

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ENDÜSTRİYEL ATIK, LİF VE NANOMALZEME
KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN
DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ: DENEYSEL
YAKLAŞIM VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ**

Nagihan DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

HAZİRAN 2025

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİYEL ATIK, LİF VE NANOMALZEME KULLANILARAK
GÜÇLENDİRİLMİŞ KILLI ZEMİNLERİN DAYANIM
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ: DENEYSEL YAKLAŞIM VE
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Tez Yazarı
Nagihan DOĞAN

Danışman
Doç. Dr. Müge Elif FIRAT

HAZİRAN 2025
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Endüstriyel Atık, Lif ve Nanomalzeme Kullanılarak Güçlendirilmiş Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi: Deneysel Yaklaşım ve Karşılaştırmalı Analiz
Yazarı:	Nagihan DOĞAN
İlk Teslim Tarihi:	14.05.2025
Savunma Tarihi:	17.06.2025

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:	Doç. Dr. Müge Elif FIRAT Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Melek AKGÜL Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Aykut ÖZPOLAT 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 “Endüstriyel Atık, Lif ve Nanomalzeme Kullanılarak Güçlendirilmiş Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi: Deneysel Yaklaşım ve Karşılaştırmalı Analiz” 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.

17.06.2025

Nagihan DOĞAN



ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenim süresince beni yönlendiren, değerli bilgilerini benimle paylaşan, tez çalışma konumun belirlenmesinde, planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her fırsatta yardımcı olan tez danışmanım Doç. Dr. Müge Elif FIRAT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sadece bu çalışma süresince değil her anımda yanımda olan, zorlandığım zamanlarda beni motive ederek tez çalışmamı kolaylaştıran canım arkadaşım Öğr. Gör. Semiha GÜNGÖR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Sayısız fedakarlıklar yaparak beni bugünlere getiren, üzerimde emekleri çok olan sevgili ailem annem Çiğdem DOĞAN'a, abim elektrik-elektronik mühendisi Ersagun Furkan DOĞAN'a, bir öğretmen olarak meslek hayatı boyunca eğitim-öğretime büyük önem veren, bu doğrultuda kendini geliştiren ve geliştirmek isteyen herkesin yanında olan babam Hayrettin DOĞAN'a tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **TEKF.23.52** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Nagihan DOĞAN
ELAZIĞ, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Zeminlerde Endüstriyel Atık, Lif ve Nanomalzeme Kullanılması Üzerine Yapılan Çalışmalar	4
2.1.1. Endüstriyel Atık Kullanılarak Hazırlanan Zemin İçin Literatür Taramaları	4
2.1.2. Lif Kullanılarak Hazırlanan Zemin İçin Literatür Taramaları.....	6
2.1.3. Nanomalzeme Kullanılarak Hazırlanan Zemin İçin Literatür Taramaları.....	9
3. KİL ZEMİNLER.....	12
3.1. Kil Mineralleri.....	12
3.2. Kil Mineraller Grupları.....	13
3.3. Killerin Genel Özellikleri	14
3.4. Su ve Kil Mineralleri Arasındaki Etkileşim	15
3.5. Kil Minerallerinin Hidratasyonu ve Çift Katman Difüzyonu	15
4. KİLLİ ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU.....	17
4.1. Zemin Stabilizasyonu	17
4.2. Zemin Stabilizasyonunda Endüstriyel Atık Malzeme Kullanımı	19
Uçucu Kül Tanımı	19
Silis Dumanı Tanımı.....	20
4.3. Zemin Stabilizasyonunda Lif Kullanımı.....	21
Cam Lifi Tanımı	21
Bazalt Lifi Tanımı	22
4.4. Zemin Stabilizasyonunda Nanomalzeme Kullanımı	22
Nano-SiO ₂ Tanımı	23
Nanokil Tanımı.....	24
5. MATERYAL VE METOT	25
5.1. Materyal.....	25
5.1.1. Zemin	26
5.1.2. Uçucu Kül	26
5.1.3. Silis Dumanı	27
5.1.4. Cam Lifi	27
5.1.5. Bazalt Lifi.....	28
5.1.6. Nano-SiO ₂	29
5.1.7. Nanokil.....	29
5.2. Metot	30

5.2.1. Deneysel Program	30
5.2.2. İncelenen Zeminin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	32
5.2.3. İncelenen Zemin Örneğinin Sınıflandırılması	38
5.2.4. Numunelerin Hazırlanması.....	39
5.2.5. Serbest Basınç Dayanımı (UCS) Deneyi.....	41
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	43
6.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi	43
6.2. Katkı Malzemelerinin Killerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi	45
6.3. Katkısız ve Katkılı Kil Numunelerinin Tek Eksenli Basınç Altında Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışları.....	47
6.4. Katkısız ve Katkılı Zemin Numunelerinin Kırılma Modları	62
6.5. Mikroyapısal Analiz (SEM Görüntüleri).....	66
7. ENDÜSTRİYEL ATIK, LİF VE NANOMALZEME KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN DAYANIMLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	72
7.1. Grey İlişkisel Analiz Yöntemiyle Karşılaştırmalı Değerlendirme.....	72
8. SONUÇLAR.....	79
ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Endüstriyel Atık, Lif ve Nanomalzeme Kullanılarak Güçlendirilmiş Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi: Deneysel Yaklaşım ve Karşılaştırmalı Analiz

Nagihan DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Teknolojileri Programı
Haziran 2025, Sayfa: [xii] + 87

Geoteknik mühendisliğinde kil, etkileşimde olduğu zeminin mühendislik davranışını büyük ölçüde etkiler. Zeminlerin davranışını ve mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen killi zeminler kullanımıyla beraber çeşitli sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle bu tür zeminlerin stabilize edilmesi geoteknik mühendisliğinin önemli bir konusunu oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında killi zemine silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂, nanokil, bazalt lifi ve cam lifi eklenerek stabilize edilen zeminin dayanım özellikleri incelenmiş ve karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu doğrultuda killi zeminin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Numuneler, kile farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül (%5, %10 ve %20), nano-SiO₂, nanokil (%0,5, %0,7 ve %1), bazalt lifi, cam lifi (%1, %1,5 ve %2) eklenerek optimum su içeriğinde, optimum su içeriğinden büyük (%20) ve optimum su içeriğinden küçük (%13) olmak üzere üç farklı durumda hazırlanmıştır. Farklı kürlenme sürelerinde (0, 3, 7 ve 14 gün) hazırlanan numunelere tek eksenli serbest basınç dayanımı (UCS) deneyi uygulanmıştır. Zemin numunelerinin mikroyapısal analizleri için ZEISS EVO MA10 taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Deney sonuçları, silis dumanı ve uçucu kül katkısıyla hazırlanan killi zeminin likit limit ve plastik limit değerlerinin azaldığını göstermiştir. Proktor deneyi sonucunda killi zemine silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂ ve nanokil eklenmesiyle zeminin optimum su içeriğinde artış meydana gelmiştir. UCS deneyi sonucunda katkı malzemeleriyle hazırlanan numunelerin dayanım değerlerinde artış görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, endüstriyel atık, lif ve nanomalzeme kullanımının zeminin fiziksel ve mühendislik özellikleri üzerinde etkili olduğunu ve zemini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, Kil, Silis dumanı, Uçucu kül, Nano-SiO₂, Nanokil, Cam lifi, Bazalt lifi, Tek eksenli serbest basınç dayanım deneyi

ABSTRACT

Investigation of Strength Properties of Clay Soils Reinforced with Industrial Waste, Fiber and Nanomaterials: Experimental Approach and Comparative Analysis

Nagihan DOĞAN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering
Civil Engineering Technologies
June 2025, Pages: [xii] + 87

In geotechnical engineering, clay greatly affects the engineering behavior of the soil with which it interacts. Clay soils, which significantly affect the behavior and engineering properties of soils, bring various problems with their use. Therefore, stabilization of such soils is an important subject of geotechnical engineering. In this thesis, the strength properties of the soil stabilized by adding silica fume, fly ash, nano-SiO₂, nanoclay, basalt fiber and glass fiber to the clay soil were investigated and a comparative analysis was made. Accordingly, the physical properties of the clay soil were determined. The samples were prepared in three different conditions: at optimum water content, greater than optimum water content (20%) and less than optimum water content (13%) by adding different proportions of silica fume, fly ash (5%, 10% and 20%), nano-SiO₂, nanoclay (0.5%, 0.7% and 1%), basalt fiber, glass fiber (1%, 1.5% and 2%) to clay. Uniaxial unconfined compressive strength (UCS) tests were performed on the specimens prepared at different curing times (0, 3, 7 and 14 days). ZEISS EVO MA10 scanning electron microscope was used for microstructural analysis of the soil specimens. The test results showed that the liquid limit and plastic limit values of the clayey soil prepared with silica fume and fly ash additives decreased. As a result of the proctor test, the optimum water content of the soil increased with the addition of silica fume, fly ash, nano-SiO₂ and nanoclay to the clay soil. As a result of the UCS test, the strength values of the specimens prepared with additives increased. The results showed that the use of industrial waste, fiber and nanomaterials had an effect on the physical and engineering properties of the soil and significantly improved the soil.

Keywords: Soil stabilization, Clay, Silica fume, Fly ash, Nano-SiO₂, Nanoclay, Glass fiber, Basalt fiber, Uniaxial unconfined compressive strength

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Kil minerallerinde a) tetrahedral ve b) oktahedral tabakalar (Craig, 1974)	12
Şekil 3.2. Kaolinitin yapısı (Taşçı, 2011)	13
Şekil 3.3. İllitin yapısı (Taşçı, 2011).....	14
Şekil 3.4. Montmorillonitin yapısı (Taşçı, 2011).....	14
Şekil 3.5. Kil kristal yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması (Mitchell & Soga, 2005)	16
Şekil 4.1. Zemin iyileştirme yöntemleri (Erenson, 2015)	18
Şekil 4.2. Cam liflerin kopma mukavemeti ve uzaması (Özdemir et al., 2006).....	22
Şekil 5.1. F sınıfı uçucu kül	26
Şekil 5.2. Silis dumanı	27
Şekil 5.3. Cam lifi	28
Şekil 5.4. Bazalt lifi	28
Şekil 5.5. Nano-SiO ₂	29
Şekil 5.6. Nanokil	30
Şekil 5.7. Çalışmada kullanılan Etüv	32
Şekil 5.8. Elek analizi	33
Şekil 5.9. Hidrometre deneyi	34
Şekil 5.10. Özgül ağırlık deneyi.....	35
Şekil 5.11. Kohezyonlu zeminlerin su içeriklerine göre aldıkları kıvamlar (Das, 1995)	35
Şekil 5.12. Casagrande aleti ve likit limit deneyinin yürütülmesi.....	36
Şekil 5.13. Plastik limit deneyi	37
Şekil 5.14. Standart Proktor deneyi	38
Şekil 5.15. Zemin sınıflandırma sistemi (ASTM D2487-00, 2017).....	39
Şekil 5.16. Plastisite kartı (ASTM D2487-00, 2017).....	39
Şekil 5.17. UCS deneyi için zemin numunelerinin hazırlanışı.....	40
Şekil 5.18. Proktor deneyi için zemin örneklerinin hazırlanışı	40
Şekil 5.19. a) Deney numunelerinin hazırlanışı b) UCS deney cihazı c) Nem kabındaki numuneler	42
Şekil 6.1. Granülometri eğrisi	43
Şekil 6.2. Zemin örneklerinin plastisite kartındaki yeri	45
Şekil 6.3. Farklı oranlarda karıştırılan zemin örneklerinin likit limit ve plastik limit değerleri (SD: silis dumanı, UK: uçucu kül).....	46
Şekil 6.4. Kompaksiyon parametreleri.....	46

