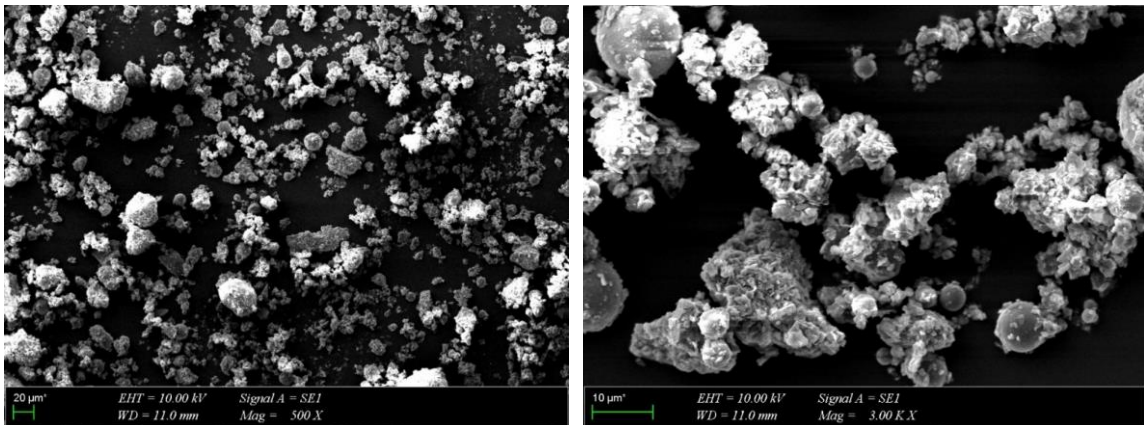
Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36’da sırasıyla 3% AMY ile kirlenmiş zeminlerin 10%, 25% ve 45% UK katkılı durumları için 500X ve 3000X yakınlaştırma oranlarına göre SEM görüntüleri verilmiştir. Saf kaolin görüntüsüne göre nispeten daha koyu renkte olan danelerin bu aşamada daha küçük boyuttaki daneler tarafından etraflica sarıldığı ve bu sarılmanın uçucu kül oranı arttıkça daha fazla olduğu görülmektedir. Öte yandan, kirlenmiş kaolinlerin içeriğindeki uçucu kül varlığı pullanma yapısı sergilediği görülmüştür.



Şekil 6.34. Ö4 numunesinin SEM görüntüleri

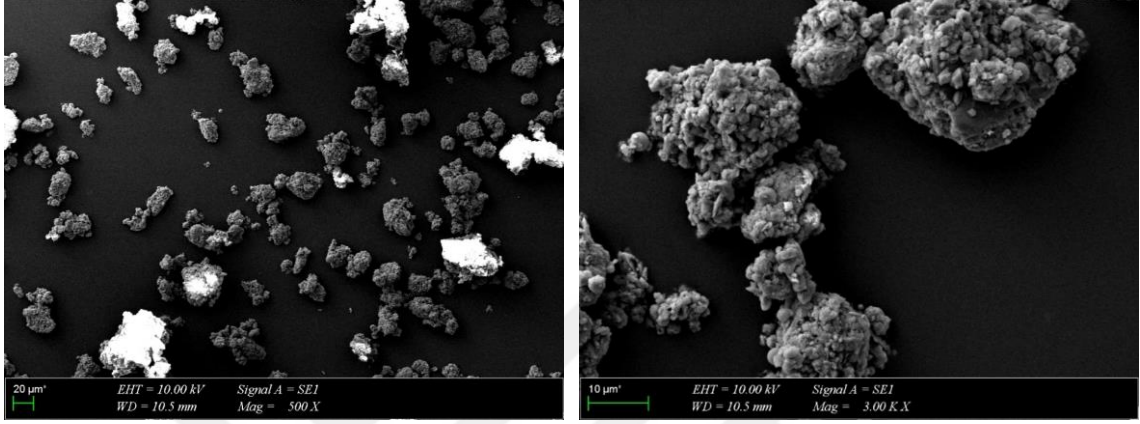


Şekil 6.35. Ö5 numunesinin SEM görüntüleri

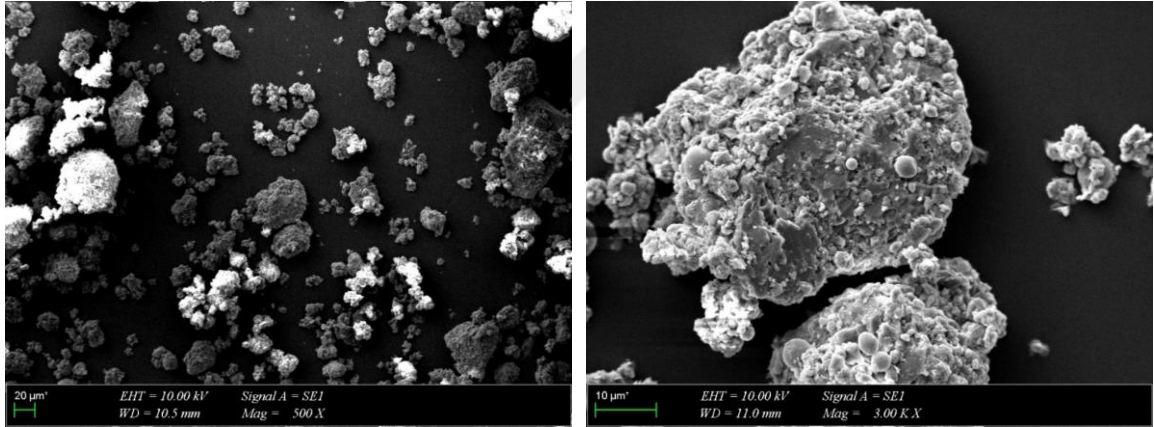


Şekil 6.36. Ö6 numunesinin SEM görüntüleri

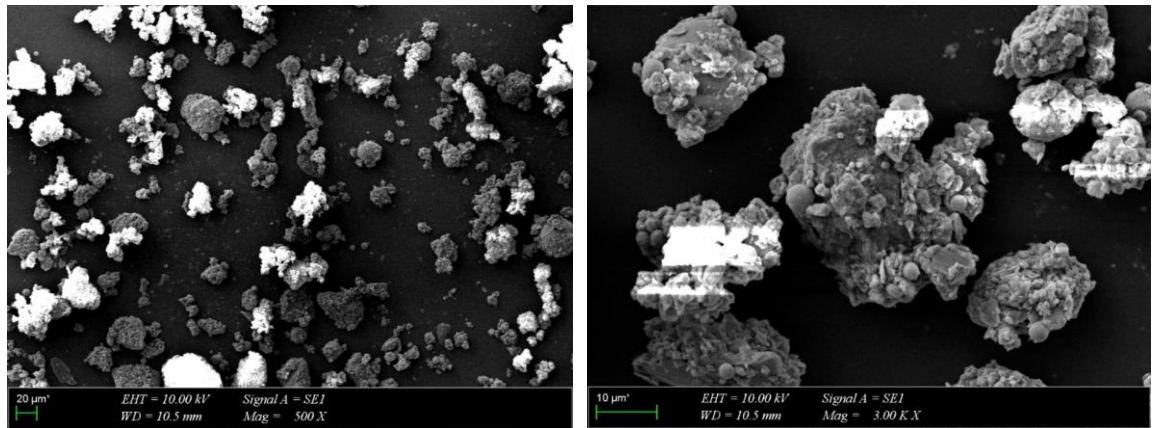
Şekil 6.37, Şekil 6.38 ve Şekil 6.39’da sırasıyla 9% AMY ile kirlenmiş zeminlerin 10%, 25% ve 45% UK katkılı durumları için 500X ve 3000X yakınlaştırma oranlarına göre SEM görüntüleri verilmiştir. Saf kaolin ve 3% AMY zemin görüntülerine göre nispeten daha koyu renkte olan danelerin bu aşamada daha küçük boyuttaki daneler tarafından etraflıca sarıldığı ve bu sarılmanın uçucu kül oranı arttıkça daha fazla olduğu görülmektedir. Kirlenme derecesindeki artış ile numunelerin görüntüsü uçucu kül oranındaki artış ile daha topaklaşma eğilimi göstermiştir.