Şekil 6.5.	Farklı su içeriklerinde, saf kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	48
Şekil 6.6.	Farklı su içeriklerinde, 0 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	49
Şekil 6.7.	Farklı su içeriklerinde, 3 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	51
Şekil 6.8.	Farklı su içeriklerinde, 7 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	53
Şekil 6.9.	Farklı su içeriklerinde, 14 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	54
Şekil 6.10.	Farklı su içeriklerinde, 0 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	55
Şekil 6.11.	Farklı su içeriklerinde, 3 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	56
Şekil 6.12.	Farklı su içeriklerinde, 7 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	58
Şekil 6.13.	Farklı su içeriklerinde, 14 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri	59
Şekil 6.14.	Farklı su içeriklerinde, farklı oranlarda lif katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri	60
Şekil 6.15.	Hazırlanan karışımın UCS değerleri.....	62
Şekil 6.16.	Farklı su içeriklerinde hazırlanan saf kil numunelerinin (S1) kırılma modları	63
Şekil 6.17.	Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda hazırlanan nanomalzeme katkılı numunelerinin (S2, S3, S4, S5, S6, S7) kırılma modları	64
Şekil 6.18.	Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda hazırlanan endüstriyel atık katkılı numunelerinin (S11, S12, S13, S14, S15, S16) kırılma modları	65
Şekil 6.19.	Farklı su içeriklerinde farklı oranlarda hazırlanan lif katkılı numunelerinin (S8, S9, S10, S17, S18, S19) kırılma modları.....	66
Şekil 6.20.	S1 numunenin SEM görüntüleri	67
Şekil 6.21.	Nanoparçacık katkılı kil numunelerinin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri	68
Şekil 6.22.	Lif katkılı kil numunelerinin SEM görüntüleri	69
Şekil 6.23.	Endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri	70
Şekil 6.24.	SD-nanoparçacık-CF karışımlarıyla hazırlanan kil numunelerin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri.....	71
Şekil 7.1.	Grey korelasyon dereceleri	77

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Kıl minerallerinin özellikleri (Angın, 1993).....	15
Tablo 4.1. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım alanları (Schübeler, 1996)	20
Tablo 5.1. Uçucu külün kimyasal bileşenleri	26
Tablo 5.2. Silis dumanının kimyasal bileşenleri	27
Tablo 5.3. Cam lifin fiziksel özellikleri	28
Tablo 5.4. Bazalt lifin fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 5.5. Nano-SiO ₂ 'nin fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 5.6. Nanokilin fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 5.7. Deneysel program.....	31
Tablo 5.8. Hidrometre deneyi için kullanılan veriler	34
Tablo 5.9. Çalışmada kullanılan ilgili standartlara uygun numune örnekleri	42
Tablo 6.1. Özgül ağırlık deney sonuçları	44
Tablo 6.2. Likit limit deney sonuçları	44
Tablo 6.3. Plastik limit deney sonuçları.....	44
Tablo 6.4. Nano tabanlı katkı maddeleriyle hazırlanan karışımların deneysel programı	62
Tablo 7.1. Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda katkıllı zeminin UCS değerleri	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

G_s	: Özgöl ağırlık
K	: Sıcaklık dönüştürme katsayısı
m_1	: Su muhtevası tayinininde kap ağırlığı
m_2	: Su muhtevası tayinininde kap ağırlığı+yaş numune
m_3	: Su muhtevası tayinininde kap ağırlığı+kuru numune
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlık
γ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
%P	: Her bir elek için geçen yüzde
w_k	: Kuru numune ağırlığı
w_{opt}	: Optimum su içeriği
w_1	: Özgöl ağırlık deneyinde piknometre+su ağırlığı
w_2	: Özgöl ağırlık deneyinde piknometre+su ağırlığı+zemin

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BE	: Bazalt Elyaf
CBR	: California Taşıma Oranı
CE	: Cam Elyaf
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CKD	: Çimento Fırını Tozu
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
GBFS	: Granül Yüksek Fırın Cürufu
GRA	: Grey İlişkisel Analiz
LL	: Likit Limit
MDD	: Maksimum Kuru Yoğunluk
NK	: Nanokil
NS	: Nano-SiO ₂
OMC	: Optimum Nem İçeriği
PF	: Poliester Lif
PI	: Plastisite İndeksi
PL	: Plastik Limit
PPF	: Polipropilen Lif
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TRP	: Lastik Kauçuk Tozu
UCS	: Serbest Basınç Dayanımı
UK	: Uçucu Kül
USCS	: Birleştirilmiş (Birleşik) Zemin Sınıflandırma Sistemi
UU	: Konsolidasyonsuz Drenajsız Üç Eksenli Basınç Testi

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen sanayileşme ve kentleşmeye bağlı olarak yaşanan yapılaşma sorunu ülkemizde önemli bir konu haline gelmiştir. Buna bağlı olarak mühendislik özellikleri açısından kullanılabilir iyi zemin türlerinin bulunması zorlaşmış ve problemli zemin türleri ortaya çıkmıştır. Problemli zeminlerde genel olarak karşılaşılan sorunlar; yetersiz taşıma kapasitesi, zeminde sıvılaşma, zeminde meydana gelen yüksek deformasyon sorunları ve buna bağlı olarak gelişen yüksek oturma olarak sıralanabilir. İstenilen mühendislik parametrelerine sahip olmayan bu tür zeminler için zemin tabakalarının stabilizasyonu sağlanmalı veya diğer bir ifadeyle mühendislik özellikleri iyileştirilmelidir.

İnşaat ve geoteknik uygulamalarında killi zemin örnekleriyle sıklıkla karşılaşılmaktadır. İnce daneli zeminlerde, ortamda suyun varlığı büyük oranda mühendislik davranışında etkindir. Su, mineral daneleri arasında etkileşimi sağlar ve bu da plastisitesini (zeminin yoğrulabilme yeteneğini) ve kohezyonunu (birbirlerine yapışabilirliğini) etkiler. Yüksek su muhtevalarında dayanımları önemli ölçüde azalan killi yüksek oranda oturma yapmaya da müsaittir.

Killi zeminlerde karşılaşılan problemlerden dolayı bu tür zeminlerde zemin iyileştirmesine gidilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemlerinden bazıları; ön yükleme ve düşey drenler, taş kolonlar, derin karıştırma, jet grout, enjeksiyon, kompaksiyon ve zemine katkı madde eklenmesi olarak sıralanabilir. Zemine çeşitli katkı maddelerinin ilave edilmesiyle yapılan zemin iyileştirme yöntemi ekonomik ve etkili olmasıyla son zamanlarda giderek artmakta ve geoteknik mühendisliği uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Endüstri alanında hızlı, büyük ve sürekli bir gelişim içinde olunmasından dolayı endüstrinin gelişimi önemli bir konu haline gelmiştir. Endüstrideki bu gelişim ile birlikte getirdiği faydaların yanı sıra aynı zamanda olumsuz getirileri de mevcuttur. İnsan sağlığı ve çevresel etkenler göz önüne alındığında getirdiği olumsuzluklardan biri sanayi faaliyetleri sonucu meydana gelen atık malzemelerdir. Bu durum endüstriyel atık malzemelerin geri dönüşüme kazandırılmasını önemli kılmaktadır. Endüstriyel atık malzemelerin geri dönüşüme kazandırılması hem çevreyi korumada hem de ekonomik kazanım yönünden bizleri olumlu sonuçlara ulaştırabilir. Bu bakımdan geoteknik mühendisliğinde endüstriyel atık malzemelerin kullanımı son zamanlarda getirdiği faydalarla birlikte artmaktadır. Yeniden kullanıma müsait olan endüstriyel atıkların özellikle sorunlu killi zeminlerin iyileştirilmesinde tercih edilmesiyle olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sorunlu killi zeminlerin mühendislik özellikleri sağlanarak hem çevreci hem de ekonomik faydalar elde edilmektedir.

Nanomalzemeler, bütün bir birim gibi davranan ve boyutları 1 ile 100 nm arasında olan küçük bir nesne olarak tanımlanır. Nano boyutlu parçacıkların fiziği ve kimyası geleneksel malzemelerden farklıdır. Bunun temel nedeni, nanometre boyutundaki taneciklerin, silindirlerin,

plakaların yüzey alanı/hacim oranının artması ve uzamsal sınırlamadan kaynaklanan kuantum etkileridir (Krishnan & Shukla, 2019). Yüksek kimyasal reaksiyona girme, korozyon direnci, sağlamlık ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip nanomalzemeler, inşaat mühendisliği için özel bir ilgi alanıdır. Çünkü bu özellikler nanoyapılı malzemelere inşaat alanında geniş kullanım alanları sunmaktadır (Teizer et al., 2012). Kullanım alanlarından biri de sürdürülebilir ve çevre dostu olmasıyla birlikte zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılmasıdır.

Zeminlerin iyileştirilmesinde yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, nanomalzeme gibi malzemelerin kullanımının yanında aynı zamanda lif katkılı malzemeler de geoteknik mühendisliğinin kullanım alanına girmiştir. Günümüzde zeminleri stabilize etmede katkı maddelere alternatif olarak liflerin kullanımı yapılan çalışmalarla giderek artmaktadır. Lif türlerinden cam lifi, bazalt lifi, polipropilen lifi (PPF), poliester lifi (PF) gibi malzemeler zemin numunelerine eklenerek zemini iyileştirmek amaçlanmıştır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Killi zeminler, geoteknik mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan bir zemin türüdür ve bu tür zeminler fazla sayıda sorunu da beraberinde getirmektedir. Killi zeminler suyun varlığından önemli derecede etkilenmektedir. Su muhtevastaki değişim, plastisitenin artmasına sebep olmaktadır ve bu değişim Atterberg limitleriyle yansıtılmaktadır. Ayrıca taşıma gücü yetersizliği, yüksek oturma potansiyeli gibi sorunlar da bu tür zeminlerde görülen problemlerdendir. Buna benzer durumlarda projenin yerini değiştirmek bir çözüm olarak düşünülse de getirdiği ekonomik sorundan ve zaman açısından tercih edilmemektedir. Bunun yerine zemine çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek zeminin stabilizasyonu sağlanabilmektedir. Bu amaçlar doğrultusunda bu çalışmada killi bir zemine endüstriyel atık, lif ve nanomalzeme ekleyerek dayanımında meydana gelebilecek değişimlerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasının amacına ulaşılabilmesi için aşağıdaki adımlar yürütülmüştür:

- Endüstriyel atık, lif ve nanomalzeme kullanılarak iyileştirilen killi zeminler hakkında yapılan çalışmalara ait literatür taraması,
- Çalışmada kullanılan killi zeminin ASTM standartlarına göre laboratuvar da ilgili deneyler uygulanarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi,
- Killi zemine farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül, cam lifi, bazalt lifi, nano-SiO₂ ve nanokil ekleyerek tek eksenli basınç testinin uygulanması,
- Zemin numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülerinin alınması,

- Sonuçlar kapsamında Grey ilişkisel analizi yöntemi ile karşılaştırmalı analizin yapılması,
- Elde edilen sonuçlara göre değerlendirme yapılması ve önerilerde bulunulması.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Zeminlerde Endüstriyel Atık, Lif ve Nanomalzeme Kullanılması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Günümüzde sürdürülebilir mühendislik uygulamaları kapsamında, çevre dostu ve ekonomik malzeme kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, zeminlerin iyileştirilmesi ve taşıma gücünün artırılması amacıyla geleneksel stabilizasyon yöntemlerine alternatif olarak endüstriyel atıkların kullanımı dikkat çekmektedir. Ayrıca son yıllarda zemin stabilizasyonunda yeni nesil malzemelerin kullanımı üzerine yapılan çalışmalar artış göstermektedir. Bu kapsamda, lif takviyesi ve nanomalzemeler, zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla öne çıkan yenilikçi çözümler arasında yer almaktadır.

2.1.1. Endüstriyel Atık Kullanılarak Hazırlanan Zemin İçin Literatür Taramaları

Dehghanian yapmış olduğu çalışmada, katkı maddesi olarak uçucu kül kullanarak killi zemin örnekleri üzerindeki iyileşme oranını incelemiştir. İllit kili ile %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül kullanarak elde edilen karışımlara elek analizi, su muhtevasının belirlenmesi, Atterberg limitleri, standart proktor, üç eksenli kesme deneyleri uygulamıştır. Deneylerin sonucunda uçucu kül içeriğinin artışıyla beraber zemin örneğinin plastisite indeksi (PI) ve kohezyonunda azalma meydana gelmiştir. Sürtünme açısının sadece %5 uçucu kül ilavesiyle arttığı gözlenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda killi zemin numunelerine uçucu külün eklenmesiyle zeminin stabilize edildiği görülmüştür (Dehghanian, 2021).

Türköz vd. yapmış oldukları bu çalışmada hem şişme hem de dağılma özellikleri gösteren killi bir zeminin geoteknik özellikleri üzerinde silis dumanı ve kirecin etkilerini araştırmışlardır. Kireç ve silis dumanı kullanarak hem yüksek şişme potansiyeline hem de dağılma özelliğine sahip yüksek plastisiteli killi zeminin belirlenen mühendislik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Puzolanik reaksiyon için gerekli minimum kireç miktarı %3 olarak sabitlenmiş ve artan yüzdelerde %0, 1, 3, 5, 10, 15, 20 silis dumanı katkı karışımları ile deneyler hazırlanmıştır. Bu kapsamda standart proktor enerjisinde her katkı maddesi seviyesinde belirlenen kompaksiyon özelliklerinde sıkıştırılarak hazırlanan zemin numuneleri üzerinde farklı kür sürelerinde şişme yüzdesi, şişme basıncı, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç testleri yapılmıştır. Bu testlere ek olarak katkı maddelerinin zemin yapısında neden olduğu değişiklikleri incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre killi zeminin şişme ve dağılma özelliklerinin iyileştiği, ilk 7 günlük kür süresinin dayanım artışı üzerinde daha etkili olduğu ve %3 kireç ile %10 silis dumanı ilavesiyle optimum stabilizasyonun sağlandığı tespit edilmiştir (Türköz et al., 2018).

Varaprasad vd. yapmış oldukları bu çalışmada, düşük kırsal yollarda genişleyen zeminlerde kaplamalar için stabilize edici endüstriyel atık olarak mango çekirdek külü kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Bu doğrultuda, zeminin ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 mango çekirdek külü, %2, %4 ve %6 kalsiyum karbür kalıntısı, %2, %4 ve %6 kireç ile birlikte iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş numuneler üzerine Atterberg limiti, standart proktor testi, serbest basınç dayanımı (UCS), California taşıma oranı (CBR), serbest şişme indeksi, şişme basınç testi uygulanmıştır. Kireç ve kalsiyum karbür kalıntısı ile mango çekirdek külü uygulamasıyla beraber zeminin plastisitesi azalarak zeminin mühendislik özelliklerinde önemli ölçüde değişiklik meydana gelmiştir. Aynı zamanda zemini daha uygulanabilir hale getirerek CBR ve UCS değerlerini iyileştirmiştir. Mango çekirdek külü artışıyla birlikte genişleyen zeminin dayanımında artış olmuş ve %20 mango çekirdek külü ile %6 kalsiyum karbür kalıntısı ilavesiyle en yüksek dayanım değeri elde edilmiştir. İşlenmemiş örneklere kıyasla mango çekirdek külü ilavesi ile genişleyen zeminlerin stabilizasyonunda, UCS ve CBR değerlerinde sırasıyla %80 ve %93 artış olmuştur (Varaprasad et al., 2021).

Totiç vd. yapmış oldukları bu çalışmada killi zemin türünün stabilizasyonunda uçucu kül kullanımını inceleyip optimum uçucu kül miktarını araştırmışlardır. Başlangıçta killi zemin örneğine %5 ve %25 arasında değişen oranlarda katkı maddesi olarak uçucu kül ilave edilmiştir. Daha sonra Atterberg limitlerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Numunelerdeki artan uçucu kül ile birlikte standart proktor deneyi yapılmıştır ve buradan optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir. Bu deneyde belirlenen optimum su içeriği ile hazırlanan numuneler 1, 8, 16 ve 32 gün kür sürelerinde bekletildikten sonra California taşıma oranı (CBR) ve serbest basınç dayanımına (UCS) tabi tutulup hangi oranlarda iyileşme meydana geldiği incelenmiştir. Sonuçlara göre, uçucu külün kullanımıyla birlikte zeminde iyileşme görüldüğü belirlenmiştir (Totiç et al., 2019).

Naseem vd. yapmış oldukları bu çalışmada genişleyen zeminler için düşük kayma dayanımı, taşıma kapasitesi ve şişme parametrelerini iyileştirmek için çimento fırını tozu (CKD) ve lastik kauçuk tozunun (TRP) etkilerini araştırmışlardır. Zemin numunesine yaklaşık %5 TRP ve %5, 10, 15, 20, 25 oranında CKD eklenmiştir. Optimum içeriğin %10 CKD ile %5 TRP olduğu bulunmuştur. CKD ile TRP eklenmesiyle birlikte zeminin plastisitesinde azalma meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlara göre maksimum kuru yoğunlukta (MDD) artış olmuştur. %5 TRP ile serbest basınç dayanım (UCS) değeri, tepe değerine kadar artmıştır fakat %10 CKD eklenmesiyle birlikte UCS ve California taşıma oranı (CBR) değerlerindeki artış sırasıyla başlangıç dayanımının %277 ve %249'una ulaşmıştır (Naseem et al., 2019).

Soğancı vd. yapmış oldukları bu çalışmada granül yüksek fırın cürufu (GBFS) ve mermer tozu ile stabilize edilmiş killi zeminin geoteknik özelliklerini incelemişlerdir. Killi zemin çeşitli oranlarda %5, 10, 15 ve 20 mermer tozu ya da GBFS ile karıştırılmıştır. Zeminin geoteknik

özelliklerini belirleyebilmek için kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı (UCS) testleri yapılmıştır. Mermer tozu ya da GBFS kullanılarak iyileştirilen killi zeminlerin optimum nem içeriğinde (OMC) azalma meydana gelmiştir fakat birim hacim ağırlığı, maksimum kuru yoğunluk (MDD) ve UCS kürleşme süresine bağlı olarak artmıştır. Optimum katkı maddesi miktarı düşük plastisiteli (CL) zeminde %15 mermer tozu ya da %10 GBFS iken yüksek plastisiteli (CH) zeminde %15 GBFS ya da %10 mermer tozudur. Ayrıca CL zemininde %15 mermer tozu ve CH zemininde %15 GBFS ile en yüksek zemin iyileşme oranına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, GBFS ve mermer tozunun killi zemini iyileştirmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Soğancı et al., 2022).

Blay vd. yapmış oldukları çalışmada genişleyen zeminlerin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak atık cam tozunun etkisini araştırmışlardır. Bu doğrultuda zeminin kuru ağırlığına göre %2,5, %5, %10, %15 ve %25 atık cam tozu zemin numunesi ile karıştırılmıştır. Atterberg limitleri, kompaksiyon, serbest şişme, serbest basınç dayanımı (UCS), doğrudan kesme dayanımı ve California taşıma oranı (CBR) testleri de dahil olmak üzere farklı atık cam tozu yüzdeleri ile işlenmiş ve işlenmemiş zemin için çeşitli laboratuvar testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre genişleyen zemine atık cam tozu eklemek, zemin numunesinin kıvamı ve kayma mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Blay et al., 2020).

Al-Khalili vd. yapmış oldukları bu çalışmada zemin iyileştirilmesinde kullanılan stabilizatör madde olarak silis dumanı ve metakaolinin etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada kullanılan zemin, yüksek plastisiteli (CH) zemin olarak sınıflandırılmıştır. İşlenmiş numuneler, zeminin iki katkı maddesi ile (%5, %10 ve %15) karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Atterberg limitlerinin silis dumanı ilavesiyle arttığı ve metakaolin ile azaldığı bulunmuştur. Özgül ağırlık, silis dumanı ile azalırken metakaolin ile artmıştır. Maksimum kuru birim ağırlık azalmış ve optimum su içeriği silis dumanı ile artmış ve metakaolin ile tersi gerçekleşmiştir. Sonuçlar, mevcut şişmenin her iki katkı maddesi ile de iyileştiğini göstermiştir (Al-Khalili et al., 2021).

2.1.2. Lif Kullanılarak Hazırlanan Zemin İçin Literatür Taramaları

Aishwarya ve Rachel yaptıkları bu çalışmada kumlu kil zemine bazalt lifi ekleyerek zeminin stabilitesini araştırmayı ve yenilikçi bir temel malzemesi sağlamak için kumlu kil zeminin ve bazalt lifle güçlendirilmiş kumlu kil zeminin maksimum kuru yoğunluğunu (MDD) ve optimum nem içeriğini (OMC) karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada kumlu kil zemine kıyılmış %0,5 bazalt lif ekleyerek OMC ile MDD değerleri araştırılmıştır. Kumlu kil zemini ile bazalt lifle güçlendirilmiş kumlu kil zemininin dayanımları belirlenmiştir. 18 kumlu kil zemini ve 18 bazalt lifle güçlendirilmiş kumlu kil zemini olmak üzere toplam 36 numune örneği hazırlanıp test edilmiştir. Bazalt lifle güçlendirilmiş kumlu kil zemininin MDD değeri, kumlu kil zemin ile karşılaştırıldığında $1,27 \text{ kg/m}^3$ oranında artmıştır. Bulgulara dayanarak, kumlu kil zemine bazalt lif

eklenmesiyle MDD değeri artarken, OMC değerinin azaldığı görülmüştür (Aishwarya & Rachel, 2023).

Arya vd. yapmış oldukları bu çalışmada, zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için siyah pamuk zeminde poliester lifi (PF) ve küspe külü karışımını kullanarak zemine etkisini araştırmışlardır. Siyah pamuk zeminin stabilizasyonunda küspe külünün çeşitli oranları için %0, %4, %8 ve PF için %0, %0,15, %0,30, %0,60 zeminin ağırlıkça oranları kullanılmıştır. Daha sonra likit limit, plastik limit, özgül ağırlık, zeminin dane dağılımı, standart proktor ve California taşıma oranı (CBR) testleri uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda, küspe külü ve PF optimum yüzdesinin zeminin dayanımını artırdığı görülmüştür (Arya et al., 2023).

Tomar vd. yaptıkları bu çalışmada polipropilen lifi (PPF) ve nano silika karışımının killi zeminin dayanıklılığı ve dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla likit limit, plastik limit, maksimum kuru yoğunluk (MDD) ve serbest basınç dayanımı (UCS) gibi mühendislik özellikler işlenmemiş zemin, nano silika katkılı zemin ve nano silika ile PPF katkılı zeminle birlikte analiz edilmiştir. Nano silikanın dört farklı kombinasyonları %1, %3, %5 ve %7 iken PPF farklı yüzdeleri %0,1, %0,4, %0,7, %1 ve %1,3 olarak kullanılmıştır. Analiz sonuçlarında nano silika eklenmesinde PPF artışıyla birlikte UCS değerinde artış görülmüştür. %0,7 PPF ile birlikte %7 nano silika yüzdesinde maksimum UCS değeri elde edilmiştir (Tomar et al., 2020).

Şahbaz ve Ünsever yapmış oldukları bu çalışmada düşük plastisiteli killi (CL) zeminlerin stabilizasyonunda çimento ve polipropilen lifin (PPF) etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda zeminin fiziksel özelliklerini belirleyebilmek için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zemin sınıfı CL olarak belirlenmiştir. Saf zemine %5 ve %10 oranında çimento, %0,5, %1, %1,5 oranında PPF eklenmiştir. Deneylerin sonucuna göre eklenen katkı malzemelerin zeminin stabilizasyonunda olumlu etkiye sahip olduğu görülmüştür (Şahbaz & Ünsever, 2020).

Gürocak ve Topçuoğlu yaptıkları çalışmada kaolin kilin bazalt lif kullanarak serbest basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bazalt lif %0, %1, %2 ve %3 oranlarında iken zeminin su içerikleri ise %20, %25, %30 ve %35 olarak belirlenmiştir ve UCS deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre zemin numunesine %25 su içeriği ve %1 oranında bazalt lif ilave edilmesiyle UCS değerinin maksimum değere ulaştığı gözlenmiştir (Gürocak & Aslan Topçuoğlu, 2023).

Saran ve Demiröz yapmış oldukları bu çalışmada, bazalt lif ve uçucu külün zemin stabilizasyonundaki etkisini araştırmışlardır. 6-24 mm uzunluğundaki bazalt lif, %0-1,5 bazalt lif yüzdesi, 1-56 gün kür süreleri, %0-15 uçucu kül yüzdesi değişken olarak seçilmiştir. Optimum su içeriği ve maksimum yoğunluk değerleri kullanılarak hazırlanmış zemin örnekleri üzerinde serbest basınç dayanımı (UCS), yarmada çekme, permeabilite deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda optimum parametreler; bazalt lif uzunluğu için 18 mm, bazalt lif yüzdesi için %1, uçucu kül yüzdesi için %10, kür süresi olarak 56 gün belirlenmiştir. Numune örneğinde bazalt lif

uzunluğunun ve içeriğinin artmasıyla birlikte permeabilite katsayısı artarken uçucu kül içeriğinin artmasıyla beraber permeabilite katsayısı azalmıştır (Saran & Demiröz, 2022).