Şekil 6.37. Ö7 numunesinin SEM görüntüleri

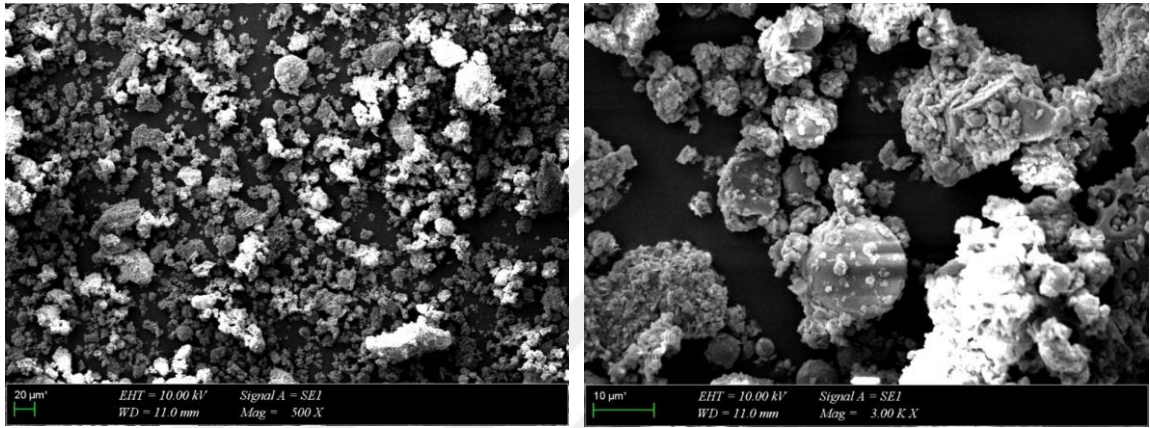


Şekil 6.38. Ö8 numunesinin SEM görüntüleri

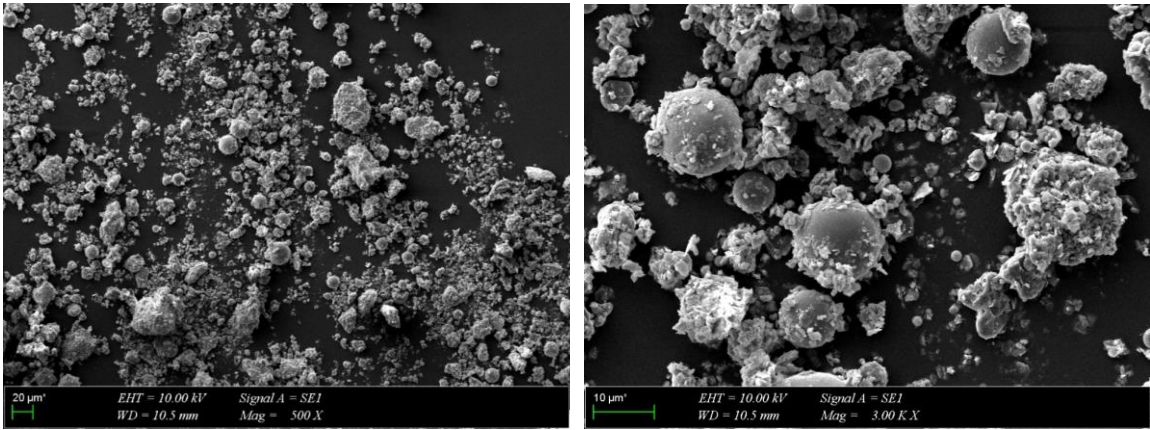


Şekil 6.39. Ö9 numunesinin SEM görüntüleri

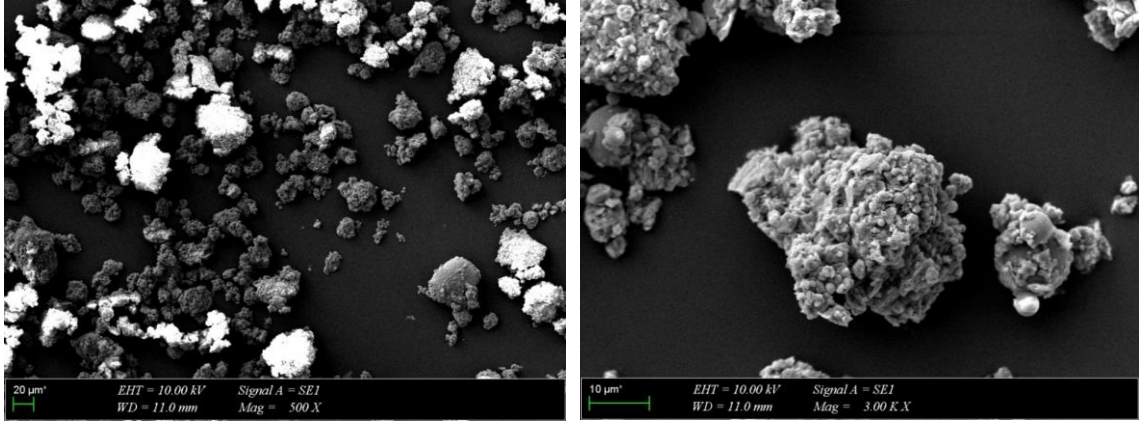
Şekil 6.40, Şekil 6.41, Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'te sırasıyla 3% AMY ile kirlenmiş zeminlerin 25% UK + %0,04 NG ve 25% UK + %0,12 NG katkılı durumları ile 9% AMY ile kirlenmiş zeminlerin 25% UK + %0,04 NG ve 25% UK + %0,12 NG katkılı durumları için 500X ve 3000X yakınlaştırma oranlarına göre SEM görüntüleri verilmiştir. Bu kısımda uçucu kül katkısına ilave olarak nano-grafen de eklendiğinden yaklaşma oranı arttıkça uçucu kül danelerinden daha küçük boyutlardaki nano-grafenler rahatlıkla seçilebilmektedir. AMY oranlarından dolayı Şekil 6.40 ve Şekil 6.41, Şekil 6.42 ve Şekil 6.43'e göre daha açık bir renge sahiptir.



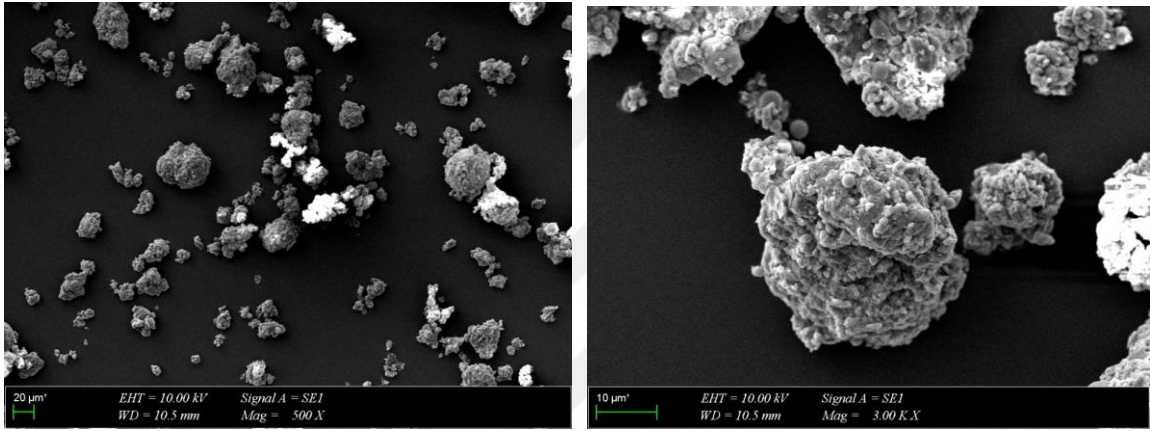
Şekil 6.40. Ö10 numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 6.41. Ö11 numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 6.42. Ö12 numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 6.43. Ö13 numunesinin SEM görüntüleri

6.6. Grey Korelasyon Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, atık motor yağı ile kirlenmiş zeminin saf zemin üzerindeki etki parametreleri ile birlikte her bir kirlenme derecesi için yapılan iyileştirme oranlarının etki parametreleri (G_s , LL , PI , UCS_{max} , γ_{kmax} , $OSİ$) referans dizisi ve karşılaştırma dizisi olarak kullanılmıştır.

Saf kaolin üzerindeki atık motor yağı etkisi Denklem 5.7 ve Denklem 5.8 ile hesaplanan boyutsuzlaştırma işleminin sonunda Tablo 6.32’ de verilmiştir.

Tablo 6.32. Boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler

UCS_{max}	LL	PI	$OSİ$	γ_{kmax}	G_s	AMY
1	0,951336	0,983607	1	0,942857	1	0
0,498408	0,993414	1	0,95	0,988571	0,90566	0,333333
0,575841	0,959751	0,83388	0,85	0,988571	0,732075	0,555556
0,656758	1	0,93224	0,6	1	0,486792	1

UCS_{max} : Maksimum gerilme, LL : Likit limit, PI : Plastisite indisi, $OSİ$: Optimum su içeriği,

γ_{kmax} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, G_s : Özgül ağırlık, AMY: Atık motor yağı

Ardından referans ve karşılaştırma dizileri arasındaki yaklaşım dereceleri ($|x_0(k) - x_i(k)|$) Denklem 5.9 ve Tablo 6.33'de sunulmuştur. $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0,486792$, $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 1$ şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 6.33. Yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları

UCS _{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs
0,820126	0,831303	0,823809	0,820126	0,833327	0,820126
0,98759	0,821596	0,820126	0,83162	0,822685	0,842497
0,951545	0,829317	0,861639	0,857163	0,822685	0,892612
0,919035	0,820126	0,835896	0,941338	0,820126	0,993485

Sonuç olarak, referans ve karşılaştırma dizileri için Grey korelasyon derecesini hesaplamak için Denklem 5.10 kullanılmıştır ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$\gamma_1 = 0,91957 \quad \gamma_2 = 0,82558 \quad \gamma_3 = 0,83536 \quad \gamma_4 = 0,86256 \quad \gamma_5 = 0,82470 \quad \gamma_6 = 0,88717$$

Sonuçlara göre farklı parametrelerin Grey korelasyon dizisi $UCS_{max} > Gs > OSİ > PI > LL > \gamma_{kmax}$ şeklinde elde edilmiştir. Literatür taramasında tüm atık motor yağı kontaminasyonları için ortak yorum, atık yağ içeriği arttıkça özgül ağırlığın ve optimum su içeriğinin azaldığı şeklindedir [6,12]. Ayrıca, atık motor yağı, saf kaoline göre serbest basınç dayanımını azaltmıştır. Bu nedenle, özgül ağırlık, optimum su içeriği ve serbest basınç dayanımının ilk üç pozisyonu paylaşması beklenmedik bir durum değildir.

Her kirlenme derecesi için uygulanan stabilizasyon oranları için de aynı adımlar uygulanmıştır ve sonuçlar Tablo 6.34 ile Tablo 6.39 arasında verilmiştir.

3% AMY zemin için uygulanan tüm stabilizasyonların etki parametreleri (Gs, LL, PI, UCS_{max}, γ_{kmax} , OSİ) referans dizisi ve karşılaştırma dizisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 6.34. 3% AMY zemin için boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler

UCS _{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs	Stabilizasyon
0,40221	0,980144	0,905941	0,996678	0,915344	0,995851	0
0,640245	1	1	0,994463	0,873016	0,946058	0,222222
0,657446	0,909747	0,811881	0,925249	0,888889	0,892116	0,555556
0,712187	0,891697	0,752475	0,868217	1	1	1
1	0,913357	0,841584	1	0,925926	0,892116	0,555556

Referans ve karşılaştırma dizileri arasındaki yaklaşım dereceleri ($|x_0(k) - x_i(k)|$) Tablo 6.35'te sunulmuştur. $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0,40221$, $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 1$ şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 6.35. 3% AMY zemin için yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları

UCS _{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs
0,956405	0,740015	0,757844	0,736283	0,755481	0,736468
0,840712	0,735543	0,735543	0,736778	0,766372	0,747978
0,834196	0,756884	0,783342	0,753026	0,76221	0,761376
0,814688	0,761484	0,80142	0,767649	0,735543	0,735543
0,735543	0,755978	0,774904	0,735543	0,752859	0,761376

Sonuç olarak, referans ve karşılaştırma dizileri için Grey korelasyon derecesini hesaplamak için Denklem 5.10 kullanılmıştır ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$\gamma_1 = 1,04539 \quad \gamma_2 = 0,93748 \quad \gamma_3 = 0,96326 \quad \gamma_4 = 0,93232 \quad \gamma_5 = 0,94312 \quad \gamma_6 = 0,93569$$

Sonuçlara göre, 3% AMY zeminin farklı parametrelerinin Grey korelasyon dizisi $UCS_{max} > PI > \gamma_{kmax} > LL > Gs > OSİ$ şeklinde elde edilmiştir.

5% AMY zemin için uygulanan tüm stabilizasyonların etki parametreleri (Gs, LL, PI, UCS_{max}, γ_{kmax} , OSİ) referans dizisi ve karşılaştırma dizisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 6.36. 5% AMY zemin için boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler

UCS _{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs	Stabilizasyon
0,469497	0,98609	0,829348	1	0,925134	0,869955	0
0,703839	0,973684	0,880435	0,971875	1	1	0,222222
0,655818	1	1	0,863125	0,941176	0,964126	0,555556
0,568879	0,992481	1	0,97875	0,882353	0,995516	1
1	0,951128	0,836957	0,953125	0,903743	0,964126	0,555556

Referans ve karşılaştırma dizileri arasındaki yaklaşım dereceleri ($|x_0(k) - x_i(k)|$) Tablo 6.37'de sunulmuştur. $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0,469497$, $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 1$ şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 6.37. 5% AMY zemin için yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları

UCS _{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs
0,985229	0,805951	0,845622	0,802831	0,820342	0,834473
0,884835	0,808783	0,831702	0,8092	0,802831	0,802831
0,902092	0,802831	0,802831	0,836302	0,816436	0,810998
0,937277	0,80451	0,802831	0,807621	0,8312	0,80383
0,802831	0,814057	0,843481	0,813584	0,825688	0,810998

Sonuç olarak, referans ve karşılaştırma dizileri için Grey korelasyon derecesini hesaplamak için Denklem 5.10 kullanılmıştır ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$\gamma_1 = 1,12807 \quad \gamma_2 = 1,00903 \quad \gamma_3 = 1,03162 \quad \gamma_4 = 1,01738 \quad \gamma_5 = 1,02412 \quad \gamma_6 = 1,01578$$

Sonuçlara göre, 5% AMY zeminin farklı parametrelerinin Grey korelasyon dizisi $UCS_{max} > PI > \gamma_{kmax} > OSİ > Gs > LL$ şeklinde elde edilmiştir.

9% AMY zemin için uygulanan tüm stabilizasyonların etki parametreleri (Gs, LL, PI, UCS_{max} , γ_{kmax} , OSİ) referans dizisi ve karşılaştırma dizisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 6.38. 9% AMY zemin için boyutsuzlaştırma işlemi sonrası veriler

UCS_{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs	Stabilizasyon
0,591772	1	0,836275	0,800582	0,945946	0,72067	0
0,663492	0,984266	1	0,838428	1	0,815642	0,222222
0,748497	0,951336	0,813725	0,798399	1	0,921788	0,555556
0,617601	0,907428	0,794118	1	0,962162	1	1
1	0,940359	0,852941	0,895197	0,962162	0,921788	0,555556

Referans ve karşılaştırma dizileri arasındaki yaklaşım dereceleri ($|x_0(k) - x_i(k)|$) Tablo 6.39'da sunulmuştur. $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0,591772$, $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 1$ şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 6.39. 9% AMY zemin için yaklaşım derecesi hesaplama sonuçları

UCS_{max}	LL	PI	OSİ	γ_{kmax}	Gs
1,049743	0,925106	0,965947	0,976215	0,937567	1,001383
1,021513	0,928639	0,925106	0,965345	0,925106	0,971815
0,992254	0,936282	0,972369	0,976862	0,925106	0,943442
1,039159	0,94703	0,978136	0,925106	0,933732	0,925106
0,925106	0,938908	0,961337	0,950145	0,933732	0,943442

Sonuç olarak, referans ve karşılaştırma dizileri için Grey korelasyon derecesini hesaplamak için Denklem 5.10 kullanılmıştır ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$\gamma_1 = 1,25694 \quad \gamma_2 = 1,16899 \quad \gamma_3 = 1,20072 \quad \gamma_4 = 1,19842 \quad \gamma_5 = 1,16381 \quad \gamma_6 = 1,19630$$

Sonuçlara göre, 9% AMY zeminin farklı parametrelerinin Grey korelasyon dizisi $UCS_{max} > PI > OSİ > Gs > LL > \gamma_{kmax}$ şeklinde elde edilmiştir.