Kulanthaivel vd. yapmış oldukları bu çalışmada nano silika ve rastgele dağılmış liflerin killi zeminin mukavemet davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu doğrultuda kayma dayanımı ve sıkıştırma özelliklerini iyileştirmek için problemli killi zemine %0,2, %0,4, %0,8, %1 nano silika ve %0,25, %0,5, %0,75, %1 polipropilen lif ilave ederek zemin örneğine etkilerini incelemişlerdir. Kullanılan nanoparçacıkların çapının 10-20 nm aralığında olduğu görülmüştür. Nano silika ile iyileştirilmiş killi zemin ile birlikte iyileştirilmemiş ve polipropilen lif üzerinde serbest basınç dayanımı (UCS) ve standart proktor sıkıştırma testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, polipropilen lif katkılı zayıf zeminde maksimum kuru yoğunluk (MDD) artmış ve zeminin optimum nem içeriği (OMC) azalmıştır. Fakat nano silika katkılı zeminde MDD azalırken OMC artmıştır. Killi zemine polipropilen lif ve nano silika eklenmesiyle birlikte UCS değerinde artış görülmüştür. Polipropilen lif ile nano silikanın optimum miktarları sırasıyla %0,75 ile %0,8 olarak belirlenmiştir (Kulanthaivel et al., 2021).

Noolu vd. yapmış oldukları bu çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GBFS) ve cam liflerin değişen miktarlarda sürdürülebilir kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Hem işlenmemiş hem de stabilize edilmiş zeminin esneklik modülünü belirlemek için döngüsel bir üç eksenli test yapılarak zeminin sertlik davranışı değerlendirilmiştir. GBFS için %0-%30, cam lif için %0-%2, en boy oranı için 300-750 arasında değişen girdi parametreleri kullanılırken çıktı yanıtı serbest basınç dayanımı (UCS) ile karakterize edilmiştir. Zemin, GBFS ile mukavemette bir artış sergilese de eklenen GBFS miktarıyla orantılı olarak artan bir kırılabilirlik de ortaya çıkarmıştır. Cam lifin dahil edilmesinin, GBFS'nin zemine dahil edilmesinden kaynaklanan kırılabilirliğe karşı koyması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, en uygun değerlerin %24 GBFS ve %0,78 cam lif ile birlikte 512 en boy oranı olduğunu ortaya koymuştur. Optimum GBFS ve cam lifle işlenmiş zeminin kullanılması, doğal zemine kıyasla esneklik modülünde yaklaşık üç kat artış gösterirken, UCS değerinde %72'lik önemli bir artışla sonuçlanmıştır (Noolu et al., 2024).

Yazici ve Keskin yaptıkları bu çalışmada çeşitli içeriklerde (%0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20) ve uzunluklarda (6,12 ve 19 mm) polipropilen lif (PPF) ile güçlendirilmiş düşük plastisiteli killi bir zeminin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Güçlendirilmiş numuneler, üç farklı sınırlama basıncı (50, 100 ve 200 kPa) altında konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç testlerine tabi tutulmuştur. 6, 12 ve 19 mm PPF ile güçlendirilmiş numunelerde optimum lif içerikleri sırasıyla %0,15, %0,15 ve %0,20 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, göçme anındaki sapma gerilmesi, enerji yutma kapasitesi ve kesme dayanımı parametreleri açısından en yüksek değerler %0,20 PPF (19 mm) içeren numunelerde meydana gelmiştir (Yazici & Keskin, 2024).

Arslan vd. yapmış oldukları bu çalışmada lif takviyeli killerin gerilme ve şekil değiştirme ilişkileri araştırılmıştır. Laboratuvar deneyleri ile üç farklı kil ve üç farklı lif takviye edilerek

deneyisel süreç gerçekleştirilmiştir. Takviyeli ve takviyesiz numuneler, serbest basınç dayanımı (UCS) testlerine, akma, gerilme ve şekil değiştirme değerlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre cam lif takviyesiyle, UCS değeri maksimum 77 kPa değerine ulaşmış, optimum performans 40 mm'lik bir lif uzunluğunda ortaya çıkmış, hem lif uzunluğunun hem de zemin tipinin zemin stabilizasyonunun etkinliğini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür (Arslan et al., 2024).

2.1.3. Nanomalzeme Kullanılarak Hazırlanan Zemin İçin Literatür Taramaları

Sharma ve Singh yaptıkları çalışmada killi zeminin farklı özellikleri üzerine nano silika gibi nanoparçacıkların etkilerini araştırmışlardır. Zeminin Casagrande limit, plastik limit ve sıkıştırma karakterleri üzerine etkilerini bilmek amacıyla killi zemine farklı oranlarda nano silika eklenmiştir. Test numuneleri %1, %3, %5 ve %7 oranlarında zeminin kısmi değiştirilmesinde nano silika ile birlikte hazırlanmıştır. Toplamda 75 test numunesi hazırlanmıştır. Sonuç olarak nano silika yüzdesindeki artışla birlikte optimum nem içeriği (OMC), plastik limit, likit limit ve maksimum kuru yoğunluktaki (MDD) azalma gibi zemin özelliklerinde artış meydana gelmiştir. Zeminin Casagrande limiti stabilize edilmemiş zemin için %7 nano silikaya kadar %57.18'den %76.05'e artmıştır ve zeminin MDD değeri %7'ye kadar nano silika ile karıştırıldığında %19.54 azalmıştır (Sharma & Singh, 2023).

Aksu ve Eskisar çalışmalarında nano silika parçacıkları ile birlikte zemin iyileştirmenin geomekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kil, killi kum ve kumlu zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nano silika ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Bu doğrultuda zeminin mühendislik özellikleri Atterberg limiti, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı (UCS), ultrasonik darbe hızı, donma-çözülme ve direkt kesme deneyi aracılığıyla değerlendirilmiştir. Nano silika içeriği %0'dan %0,7'ye değişmiştir, çimento içeriği ise zeminin kuru ağırlığına göre %5 ve %10'dur. Kür süresi 7 günden 150 güne değişmektedir. Zeminin kıvam, sıkıştırılabilirlik ve dayanım özellikleri nano silikanın ve çimentonun varlığından etkilendiği görülmüştür. %5 ve %10 çimento içeren kil numunelerindeki optimum nano silika içerikleri sırasıyla %0,5 ve %0,7 olmuştur. Donma-çözülme direnci açısından %0,5 nano silika ve %10 çimento içeren killi kum numuneleri minimum dayanım kaybına uğramıştır. Nano silikanın az miktarda eklenmesiyle zeminin geomekanik özelliklerini potansiyel olarak iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır (Aksu & Eskisar, 2023).

Uysal ve Yılmaz yapmış oldukları bu çalışmada, nanoparçacık silisyum dioksit ve yüksek fırın cürufu kullanarak iyileştirilmiş ince taneli zemin üzerinde kompaksiyon özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla standart proktor testleri uygulanmıştır. %10, %20, %30 ile %40 oranlarında yüksek fırın cürufu ve %1 ile %1,5 silisyum dioksit kullanılarak farklı iki türde numune örneği hazırlanmıştır. Uygulanan test sonuçlarına göre, zemin örneğine yüksek fırın cürufu eklenmesiyle beraber maksimum kuru yoğunlukta (MDD) bir azalma meydana gelmiştir. Yüksek

fırın cürufu ve silisyum dioksit nanoparçacıkların ilave edilmesiyle birlikte MDD değerinde artış olmuştur. Böylelikle az miktarda kullanılan silisyum dioksitin kompaksiyon özellikleri üzerinde zemini stabilize ettiği sonucuna varılmıştır (Uysal & Yılmaz, 2021).

Ali vd. yapmış oldukları bu çalışmada, nanoparçacık olan nano-zeolit ile stabilize edilmiş zeminin mikroyapısal davranışını ve mühendislik özelliklerini incelemişlerdir. Zeminin kuru ağırlıkça %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1 nano-zeolit içeren zemin örnekleri bir dizi testten geçirilmiştir. Bu doğrultuda zemin numunelerine direkt kesme testi ve serbest basınç dayanım (UCS) testi uygulanmıştır. Nano-zeolit ile iyileştirilmiş zemin numuneleri 1, 7 ve 28 günlük kür süresi sonrasında testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, nano-zeolit ilaveli zemin örneklerinin kayma dayanımında önemli ölçüde iyileşme görülmüştür. Dayanımında meydana gelen artış kür süresinden de etkilenmiştir. 7 ve 28 günlük kürlemede %1 nano-zeolit ile stabilize edilmiş numunelerin UCS değeri, stabilize edilmemiş zeminlerin sırasıyla 10,2 ve 16,7 katı olduğu görülmüştür (Ali et al., 2022).

Mohammadi vd. yapmış oldukları bu çalışmada killi kum zeminine nano-kalsiyum karbonat ekleyerek zeminin geoteknik özelliklerini incelemişlerdir. Killi kum zemini; %10, %20, %30 kil ve %0,3, %0,7, %1,1, %1,5 nano-kalsiyum karbonat içermektedir. Bu örnekler 7, 14 ve 28 günlük kür süresince bekletilmiştir ve daha sonra tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Özellikle kil içeriği düşük olan killi kum numunelerine nano-kalsiyum karbonat eklenmesiyle tek eksenli basınç dayanımları artmıştır. Optimum nano-kalsiyum düzeyi, %10 ve %20 kil içeren zemin örnekleri için %0,7 iken %30 kil içeren zemin örnekleri için %1,1 olarak belirlenmiştir (Mohammadi et al., 2022).

Changizi ve Haddad yapmış oldukları bu çalışmada, killi bir zemine nano-SiO₂ ekleyerek zeminin geoteknik özelliklerini incelemişlerdir. Düşük plastisiteli killi (CL) zemine nano-SiO₂ ilave edilerek zeminin kayma dayanımı, serbest basınç mukavemeti ve maksimum kuru birim ağırlık üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Zemine kuru ağırlıkça %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında nano-SiO₂ eklenmiştir. İyileştirilmiş numunelerin kesme dayanımı, serbest basınç mukavemeti, maksimum kuru birim ağırlığı ise doğrudan kesme testi, serbest basınç testi ve sıkıştırma testi ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, nano-SiO₂ içeriğinin artışıyla birlikte killi zeminin iç sürtünme açısı, kohezyonu, serbest basınç dayanımı ve maksimum kuru birim ağırlığında artış görülmüştür. Dayanım parametrelerinde maksimum artışa ulaşabilmek için optimum nano-SiO₂ içeriği %0,7 olarak belirlenmiştir (Changizi & Haddad, 2016).

Arabani vd. yapmış oldukları bu çalışmada, pirinç lifi ve nanokilin zeminin mekanizması ve mekanik performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu doğrultuda saf zemin örnekleriyle birlikte %0,4, %0,8, %1 oranında nanokil ve %0,3, %0,6, %0,9 oranında pirinç lifi rastgele dağılımla 5, 10 ve 15 mm'lik üç uzunlukta test edildi. Hazırlanan numuneler sıkıştırma, serbest basınç dayanımı (UCS), direkt kesme dayanımı, çekme dayanımı, California taşıma oranı (CBR) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleriyle karakterize edilmiştir. Elde edilen

sonuçlara göre güçlendirilmiş zeminin kesme ve basınç dayanımlarının kontrol numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Optimum lif miktarı ise %0,9 olarak belirlenmiştir. Genel olarak lif ve nanokil eklenmesiyle killi zeminin mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca düşük maliyet ve sürdürülebilir bir seçenek olması zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliğini göstermiştir (Arabani et al., 2023).

Majeed vd. yapmış oldukları bu çalışmada, yumuşak zeminin modifikasyonunda ve stabilizasyonunda nanomateriyal kullanımının etkisini araştırmak için testler yapmışlardır. Yumuşak zemin, üç nanomateriyal türü (nanobakır, nanokil ve nanomagnezyum) ile işlenmiştir. Nanomateriyaller zeminin kuru ağırlığına göre az miktarda eklenmiştir. Atterberg limitlerini, doğrusal büzülme, sıkıştırma özelliklerini ve serbest basınç dayanımını belirlemek için laboratuvar testleri yapılmıştır. Araştırma sonuçları maksimum kuru yoğunluk, plastisite indeksi, doğrusal büzülme ve serbest basınç dayanımında önemli iyileşmeler olduğunu göstermiştir. İyileşmelerin nanomalzemelerin türüne bağlı olduğu görülmüştür. Serbest basınç dayanımı ve maksimum kuru yoğunluk, nanomalzeme içeriği arttıkça, dayanımın azalacağı bir yüzdeye ulaşana kadar artmıştır. Dolayısıyla, düşük dozlarda nanomalzemeler gibi daha ince parçacıkların eklenmesi, zeminin dayanımını artırabilir (Majeed et al., 2014).