7. SONUÇLAR

Farklı oranlarda kirletilmiş kaolinin kili ile bu kilin uçucu kül ve nano-grafen katkılarıyla iyileştirilmesiyle meydana gelen fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimlerin incelenmesi bu tez çalışmasının temel amacıdır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- AMY oranı arttıkça zeminlerin özgül ağırlıklarında azalma görülmüştür. Tüm karışımlar içerisinde maksimum özgül ağırlık değeri $2,65 \text{ gr/cm}^3$ ile saf kaolindedir. %9 AMY kirlenmesinde uçucu kül oranı arttıkça özgül ağırlıkta artış görülmüştür ve bu artış oranı %28'dir. %3 ve %5 AMY için bu durum dalgalı olsa da nihai olarak %45 UK katkısında maksimum özgül ağırlığa ulaşmıştır.
- Kirlenme süresi fark etmeksizin sadece AMY eklenmiş karışımlarda LL değeri saf kaolinden her zaman yüksek çıkmıştır. PL değerinde ise 7 günlük %9 AMY zemin dışındaki tüm karışımlar saf zeminden yüksektir. Ayrıca PL değerleri, sadece AMY'li zeminlerde kirlenme süresine bağlı olarak, kirlenme süresi arttıkça PL'de azalma görülmüştür. LL içinse bu durum %3 ve %5 AMY zeminlerde artış, %9 AMY zeminde azalma şeklindedir. Uçucu kül ilave edilmiş kirlenmiş zeminlerde iki farklı durum görülmüştür. %10 uçucu kül ilavesinde maksimum LL %3 AMY'de, maksimum PL %5 AMY'de ve maksimum PI ise %9 AMY zeminedir fakat %25 ve %45 uçucu kül ilavesinde maksimum LL ve PI değerleri %5 AMY zeminedir. Nano-grafen ilavesinde ise maksimum LL ve PI değerleri %9 AMY zeminedir.
- Saf kaolinin W_{opt} değeri %19 iken AMY oranı arttıkça bu değerler sırasıyla %18, %16 ve %11 olmuştur. W_{opt} değerleri düştükçe γ_{kmax} değerlerinde ise artış görülmektedir. Uçucu kül ilavelerinde iki farklı durum görülmüştür. İlki %3 AMY zeminde uçucu kül oranı arttıkça W_{opt} değerleri azalmıştır. İkinci durumda ise %5 ve %9 AMY için en düşük OSİ değeri %25 UK ilavesinde görülmüştür. Bunun nedenleri arasında AMY oranı arttıkça zeminin karakteristik özelliklerinde meydana gelen başlıca değişiklikler gösterilebilir.
- Yapılan UCS deneyleri genel olarak incelendiğinde saf kaolinin UCS dayanımı kirlenmiş zeminlerden daha yüksek çıkmıştır. Kirlenmiş zeminlerde ise durum kirlenme derecesi arttıkça UCS dayanımlarının arttığını göstermektedir. Kirlenme sürelerindeki artış ise dayanımı olumsuz etkilemektedir. Kirlenmiş zeminlere uygulanan uçucu kül iyileştirmelerinde ise tüm oranlarda dayanımda artış görülmektedir ve kür süresi arttıkça ortaya çıkan dayanım artışı daha fazladır. Tüm kirlenme dereceleri bütün olarak ele alındığında en önemli katkıyı 25% UK katkı oranı sağlamıştır ve bu bağlamda nano-grafen için bağlayıcılık oranı da bu sonuçlara göre seçilmiştir. Nano-grafen katkısı, uçucu kül

katkısına göre daha yüksek dayanımlara ulaştırmıştır ve kür süresi arttıkça bu değer de artmıştır. Nano-grafen katkısı için optimum oran 0,08% olarak tespit edilmiştir.

- Konsolidasyon deneyi sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde kirlenmiş zeminlerin güne bağlı değişimlerinde boşluk oranı (e) 3% AMY için artış, 5% ve 9% AMY için azalma göstermiştir. Boşluk oranı, AMY oranlarına göre incelendiğinde ise en yüksek AMY oranında en düşük boşluk oranı değeri elde edilmiştir. Konsolidasyon katsayısında (cv) kirlenme oranları açısından bakıldığında, AMY arttıkça cv değerlerinde artış görülmektedir. Kirlenme günleri dikkate alınarak karşılaştırıldığında ise 3% ve 5% AMY de azalma görülürken, 9% AMY içinse cv değerinde artış görülmektedir fakat bu değişimler birbirine yakındır. Kirlenmiş zeminler, saf kaolin ile karşılaştırıldığında ise boşluk oranı ve konsolidasyon katsayısı saf kaolinde en yüksek değere sahiptir. Saf kaolinin sıkışma indisi (cc) değeri kirlenmiş zeminlerle kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmektedir. Uçucu kül katkılarında en düşük boşluk oranı (e) bütün kirlenme derecelerinde 25% UK katkısında meydana gelmiştir. Konsolidasyon katsayısında (cv) ise en düşük değer 3% ve 9% AMY ile kirlenmiş zeminlerde 25% UK ilavesinde meydana gelirken, 5% AMY ile kirlenmiş zeminlerde 10% UK ilavesinde meydana gelmiştir. Nano-grafen ilavesinde ise bazı kirlenme oranları belirli parametrelerde uçucu kül katkısına göre iyileşmeler görülmüştür. 3% AMY zeminlerde en düşük boşluk oranı nano-grafen katkılı zeminlerde görülmüştür. 5% ve 9% AMY zeminler içerisinde de en düşük cv değeri nano-grafen katkılı zeminlerde dir.

ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda uçucu kül ve nano-grafen ilaveleriyle iyileştirilen kirlenmiş kaolinin kilinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Çalışma bulgularına dayalı olarak atık motor yağı ile kirlenmiş kaolinin kilinin dayanım özellikleri bakımından nano-grafen ve uçucu kül birlikte kullanılması önerilmektedir.
- Atık motor yağı ile kirlenmiş kaolinin kilinin konsolidasyon özellikleri bakımından, nano-grafen katkısının bazı kirlenme oranlarında belirli parametrelerde iyileşme sağlamasından dolayı ve malzemenin hem iş gücü hem de maliyeti göz önüne alındığında sadece uçucu kül ile birlikte kullanılması önerilmektedir.
- Nano-grafen kullanımında çok düşük oranlar ile çalışma yapılıyor olması ve bu oranların numuneler üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, farklı oranlardaki kombinasyonların çalışılması önerilmektedir. Özellikle %0,07 , %0,06 ve %0,05 oranlarında da kayda değer iyileşmeler beklenmektedir.
- Nano-grafenin bağlayıcılık özelliği bulunmadığından kullanılan uçucu kül yerine diğer bağlayıcılık özelliği gösteren (çimento, silis dumanı vs.) malzemelerin kullanılıp, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin takip edilmesi ortaya çıkan iyileştirmenin boyutunu anlayabilmek için fayda sağlayacaktır.
- Nano-grafenin özellikle atık motor yağı kirlenmelerindeki iyileştirme katkısı dikkate alındığında kirlenme sürelerinin arttırılıp meydana gelen değişimlerin gözlenmesi, gerektiği durumda ise kirlenme sürelerinin de arttırılması önerilmektedir.
- Uçucu kül ve nano-grafenin kirlenmiş zeminlerin stabilizasyon çalışmalarında birlikte kullanılma durumunu çeşitli geoteknik problemler için incelemek amacıyla konsolidasyonlu-drenajlı (CD) ya da konsolidasyonlu-drenajsız (CU) üç eksenli deney koşulları altında yürütülmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hassan, H. J. A., Rasul, J., & Samin, M. (2021). Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8(3), 390-413.
- [2] Kererat, C. (2019). Effect of oil-contamination and water saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil. *Engineering Geology*, 257, 105138.
- [3] Taha, M. R. (2018). Recent developments in nanomaterials for geotechnical and geoenvironmental engineering. In *MATEC web of conferences* (Vol. 149, p. 02004). EDP Sciences.
- [4] Yong, R. N. (2000). *Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation*. CRC press.
- [5] Salih, N. B., Abdalla, T. A., & Ali, S. A. (2020). Effect of waste engine oil contamination on the geotechnical properties of cohesive soils in sulaimani city, Iraq. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 27(1), 11-18.
- [6] Hewayde, E., Abbas, M., & Kubba, Z. (2019). Influence of engine oil on geotechnical properties of cohesive soil. *Int. J. of Engineering Research and Technology*, 12(1), 33-41.
- [7] Bojnourdi, S., Narani, S. S., Abbaspour, M., Ebadi, T., & Hosseini, S. M. M. (2020). Hydro-mechanical properties of unreinforced and fiber-reinforced used motor oil (UMO)-contaminated sand-bentonite mixtures. *Engineering geology*, 279, 105886.
- [8] Bonal, N. S., Paramkusam, B. R., & Basudhar, P. K. (2018). Enhancement of surfactant efficacy during the cleanup of engine oil contaminated soil using salt and multi-walled carbon nanotubes. *Journal of hazardous materials*, 351, 54-62.
- [9] Pandey, A., & Bind, Y. K. (2014). Effects of oil contamination on geotechnical properties of alluvial soil Naini, Allahabad. *International Journal of innovative Technology and exploring Engineering*, 3(8), 39-42.
- [10] Ijimdiya, T., & Igboro, T. (2012). The compressibility behavior of oil contaminated soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(10), 3553-3562.
- [11] Obeta, I. N., & Eze-Uzomaka, O. J. (2013). Geotechnical properties of waste engine oil contaminated laterites. *Nigerian Journal of Technology*, 32(2), 203-210.
- [12] Akinwumi, I. I. (2014). Effects of waste engine oil contamination on the plasticity, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 3(9), 331-335.

- [13] Oluremi, J. R., Yohanna, P., & Akinola, S. O. (2017). Effects of compactive efforts on geotechnical properties of spent engine oil contaminated laterite soil. *Journal of Engineering Science and technology*, 12(3), 596-607.
- [14] Abousnina, R. M., Manalo, A., Shiau, J., & Lokuge, W. (2016). An overview on oil contaminated sand and its engineering applications. *GEOMATE Journal*, 10(19), 1615-1622.
- [15] A. Negahdar, ... M. S.-A. J. of C., and undefined 2018, "The effect of heavy metal contaminants on the strength parameters of sandy clay," *ceej.aut.ac.ir*, vol. 50, no. 5, pp. 263–266, 2018, doi: 10.22060/ceej.2017.12869.5287.
- [16] Liu, X., Yang, Y., Pei, W., Wang, L., & Li, J. (2018). Study on Solidification Characteristics of Heavy Metal Contaminated Sludge. *Ekoloji*, 27(106), 779-785.
- [17] Hao, Y., Wu, X., & Guo, Y. (2020). Study on test and detection method of mechanical properties of heavy metal contaminated soil. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 29(8), 929-939.
- [18] Zha, F., Ji, C., Xu, L., Kang, B., Yang, C., & Chu, C. (2019). Assessment of strength and leaching characteristics of heavy metal-contaminated soils solidified/stabilized by cement/fly ash. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 30206-30219.
- [19] Nasehi, S. A., Uromeihy, A., Nikudel, M. R., & Morsali, A. (2016). Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 333-345.
- [20] Karkush, M. O., & Al-Taher, T. A. A. (2017). Geotechnical evaluation of clayey soil contaminated with industrial wastewater. *Archives of civil engineering*, 63(1).
- [21] Radhi, M. S. (2021). Utilization of Waste Plastic in Geotechnical Engineering Applications in Iraq: A Review. *Journal of Techniques*, 3(4), 9-14.
- [22] Zaitseva, I., Bogdanova, S., Vanina, A., Marenychuk, J., Novikova, E., & Poddubnaya, N. (2020, February). Economic and Organizational Problem Research Accompanying the Processes of Replacing Labor Resources in the Condition of Incomplete Information. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 753, No. 7, p. 072010). IOP Publishing.
- [23] Salim, N., Al-Soudany, K., & Jajjawi, N. (2018). Geotechnical properties of reinforced clayey soil using nylons carry's bags by products. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 01020). EDP Sciences.
- [24] Soltani-Jigheh, H., Asadzadeh, M., & Marefat, V. (2014). Effects of tire chips on shrinkage and cracking characteristics of cohesive soils. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 37(3), 259-271.