Gelsefidi vd. yapmış oldukları bu çalışmada zayıf bir zeminin stabilizasyonunda nanomalzemenin etkisini araştırmışlardır. Kullanılan zemin düşük plastisiteli kil olarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada elli California taşıma oranı (CBR) testi yapılmıştır. İlk aşamada kirecin zayıf zeminin stabilizasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, zeminin iyileştirilmesinde kirecin etkisinin az olduğunu göstermiştir. İkinci aşamada, nano silikanın zemin-kireç karışımının stabilizasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, zemin-kireç karışımında nano silika kullanımı önemli bir etki göstermiştir. Nano silika katkısı, zeminin ve zemin-kireç karışımının CBR dayanımını sırasıyla 21 ve 7,5 kata kadar artırmıştır. Kürlenme süresinin etkileri de bu çalışmada değerlendirilmiş ve sonuçlar zemin-kireç karışımının CBR dayanımının nanomalzeme ilavesiyle daha hızlı arttığını göstermiştir (Gelsefidi et al., 2013).

3. KİL ZEMİNLER

3.1. Kil Mineralleri

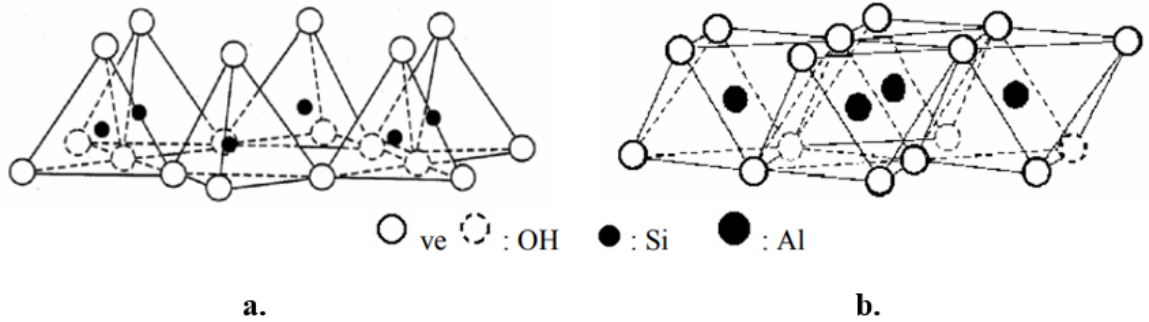
Kil mineralleri, kayaç yapıcı bazı minerallerin kimyasal olarak ayrışması sonucu meydana gelen kristalleşmiş malzemelerdir. Kimyasal olarak sulu alüminyum silikatların diğer metalik iyonlarla birleşmesi sonucu oluşur ve fillosilikat sınıfı mineral grubu olarak adlandırılırlar. Kolloidal boyutta (çapları 1 mikrondan daha az) kristal yapıya sahiptirler ve sadece elektron mikroskobu altında görülebilirler. Kil mineralleri ince plaka ya da levha şeklindedirler ve minerologlar tarafından yapılan X-ışını kırınımı çalışmalarında bu levhaların tekrarlı atomik yapılara sahip birçok kristal plakalardan oluştuğu gözlenmiştir (Holtz et al., 2015).

Silika Levhaları (Tetrahedral)

Dört yüzlü levha esas olarak köşelerde dört oksijen atomunun tek bir silika atomunu çevrelemesiyle oluşan dört yüzlü silika birimlerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Şekil 3.1). Her bir dört yüzlünün tabanındaki oksijenler aynı düzlem üzerindedir ve düzleme katılmayan oksijen köşelerinin hepsi aynı yöne doğrudur (Holtz et al., 2015).

Alümina Levhaları (Oktahedral)

Sekiz yüzlü levha esas olarak altı tane oksijen ya da hidroksil alüminyum, magnezyum, demir ya da diğer metalik atomlarla çevrenmesiyle meydana gelen sekiz yüzlü birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kil minerallerinde a) tetrahedral ve b) oktahedral tabakalar (Craig, 1974)

Sekiz yüzlü bir levhada farklı katyonların yer değişimine sıklıkla rastlanmakta ve bunun sonucunda da farklı kil mineralleri meydana gelmektedir. Yer değişen iyonların yaklaşık olarak eşit boyuta sahip olmaları durumunda bu yer değiştirme izomorf (eş biçimli) adını alır. Sekiz yüzlüler her zaman bir katyon içermeyebilir, bu durum fiziksel özellikleri biraz daha farklı bir kristal yapıya sahip yapıların ve farklı bir kil mineralinin oluşmasına neden olur. Örnek olarak, sekiz yüzlü levhanın tüm anyonlarının hidroksil ve katyonlarının üçte ikisinin alüminyumla dolu olması

durumunda mineral gipsit olarak adlandırılır. Alüminyumun yerini magnezyum alması ve tüm katyonlarda yer alması durumunda ise mineral brisit adını alır (Holtz et al., 2015).

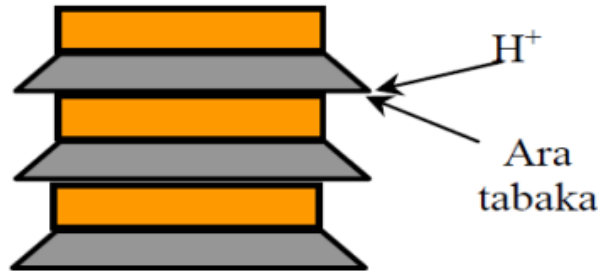
3.2. Kil Mineraller Grupları

Tüm kil mineralleri belirli tür katyona sahip sekizyüzlü ve dörtyüzlü yapıda, değişik şekillerde ve belirli bir sistemde birbirlerine bağlanan iki temel levhadan oluşmaktadır. Bu iki temel levhanın yapısındaki değişimler, farklı kil minerallerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Kaolinit

Kaolinit-serpantin grubu mineraller, en önemlisi kaolinit olan en az 13 farklı minerali içermektedir. Bu gruptaki mineraller bir dörtyüzlü (silika) ve bir sekizyüzlü (alümina ve gipsit) levhasının tekrarlanan katmanlarından oluşmuştur. Bir katmanın iki levhanın birer danesinden meydana gelmiş olmasından dolayı kaolinit 1:1 minerali olarak adlandırılmaktadır.

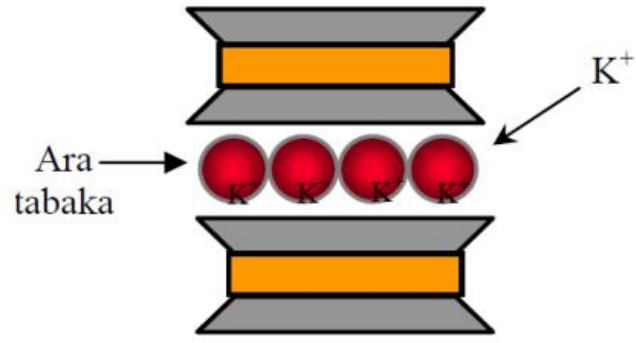
Kaolinit, feldspat ve mikanın (biyotit) granitik kayalardan ayrışması (hidrolizi ve asit yıkanması) sonucu oluşmuştur. Bir kaolinit kristali yaklaşık 0.72 nm kalınlığa sahip birçok katmandan oluşmaktadır (Şekil 3.2), (Holtz et al., 2015).



Şekil 3.2. Kaolinitin yapısı (Taşçı, 2011)

İllit

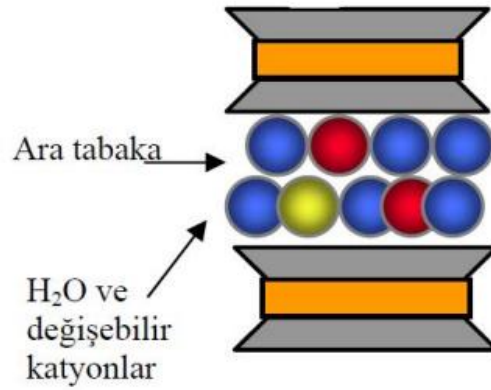
İllitler mika minerallerine benzer bir kristal yapısına sahiptir. Fakat daha az potasyum içerirler ve daha az eş biçimli yer değiştirme görülür (Şekil 3.3). Bu özelliklerinden dolayı diğer mikalardan kimyasal olarak daha aktiftirler.



Şekil 3.3. İllitin yapısı (Taşçı, 2011)

Montmorillonit

Montmorillonit içeren zeminler su muhtevası değişikçe (arttıkça) şişmeye karşı daha hassas olmaktadır ve oluşan şişme basıncı hafif yapılar ve yol üstü kaplamalarına kolaylıkla zarar verebilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Montmorillonitin yapısı (Taşçı, 2011)

3.3. Killerin Genel Özellikleri

Farklı kil minerallerinin bir araya gelmesiyle oluşan kil zeminleri dendiği zaman daha çok belli bir su muhtevasında belli bir plastisiteye sahip aynı zamanda kuruduğunda sertleşen ve diğer mineral bileşikleriyle birlikte bazı kil minerallerini de içeren kohezyonlu bir zemin anlaşılmaktadır.

Killerin özgül yüzeyi, kil minerallerinin tane büyüklükleri ile ters orantılıdır. Kil minerallerinin özgül yüzeyleri ne kadar büyükse bu tür zeminlerin hacimlerindeki değişim de o kadar fazla olur. Kil minerallerinin özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Kil minerallerinin özellikleri (Angın, 1993)

Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Büyüklik (nm)	100-5000	100-2000	10-1000
Kalınlık (nm)	50-2000	30	3
Özgül yüzey (m ² /g)	5-20	100-200	700-800
Kohezyon	Düşük	Orta	Yüksek
Hacim değiştirme özelliği	Düşük	Orta	Yüksek
Kasyon değiştirme kapasitesi (cmol/kg)	3-10	15-40	80-120

3.4. Su ve Kil Mineralleri Arasındaki Etkileşim

Kil minerallerinin yüzeylerinde dengelenmemiş kuvvet alanları meydana gelmekte ve bu durum, su, çözülmüş iyonlar ve kil mineralleri arasındaki fiziksel-kimyasal etkileşimlerin temel nedenini oluşturmaktadır. Bu kuvvetlerin oluşturduğu alanlardaki etkileşim, zeminlerin mühendislik davranışını büyük oranda kontrol eden ve kil zeminlerdeki yapı olarak tanımlanan zemin danelerinin farklı bileşimleri ve yerleşimlerinin oluşmasına yol açmaktadır.

Killi zeminlerin suya olan eğilimleri içerdikleri kil minerallerinin türüne ve miktarına bağlıdır. İçeriğinde büyük oranda kaolinit minerali içeren killi zeminlerin suya eğilimleri azdır ve bu tür zeminler su ile karşılaştıklarında stabilitelerini kaybetmezler. İçeriğinde büyük oranda montmorillonit minerali içeren killi zeminlerde ise suya hassasiyet fazladır ve su ile karşılaştıkları zaman hacimlerinde değişim söz konusu olur.