- [25] Irshayyid, E. J., & Fattah, M. Y. (2019, May). The performance of shear strength and volume changes of expansive soils utilizing different additives. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 518, No. 2, p. 022043). IOP Publishing.
- [26] Hameed, A., Shaban, A. M., & Almuhan, R. R. (2021, February). Performance of Lime-Treated Sandy Soils after Sustainable Reinforcement Using Waste Plastic Fibre. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1067, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- [27] Bin-Shafique, S., Rahman, K., Yaykiran, M., & Azfar, I. (2010). The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), 666-672.
- [28] Laguros, J. G., & Cokca, E. (2002). Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil. Discussion and closure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(11).
- [29] Pandian, N. S., Krishna, K. C., & Leelavathamma, B. (2002, December). Effect of fly ash on the CBR behaviour of soils. In Indian geotechnical conference, Allahabad (Vol. 1, pp. 183-186).
- [30] Phani Kumar, B. R., & Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 764-767.
- [31] Sharma, N. K., Swain, S. K., & Sahoo, U. C. (2012). Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotechnical and geological engineering*, 30, 1197-1205.
- [32] Mir, B. A., & Sridharan, A. (2013). Physical and compaction behaviour of clay soil–fly ash mixtures. *Geotechnical and Geological engineering*, 31, 1059-1072.
- [33] Choobbasti, A. J., & Valizadeh, M. (2022). Effect of nano graphene on the shear and consolidation properties of clayey sand soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(19), 1578.
- [34] F. Naseri, M. Irani, M. D.-A. of C. and Mechanical, and undefined 2016, “Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil,” Springer, vol. 16, no. 4, pp. 695–701, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.acme.2016.04.008.
- [35] Changizi, F., & Haddad, A. (2017). Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 170(2), 62-71.
- [36] Abbasi, N., Farjad, A., & Sepehri, S. (2018). The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 327-335.

- [37] Majdi, M., Uromiehi, A., & Nikudel, M. R. (2018). Improvement of geotechnical properties of CL soil by kaolinite nanoparticles. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 28(109), 221-228.
- [38] Alireza, S. G. S., Mohammad, M. S., & Hasan, B. M. (2013). Application of nanomaterial to stabilize a weak soil.
- [39] Majeed, Z. H., & Taha, M. R. (2012). Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil. *Journal of Asian Scientific Research*, 2(11), 587-592.
- [40] Das, B. M. (2021). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage learning.
- [41] Ural, N. (2018). *The importance of clay in geotechnical engineering* (p. 83). London, UK:: IntechOpen.
- [42] Umar, İ. H., & Fırat, M. E. O. (2022). A Study on Uniaxial Compressive Strength and Ultrasonic Non-Destructive Analysis of Fine-Grained Soil in Seasonally Frozen Regions. *Turkish Journal of Science and Technology*, 17(2), 267-277.
- [43] Vazquez-Duhalt, R. (1989). Environmental impact of used motor oil. *Science of the total environment*, 79(1), 1-23.
- [44] Development Of Methods For The Analysis Of Petroleum Contaminated Soils 2010 Imeh Joseph Okop School Of Chemical Engineering And Analytical Science.
- [45] Oyefolu, K. O., & Awobajo, O. A. (1979). Environmental aspects of the petroleum industry in the Niger Delta, problems and solutions. *The Petroleum Industry and the Environment of the Niger Delta*, 10, 145-162.
- [46] Klok, T. (1984). Effects of oil pollution on the germination and vegetative growth of five species of vascular plant. *Oil and Petrochemical Pollution*, 2(1), 25-30.
- [47] McCown, D. D., & Deneke, F. J. (1972). Plant germination and seedling growth as affected by the presence of crude petroleum. In *Symp. Proc. Impact of Oil Resource Development on Northern Plant Communities*, Published by University of Alaska (pp. 44-45).
- [48] Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *Soil organic matter. The nature and properties of soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 446-490.
- [49] Oluremi, J. R., Adewuyi, A. P., & Sanni, A. A. (2015). Compaction characteristics of oil contaminated residual soil. *Journal of Engineering and Technology (JET)*, 6(2), 75-87.
- [50] Ferrarese, E., Andreottola, G., & Oprea, I. A. (2008). Remediation of PAH-contaminated sediments by chemical oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 128-139.
- [51] Alver, E., Demirci, A., & Özçimder, M. (2012). Polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve sağlığa etkileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 45-52.

- [52] ASTM C618-08a, "Standard, A. S. T. M. (2008). C618-08a: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in Concrete. Annual Book of ASTM standards".
- [53] Feynman, R. P. (1959, December). Plenty of Room at the Bottom. In APS annual meeting.
- [54] S. Plan, 2007, "The National Nanotechnology Initiative,"
- [55] Hu, G., Li, J., & Zeng, G. (2013). Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review. *Journal of hazardous materials*, 261, 470-490.
- [56] Liu, J., Jiang, X., Zhou, L., Wang, H., & Han, X. (2009). Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1-3), 817-823.
- [57] Sankaran, S. P. K. S. S., Pandey, S., & Sumathy, K. (1998). Experimental investigation on waste heat recovery by refinery oil sludge incineration using fluidised-bed technique. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 33(5), 829-845.
- [58] Couto, M. N. P., Monteiro, E., & Vasconcelos, M. T. S. (2010). Mesocosm trials of bioremediation of contaminated soil of a petroleum refinery: comparison of natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Environmental science and pollution research*, 17, 1339-1346.
- [59] Das, N., & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology research international*, 2011.
- [60] C. A. Calvert and S. L. Suib, "An initial study into the use of microwave remediation of hexachlorobenzene treated soil using selected oxidants and coated graphite rods," *J Soils Sediments*, vol. 7, no. 3, pp. 147–152, Jun. 2007, doi: 10.1065/JSS2007.05.227.
- [61] Bramley-Alves, J., Wasley, J., King, C. K., Powell, S., & Robinson, S. A. (2014). Phytoremediation of hydrocarbon contaminants in subantarctic soils: an effective management option. *Journal of environmental management*, 142, 60-69.
- [62] Aislabie, J. M., Balks, M. R., Foght, J. M., & Waterhouse, E. J. (2004). Hydrocarbon spills on Antarctic soils: effects and management. *Environmental science & technology*, 38(5), 1265-1274.
- [63] Mair, J., Schinner, F., & Margesin, R. (2013). A feasibility study on the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil from an Alpine former military site: effects of temperature and biostimulation. *Cold Regions Science and Technology*, 96, 122-128.
- [64] Jiang, Y., Brassington, K. J., Prpich, G., Paton, G. I., Semple, K. T., Pollard, S. J., & Coulon, F. (2016). Insights into the biodegradation of weathered hydrocarbons in contaminated soils by bioaugmentation and nutrient stimulation. *Chemosphere*, 161, 300-307.