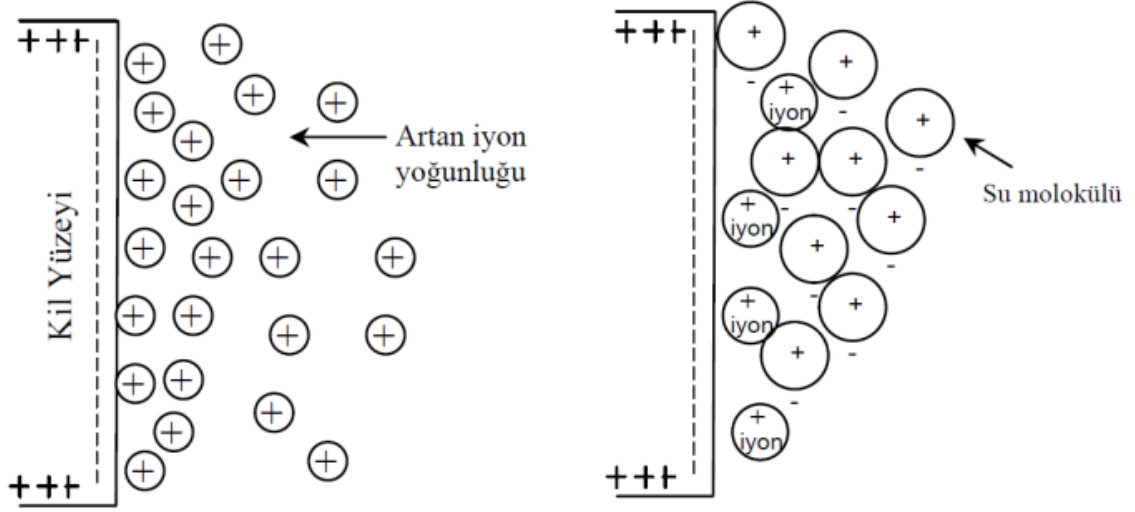
3.5. Kil Minerallerinin Hidratasyonu ve Çift Katman Difüzyonu

Kil mineralleri doğada daima hidratlı şekildedir, yani kilin her bir kristali su molekülleri tabakası tarafından çevrelenmiştir (Yong & B.P., 1975). Bu su, adsorbe su (zemin danesine tutunan su) olarak isimlendirilmiştir. Suyun bir kil danesinin yüzeyinde nasıl tutunduğunu bilmek önemlidir. İlk olarak su, elektriksel olarak nötr olmasına karşın biri negatif, diğeri de pozitif olmak üzere iki ayrı yük merkezi vardır. Bu yüzden su molekülü kil kristalinin yüzeyine elektrostatik olarak çekilmektedir. İkinci olarak su, kil kristaline hidrojen bağı ile bağlanmaktadır (sudaki hidrojen kil yüzeyindeki hidroksil molekülleri veya oksijen atomları tarafından çekilmektedir). Üçüncü olarak negatif yüklü kil yüzeyleri, sudaki kasyonları çekmektedir. Tüm kasyonlar iyonların cinsine bağlı olarak bir dereceye kadar hidratlı olduklarından dolayı kasyonlar suyun kil yüzeyine çekilmesine de katkıda bulunurlar. Bu üç faktör içinden hidrojen bağı en önemlilerindendir.

Suyun kil yüzeyine çekimi kil yüzeyine yakın yerlerde çok kuvvetlidir ve uzaklığa bağlı olarak çekim etkisi azalmaktadır. Su molekülleri tam yüzeyde çok sıkı ve kuvvetli bir şekilde tutulmakta ve yönlendirilmektedir. Yapılan ölçümler, kil yüzeyinin yakınındaki suyun yoğunluğu

ve bazı termodinamik ve elektriksel özelliklerinin serbest suya ait bu tür özelliklerden farklı olduğunu göstermektedir (Yong & B.P., 1975).

Çift katman difüzyonu kil-su-elektrolit sistem davranışının anlaşılmasında kullanılan önemli bir kavramdır ve killerin plastisite, şişme gibi özellikleri ile kil daneleri arasındaki etkileşimin açıklanmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 3.5).

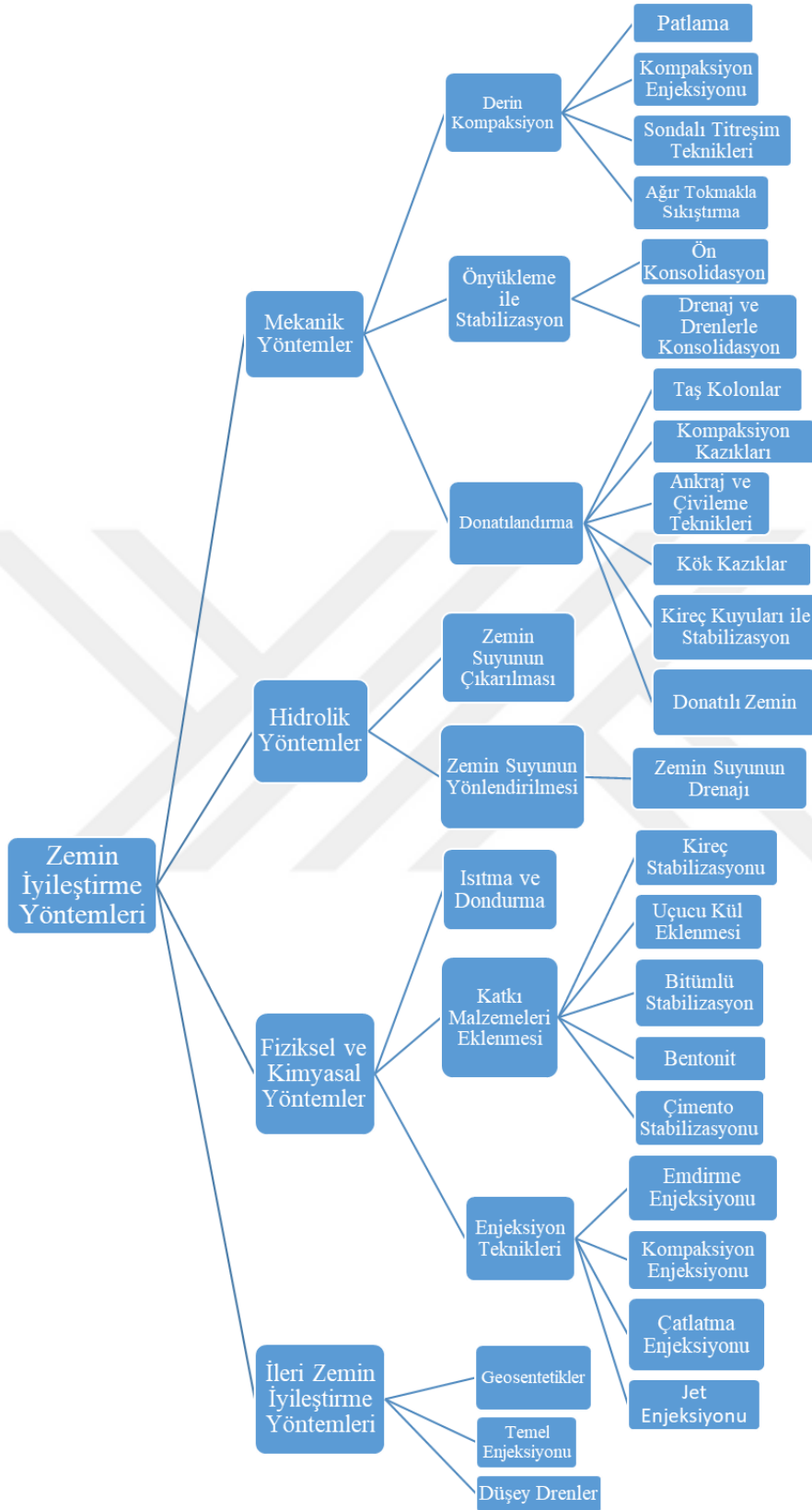


Şekil 3.5. Kil kristal yüzeyi ve absorbe edilen su mekanizması (Mitchell & Soga, 2005)

4. KİLLİ ZEMİNLERİN STABİLİZASYONU

4.1. Zemin Stabilizasyonu

İnşaat mühendisliğinin bazı uygulamalarında kullanılan zemin örnekleri, genellikle mühendislik parametreleri açısından istenilen özelliklere sahip değildir. Mühendislik veya maliyet açısından bakıldığında sahadaki mevcut zemin tabakaları, mukavemeti düşük, sıkışabilir özellikte veya yüksek hidrolik geçirgenliğe sahip olabilir. Bu gibi durumlarda yapının yerinin değiştirilmesi bir çözüm olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, çoğu zaman geoteknik kriterler dışındaki unsurlar yapının yerini belirlemekte ve inşaat mühendisi de mevcut sahada tasarımı gerçekleştirmektedir. Bu gibi durumlarda diğer bir olasılık da sahadaki zemin tabakalarının stabilizasyonu ya da diğer bir ifadeyle “mühendislik özelliklerinin” iyileştirilmesidir. Zemin iyileştirme yöntemleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Zemin iyileştirme yöntemleri (Erenson, 2015)

Killi zeminler, mevsimsel nem değişimleri nedeniyle kırılmalara, kabarmalara, farklı oturmalara ve kaplama türü yapılarda hasara neden olan içsel bir hacim değişikliğine sahiptirler. İnce taneli zeminlerin taneleri sahip oldukları mineral yapıları, biçim ve boyutlarıyla yüksek spesifik yüzeylidirler. Bu durum killi zeminlerin mühendislik özelliklerini ve zemindeki suyla bağlantısını etkileyen önemli etkenler olmaktadır. Suyun varlığından önemli ölçüde etkilenen kil, su içeriğinde meydana gelen artışla şişmeye neden olur. Zeminde oluşacak bu deformasyon, uygun temel tasarımının yapılmasını ve önlemlerin alınmasını son derece önemli kılmaktadır.

4.2. Zemin Stabilizasyonunda Endüstriyel Atık Malzeme Kullanımı

Atık maddeler ve bunlardan dolayı kirlenen alanlar, inşaat mühendisliği uygulamalarında karşılaşılan özel problemlerden biridir. Bu tür alanlara genellikle şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde rastlanır. Kırsal bölgelerde bile eski dolgu alanları, çöp depolama sahaları, kullanılmayan maden ocakları ve diğer birçok endüstriyel alan bulunabilmektedir ve bu alanlar kullanılırken, geoteknik koşulların yanı sıra çevresel bir takım kurallara da dikkat edilmelidir.

İnşaat mühendisliğini ilgilendiren atık türlerinden biri cüruf ve uçucu küller, liman ve nehirlerdeki çökelti zeminlere benzer inorganik malzemeler gibi olan endüstriyel atık ürünlerdir. Bu tür atık ürünler, çevresel etkileri göz önüne alındığında kontrol altına alınması önemli bir konu haline gelmiştir. Gerek çevre kirliliğini önleme gerek ekonomik gibi etkenler göz önüne alındığında bu tür malzemelerin geri dönüşüme kazandırılması önem kazanmıştır.

Uçucu Kül Tanımı

Uçucu külün elde edilişı, termik santrallerde toz durumdaki kömürün yanmasıyla oluşur. İnce toz durumda, yanmaz, tanecikli malzeme özelliğine sahip endüstriyel atık bir malzemedir (Suraneni et al., 2021). ASTM C 618, kimyasal bileşimine göre uçucu külleri C ve F sınıfı diye iki gruba ayırmaktadır. C sınıfı uçucu küllerin bileşiminde yüksek oranda kalsiyum oksit (CaO) bulunması sebebiyle puzolanik ve çimentoya benzer karakter gösterirler. F sınıfı uçucu küllerin ise puzolanik özellikleri çok zayıftır. Sahip oldukları kimyasal bileşimleri ve bileşikleri sayesinde uçucu kül ile çimentonun birbirlerine benzerlikleri fazladır. İçerdikleri bileşiklerin bağıl miktarları arasındaki farklar, uçucu kül ve çimentonun arasındaki esas farkı ortaya koymaktadır.

Zemini stabilize etmek kimyasal bir metot gerektirmektedir. Bu konudaki en problemli zeminler plastisite indisi (PI) 10 ya da daha yüksek olan kil grubu ve siltli kil grubudur. Bu tür zeminler stabilize edilmediği takdirde su ile temasa geçtikleri zaman yumuşak bir hale dönüşürler. Bu tür zeminlerin stabilizesi uçucu kül kullanılarak yapıldığında, kül içinde kalsiyum hidroksit biçiminde bulunan kireç hızlı bir şekilde katyon değişimine ardından topaklanmaya neden olacaktır. Sonrasında böyle tür zemin örnekleri daha çok silt sınıfı gibi davranış gösterecektir.

Uçucu küller yüzeysel zemin stabilizasyonunda çimento ve kireç gibi yumuşak zeminlerin iyileştirilmesinde tercih edilmektedir. Uçucu külün mekanik ve kimyasal stabilizasyon yöntemlerinde etkili bir katkı malzemesi olduğu görülmektedir. Sıklıkla kullanıldığı zemin türü ise California taşıma oranı (CBR) ve şişme sorunu olan zemin türleridir. Zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan uçucu külün faydaları aşağıdaki gibidir;

- Zeminin CBR değeri artar.
- Zayıf zeminlerin kazılarak yerine malzeme eklenmesi sebebiyle oluşacak ekonomik sorunların çözülmesinde yardımcı olur.
- Gerekli mühendislik özelliklere sahip olmayan zemin örneklerini stabilize ederek inşa süresini kısaltır.
- CBR değerinin artması ile yapılacak dolgunun kalınlığı da azalmış olur (Demirel & Öz, 2017).

Uçucu kül tane çapının 1 m ile 100 m arasında değiştiği görülmektedir. Uçucu kül kullanılarak, betonun mühendislik özellikleri üzerinde istenilen sonuçlar elde edilebildiği gibi aynı zamanda betonun performansına da olumlu yönde katkı vermektedir.

Uçucu küllerin kullanımı geniş bir alanı kapsamaktadır (Tablo 4.1). Bu alanlardan en önemlisi ise inşaat sektörüdür. Bunun dışında seramik, cam, döküm-metal sanayii, tarım sektörü, zeminin stabilize edilmesi, sondaj çalışmaları, buzlanmayı önlenmek gibi çeşitli sektörlerde kullanımı tercih edilmektedir (Pivnenko et al., 2016).

Tablo 4.1. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım alanları (Schübeler, 1996)

Malzeme	Kullanım Alanı/Yeri
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame olarak
Agrega	İnce agrega, iri agrega ve hafif agrega olarak
Beton	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Tuğla/Ateş Tuğlası	Katkı malzemesi olarak
Kerpiç	Bağlayıcı malzeme olarak
Yapı Malzemeleri	Blok, panel, duvar, gaz beton, beton boru, cam, boya, harç, seramik, plastik
Çeşitli Yapılar/Uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik uygulamalar

Silis Dumanı Tanımı

Silis dumanı, silisyum ya da demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemiyle üretimi esnasında elde edilen bir ürün olmakla birlikte bileşeni 1 µm'den küçük, amorf yapılı, küresel, camsı silis (SiO₂) parçacıklarından oluşan ve yüksek oranda puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür. Silikon metalinin üretimi sırasında ortaya çıkan gazın hızla soğutulup yoğunlaştırılmasıyla

birlikte silis dumanı elde edilir. Silis dumanları %85 - %98 oranlarında silis içeren amorf yapılı malzemelerdir (Tohumcu & Bingöl, 2013).

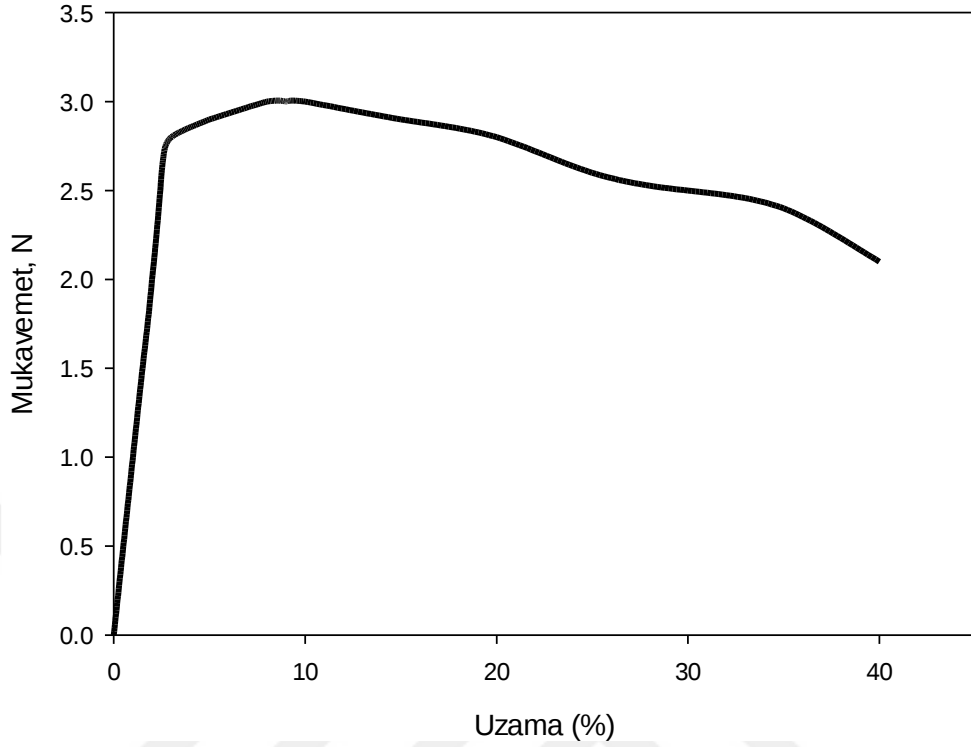
Genişlemeyen bir endüstriyel atık olan silis dumanı, genişleyen zemin alt tabakalarını güçlendirmek ve şişme basıncını azaltmak için kullanılabilir. Silis dumanının ana bileşeni amorf silikadır (SiO_2) ve çimento ile kirece göre daha geniş bir spesifik yüzey alanına, puzolanik aktiviteye ve çimentolaşma etkisine sahiptir. Silis dumanı; silisyum, ferrokrom ve ferromanganez dahil diğer silisyum alaşımlarının üretim sürecinin bir yan ürünüdür. Son derece yüksek yüzey alanına sahip, esas olarak amorf silikadan oluşan ince taneli bir maddedir. Eskiden ferrosilikon alaşımlarının veya elementel silikonun oluşturulması sırasında duman olarak üretilen silis dumanı, günümüzde zemini stabilize etmede kullanılmaktadır (Waleed et al., 2024).

4.3. Zemin Stabilizasyonunda Lif Kullanımı

Sıkışabilirliği yüksek, taşıma kapasitesi düşük olan zemin türlerini güçlendirmek için zemin stabilizasyonu tekniklerine sıklıkla başvurulmaktadır. Ayrıca geoteknik mühendisleri şişme problemi, şevlerde stabilite sorunu, sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde, zeminlerin donma-çözülme döngüsündeki dayanıklılığını artıran uygun zemin iyileştirme yöntemlerini uygular. Son yıllarda liflerin düşük maliyeti, yüksek mukavemeti, kolay ulaşılabilirliği, çevre dostu olması ve sürdürülebilirliği nedeniyle katkı maddesi olarak birçok alanda tercih edilmeye başlanmıştır. Özellikle geoteknik alanında geleneksel güçlendirme malzemelerine alternatif olması, zemin iyileştirmede kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda lif tipinin, lif içeriğinin, lif uzunluğunun, lif çapının, lifin spesifik yüzey alanının ve lifin yüzey pürüzlülüğünün zeminlerin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir (Yazici & Keskin, 2023). Çalışmaların gözden geçirilmesi, zeminin liflerle stabilize edilmesinin çeşitli geoteknik ve çevresel faydaları olan etkili, düşük maliyetli bir zemin stabilizasyon tekniği olduğunu göstermektedir (Zafar et al., 2024).

Cam Lifi Tanımı

Cam fiberler; asidik, magnezyum, silisli kum, kireçtaşı ve alüminyum karışımı sonucunda oluşan malzeme türleridir. Yüksek sıcaklık dayanımları ve stabilitelerinin yanı sıra saydamlık ve teknik amaçlara uygunluğu sahip olduğu özellikler olarak sıralanmaktadır (Şekil 4.2). Patel yapmış olduğu çalışmada cam lifi, killi zemine belirli bir optimum lif içeriğine kadar düzgün bir şekilde karıştırmıştır. UCS değerinin killi zemine göre maksimum iki kat arttığı görülmüştür. Cam lifi katkılı killi zeminin düşük hacimli esnek yol kaplaması için önemli ölçüde alt zemin malzemesi olarak kullanılabileceği bulunmuştur (Kumar Patel, 2022).



Şekil 4.2. Cam liflerin kopma mukavemeti ve uzaması (Özdemir et al., 2006)

Bazalt Lifi Tanımı

Bazalt, donmuş lavlardan kaynaklanan, volkanik kayalarda bulunan, erime sıcaklığı 1500°C ve 1700°C arasında olan doğal bir malzemedir. Bazaltların kimyasal bileşimi analiz edildiğinde ana bileşenlerinin SiO_2 ve Al_2O_3 olduğu gözlenmiştir (Fiore et al., 2015).

Bazalt kayasından elde edilen bazalt lifi inorganik bir lifdir. Kimyasal olarak aktif olmayan bazalt lifleri yanıcı ve patlayıcı değildir. Aynı zamanda sağlığa ve çevreye zarar vermedikleri için de çevre dostudur (Borhan, 2012). Yüksek kimyasal direnci, yüksek ısı direnci ve yüksek mekanik mukavemetiyle geniş uygulama avantajlarına sahiptir.

Yapılan araştırmalara göre bazalt lif katkılı hazırlanan zemin numunelerinin kenarlarında heterojenlik ve liflerin birikme olasılığı olmasına rağmen numune kenarlarının sonuçlar üzerindeki küçük etkisi nedeniyle göz ardı edilebileceği saptanmıştır (Diambra et al., 2010).

4.4. Zemin Stabilizasyonunda Nanomalzeme Kullanımı

Nanomalzemeler, üç boyutlu uzayda en az bir boyutu 1 ile 100 nm uzunluğunda olan yeni malzemeler olarak tanımlanır. Nano ölçekli malzemelerden faydalanılması bilimsel ve çevresel olarak çeşitli avantajlar sağlar. Bu avantajlar arasında enerji tüketimini azaltırken ekonomik yönden

ve çevre kirliliği bakımından olumlu katkıda bulunulması söylenebilir. Ayrıca diğer gelişmiş teknolojilere olan bağımlılığımızı da azaltabilir. Son yıllarda nanoteknolojinin geoteknik mühendisliğindeki potansiyel kullanımlarını değerlendirmek için önemli adımlar atılmış ve yapılan çalışmalar sayesinde nanoteknolojinin geoteknik mühendisliğinde kullanımına olanak sağladığı görülmüştür (Ghasabkolaei et al., 2017). Nanoteknolojinin hızlı gelişimi ve geleneksel malzemelerin sınırlamaları ile birlikte zemin iyileştirme amaçlı nanomalzemeler kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat mühendisliği ve inşaat alanında nanoteknoloji, malzemelerin temel özelliklerinin iyileştirilmesinde giderek daha fazla rol oynamaktadır. Bu rol, yapıların çevresel etkisini ve enerji tüketimini azaltmanın yanı sıra güvenliği artırma ve sivil altyapıyla ilgili maliyetleri azaltma potansiyeline sahiptir (Hanus & Harris, 2013). Zemin iyileştirme için nanomalzemelerin uygulandığı yöntemler üzerine yapılan araştırmalar oldukça umut vericidir ve yenilikçi yaklaşımlar aracılığıyla nanoteknoloji ve geoteknik mühendisliği arasındaki ilişkiye dair anlayışımızı geliştirmektedir.

Birçok zemin ve kaya minerali nanomateryal olduğundan ve kimyasal reaksiyonları nano ölçekte olduğundan, nanomalzemelerin enjeksiyon, zemin stabilizasyonu gibi geoteknik mühendisliğinin farklı alanlarında kullanımı için büyük bir potansiyel vardır. Killi zeminlerin uygulamaları sırasında getirdiği problemleri aşabilmek için zemine nanomalzemelerin eklenmesi son zamanlarda araştırılan bir konu olmuştur. Yenilikçi bir teknoloji yaklaşımıyla kullanılan nanomalzemeler zeminleri stabilize ederken mühendislik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Nanopartiküller, özellikle de nanokiller, temel olarak küçültülmüş tane boyutları ve önemli ölçüde daha yüksek özgül yüzey alanları nedeniyle zemin partiküllerine kıyasla daha fazla reaktivite sergilemektedir (Salimi et al., 2024).

Nano-SiO₂ Tanımı

Nano-SiO₂ ilaveli killi zeminlerin mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve dikkate değer sonuçlar elde edilmiştir. Nano-SiO₂ kullanımı birçok açıdan iyi performans gösterir ve zeminin dayanımını ve geçirimsizliğini önemli ölçüde artırabilir. Bununla birlikte nano-SiO₂ ile iyileştirilen kilin belirli bir süneklığe sahip olmaması ve zeminin çatlama direnci özelliklerinde daha az iyileşme sağlaması nedeniyle bazı dezavantajlara da sahiptir (Tao et al., 2023). Yapılan çalışmalar, nanomalzeme katkılı killi zeminlerin geoteknik parametrelerini iyileştirdiğini göstermiştir. Ahmadi ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada cam elyaf ve nano-SiO₂ ilaveli düşük plastisiteli kilin (CL) mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Zeminin kuru ağırlığına göre %1,5, %2,5, %3,5 cam elyaf ve %0,5, %1, %1,5 nano-SiO₂ katkı malzemeleri eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar liflerin ve nanomalzemelerin killi zeminin mukavemet özelliklerini değiştirdiğini göstermiştir (Ahmadi et al., 2021).