- [65] Bekins, B., Rittmann, B. E., & MacDonald, J. A. (2001). Natural attenuation strategy for groundwater cleanup focuses on demonstrating cause and effect. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(5), 53-58.
- [66] C. C. Azubuike, C. B. Chikere, and G. C. Okpokwasili, "Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects," *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 32, no. 11, Nov. 2016, doi: 10.1007/S11274-016-2137-X.
- [67] Höhener, P., & Ponsin, V. (2014). In situ vadose zone bioremediation. *Current opinion in biotechnology*, 27, 1-7.
- [68] Barnes, D. L., Laderach, S. R., & Showers, C. (2002). Treatment of petroleum-contaminated soil in cold, wet, remote regions. United States department of agriculture, Forest service, technology and development program.
- [69] Sharma, J. (2019). Advantages and limitations of in situ methods of bioremediation. *Recent Adv Biol Med*, 5(2019), 10941.
- [70] Jeong, S. W., Jeong, J., & Kim, J. (2015). Simple surface foam application enhances bioremediation of oil-contaminated soil in cold conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 164-170.
- [71] M. Concetta Tomei and A. J. Daugulis, "Ex situ bioremediation of contaminated soils: An overview of conventional and innovative technologies," *Crit Rev Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 20, pp. 2107–2139, 2013, doi: 10.1080/10643389.2012.672056.
- [72] Gomez, F., & Sartaj, M. (2013). Field scale ex-situ bioremediation of petroleum contaminated soil under cold climate conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 375-382.
- [73] L. Tufan Taşpolat Et Al., 2016, "Atık Mermer Tozunun Geçirimsiz Kil Tabakalarda Donma-Çözölmeye Etkisi," *Electronic Journal Of Construction Technologies*, Vol. 2, No. 2, Pp. 11–16
- [74] MTA, "Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü," Dec. 2022.
- [75] DAYTAM, "<https://daytam.atauni.edu.tr/altyapi/kimya-bilimi-ve-teknolojileri/kutle-sistemleri-laboratuvari/i%CC%87ndu%CC%88ktif-olarak-es%CC%A7les%CC%A7tirilmis%CC%A7-plazma-ku%CC%88tle-spektrometresi-icp-ms/>."
- [76] ASTM D2216-19 (2019). "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.,"

- [77] ASTM D6913 / D6913M-17 (2017). “Standard test methods for particle-size distribution 62 (gradation) of soils using sieve analysis, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA,”
- [78] ASTM D7928-16e1 (2017). “Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.,”
- [79] ASTM D854-02 (2017). “Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA,”
- [80] Uzuner, B. A. (1990). Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği. İnşaat Mühendisleri Odası Trabzon Şubesi.
- [81] ASTM D4318-10e1 (2017). “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.,”
- [82] ASTM D698-00ae1 (2017). “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. ,”
- [83] ASTM D2487-00 (2017). “Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. ,”
- [84] Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Kayabali, K. (2002). Geoteknik mühendisliğine giriş. Gazi Kitabevi.
- [85] B Bose, 2012, “Geo engineering properties of expansive soil stabilized with fly ash,” Electronic Journal of Geotechnical, vol. 17, pp. 1340–1340
- [86] F. Naseri, M. Irani, M. D.-A. of C. and Mechanical, and undefined 2016, “Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil,” Springer, vol. 16, no. 4, pp. 695–701, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.acme.2016.04.008.
- [87] Aziz, M., Hamza, M., Rasool, A. M., Ali, U., Ahmed, T., Kharal, Z. N., ... & Rehman, Z. U. (2023). Use of graphene oxide nanomaterial to improve mechanical properties of cement-treated silty soil. Arabian Journal for Science and Engineering, 48(4), 5603-5618.
- [88] ASTM D2166 (2006). “Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Annual Book of ASTM Standards.,”
- [89] ASTM D4186-98, “Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading, American Society for Testing and Materials.”.

- [90] D2435-02, 2011, “Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, American Society for Testing and Materials.,”
- [91] Marmara Üniversitesi NBUAM, “<http://dosya.marmara.edu.tr/nbuam/SEM.jpg>.”
- [92] Mir, B. A. (2015). Some studies on the effect of fly ash and lime on physical and mechanical properties of expansive clay. *International Journal of Civil Engineering*, 13(3), 203-212.
- [93] Ahmed, A. G. A. (2014, May). Fly ash utilization in soil stabilization. In *Proceedings of the International Conference on Civil, Biological and Environmental Engineering* (pp. 76-78).
- [94] Li, R., Zhang, S., Li, R., Bai, W., & Wang, L. (2022). Experimental Study on Mechanical Behaviors of Loess Based on Two Different Modes of Oil Contamination. *Geofluids*, 2022.
- [95] Singh, S. K., Srivastava, R. K., & John, S. (2008). Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & sediment contamination*, 17(3), 290-300.



ÖZGEÇMİŞ

Veyssel ÖZLÜ

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED] [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Özlü, V., & Firat, M. E. O. (2022). Donma-çözülme etkisi altındaki killi zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin Duncan-Chang modeli ile deneysel karşılaştırması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1-1.

Bildiriler:

1. Özlü, V., & Fırat, M. E. O. (2022). Investigation of the Contamination Degrees' Effects on Geotechnical Properties of Kaolin Clay Contaminated with Waste Engine Oil by Grey Correlation Analysis, 4th International Eurasian Conference On Science, Engineering And Technology (Eurasiansciencetech 2022)

Projeler:

1. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) destekli
TEKF.22.35 protokol numaralı proje