Nanokil Tanımı

Nanokiller katmanlı mineral silikatların nanopartikülleridir. Kimyasal bileşime ve nanoparçacık morfolojisine bağlı olarak nanokiller; montmorillonit, bentonit, kaolinit, hektorit ve halloysit gibi çeşitli sınıflara ayrılır. Organik olarak değiştirilmiş nanokiller, reolojik değiştiriciler ve gaz emiciler olarak polimer nanokompozitlerde potansiyel kullanımları olan organik-inorganik nanomalzeme sınıfıdır (Niroumand et al., 2013). Farshadi ve diğerleri yapmış oldukları bu çalışmada üç farklı oranlarda nanokille birlikte zeminde en yüksek içsel sürtünme açısını oluşturan cam lifin kullanımı incelemişlerdir (Farshadi et al., 2023). Abbasi ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada kuru ağırlıkça %0,25, %0,5, %1, %2 ve %4 nanokil kullanarak 1, 3 ve 7 günlük kür sürelerinde düşük ve yüksek plastisiteli iki farklı killi zeminin dispersif potansiyeli üzerinde etkilerini incelemişlerdir (Abbasi et al., 2018).

5. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasının temel amacı, farklı türde endüstriyel atıklar, lifler ve nanomalzemelerin hem bireysel hem de birleşik halde, farklı oranlarının kil zeminlere ilavesiyle çeşitli kür koşulları altında, mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimlerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Bu amaçla öncelikle deneyde kullanılan kilin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kil örnekleri; %0, %5, %10 ve %20 oranlarında silis dumanı, %0, %5, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül, %0, %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında nano-SiO₂, %0, %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında nanokil ile stabilize edilmiştir. Ayrıca, lif katkısı olarak %0, %1, %1,5 ve %2 oranlarında cam lifi ve aynı oranlarda bazalt lifi kullanılmıştır. Tüm katkıları, belirlenen oranlarda kil zeminle homojen şekilde karıştırılarak deney numuneleri hazırlanmıştır.

Fiziksel özelliklerin belirlenmesi kapsamında yapılan kompaksiyon (Proktor) deneyi sonucunda elde edilen optimum su içeriği esas alınarak numuneler hazırlanmış ve 0, 3, 7 ve 14 günlük kür süreleri boyunca bekletildikten sonra tek eksenli basınç (UCS) testine tabi tutulmuştur. Ayrıca, optimum su içeriğinin üzerindeki bir değer olarak %20 ve altındaki bir değer olarak %13 su içeriği seçilmiştir. Aynı deneysel prosedür, bu su içerikleri için de tekrarlanarak katkı maddelerinin farklı nem koşullarındaki performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Zeminin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde su içeriği kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, numuneler optimum su içeriğinde, bu değerin altında ve üstünde hazırlanarak farklı su içeriklerinin etkisi incelenmiştir. Proktor deneyinden elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği gibi parametreler, zeminin sıkışma davranışını doğrudan etkiler. Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler, tanecikler arasındaki optimum su sayesinde maksimum sıkışma kabiliyetine ulaşır ve en yüksek kuru birim hacim ağırlığı elde edilir. Ancak, optimum su içeriğinin altındaki numunelerde su eksikliği, tanecikler arasındaki kaymayı zorlaştırarak sıkışmayı sınırlar ve daha düşük yoğunluklar gözlenir. Öte yandan, su içeriğinin fazla olduğu durumlarda ise fazla su, boşluklarda birikerek tanecikler arası bağları zayıflatır, drenaj problemleri yaratır ve yine düşük kuru birim hacim ağırlıklarına neden olur. Bu farklılıklar, zemin yapısının ve su ile etkileşiminin mekanik davranış üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır.

5.1. Materyal

Laboratuvar ortamında uygulanan deneyler için malzeme temini, yapılacak çalışmanın ilk basamağını oluşturmaktadır. Bu çalışmada killi zemin Elazığ ili, Ataşehir mahallesi, silis dumanı Antalya Eti Metalurji'den, uçucu kül Bursa enerji santralinden, cam lifi Fiber Elyaf Kompozitsan ve Tic. Ltd. Şti'den, bazalt lifi Algı Laboratuvar Cihazları Kimyasal Sarf Malzemeleri'nden, nano-SiO₂ ve nanokil Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti'den temin

edilmiştir. Kullanılacak malzemeler Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarına getirilmiştir.

5.1.1. Zemin

Kil, kayaların kimyasal ayrışması ile oluşmuş çok ince daneli zeminlerdir. Killer, alüminyum (veya demir, magnezyum vb.) silikatlardır. Kil daneleri yassı (plaka, yaprak) biçimli olup, çok küçüktürler (0,002 mm'den küçük). Bu çalışmada kullanılan kil Elazığ ili Atşehir mahallesinde açılmış olan bir temel çukurundan temin edilmiştir.

5.1.2. Uçucu Kül

Bu tez çalışmasında mineral katkı malzemesi olarak F sınıfı uçucu kül tercih edilmiştir. Bu sınıf uçucu kül, düşük kireç içeriğine sahip olması ve yüksek puzolanik reaksiyon kapasitesi ile zeminin dayanımını artırabilmesinden dolayı tercih edilmiştir. Ayrıca, F sınıfı külün şişme potansiyelinin düşük olması ve kimyasal olarak daha kararlı bir yapı sunması, özellikle ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde avantaj sağlamaktadır. Bursa enerji santralinden temin edilen uçucu külün görünümü Şekil 5.1'de, kimyasal bileşenleri ise Tablo 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. F sınıfı uçucu kül

Tablo 5.1. Uçucu külün kimyasal bileşenleri

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

5.1.3. Silis Dumanı

Bu tez çalışmasında mineral katkı malzemesi olarak silis dumanı kullanılmıştır. Antalya Eti Metalurji'den temin edilen silis dumanı Şekil 5.2'de görülmektedir. Silis dumanının kimyasal bileşenleri ise Tablo 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Silis dumanı

Tablo 5.2. Silis dumanının kimyasal bileşenleri

	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
Silis dumanı	0,40	94,10	1,50	0,90	94,10	0,40	0,90	0,10

5.1.4. Cam Lifi

Bu tez çalışmasında zemini stabilize etmek için lif çeşitlerinden cam lifi kullanılmıştır. Cam lifi, Fiber Elyaf Kompozitsan ve Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Şekil 5.3'te gösterilen cam lifin fiziksel özellikleri Tablo 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Cam lifi

Tablo 5.3. Cam lifin fiziksel özellikleri

	Uzunluk	Kopma Gerilmesi	Kopma Uzaması	Elastisite Modülü	Özgöl Ağırlık	Çap
Cam lifi	6 mm	3400 MPa	%4,7	77 GPa	2,66 g/cm ³	13 µ

5.1.5. Bazalt Lifi

Tez çalışmasında kullanılan bazalt lifi Algı Laboratuvar Cihazları Kimyasal Sarf Malzemeleri tarafından temin edilmiştir. Kullanılan bazalt lif Şekil 5.4'te, bazalt lifin fiziksel özellikleri ise Tablo 5.4'te gösterilmiştir.



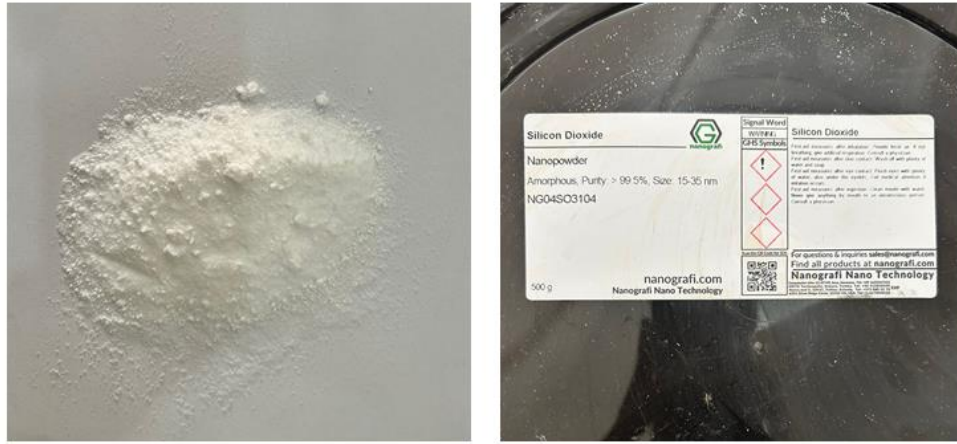
Şekil 5.4. Bazalt lifi

Tablo 5.4. Bazalt lifin fiziksel özellikleri

	Uzunluk	Kopma Gerilmesi	Kopma Uzaması	Elastisite Modülü
Bazalt lifi	6 mm	3900 MPa	%3,1	86,2 GPa

5.1.6. Nano-SiO₂

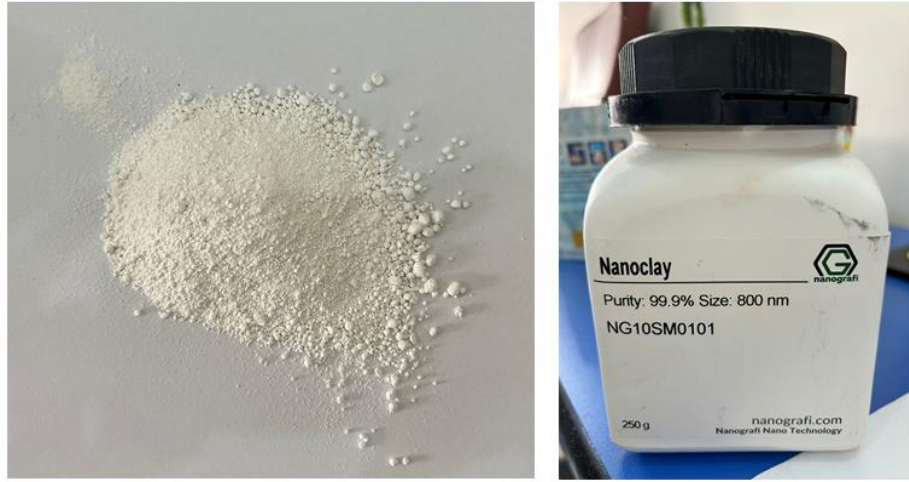
Tez çalışmasında kullanılan nano-SiO₂ Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Nano-SiO₂'nin görünümü Şekil 5.5'te, fiziksel özellikleri ise Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

**Şekil 5.5.** Nano-SiO₂**Tablo 5.5.** Nano-SiO₂'nin fiziksel özellikleri

	Boyut	Saflık
Nano-SiO ₂	15-35 nm	> %99,5

5.1.7. Nanokil

Tez çalışmasında kullanılan nanokil Nanografi Nano Teknoloji Bilişim İmalat ve Danışmanlık Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Nanokilin görünümü Şekil 5.6'da, fiziksel özellikleri ise Tablo 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Nanokil

Tablo 5.6. Nanokilin fiziksel özellikleri

	Boyut	Saflık
Nanokil	800 nm	%99,9

5.2. Metot

Bu çalışmanın temel amacı, endüstriyel atık ürünler (silis dumanı ve uçucu kül), lifler (cam ve bazalt lifleri) ile nanoparçacıklar (nano-SiO₂ ve nanokil) kullanılarak, kil zeminlerin mekanik davranışlarının hem makroskobik hem de mikroskobik düzeyde, söz konusu katkıların ayrı ayrı ve birlikte kullanım durumlarında ortaya koyduğu etkiler doğrultusunda incelenmesidir. Farklı kür süreleri (0, 3, 7, ve 14 gün) ve su içeriklerinde (optimum su içeriği altı, optimum su içeriği ve optimum su içeriği üstü), katkı maddelerinin optimum oranlarının kil zeminler üzerindeki mekanik etkilerini değerlendirmek amacıyla tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyleri uygulanmıştır. Kil zeminlerin iyileştirilmesinde katkı maddelerinin etkinliğini değerlendirmek için Grey ilişki analizi uygulanmıştır. Mikroyapısal değerlendirmeler ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Deneysel Program

Bu çalışmanın deneysel programı Tablo 5.7'de sunulmuştur. Kil numunelere katkı maddelerinin ilavesi ve stabilizasyon mekanizmaları aşağıda detaylandırılan metodoloji doğrultusunda gerçekleştirilmiştir:

i. Örselenmiş olarak laboratuvara getirilen kil numunesinin fiziksel özellikleri kapsamında dane boyu dağılım analizleri, özgül ağırlık, kıvam limitleri, kompaksiyon parametreleri belirlenmiştir.

ii. Zemin numunesi etüvde 105±5 °C’de kurutulmuş, ardından katkı malzemeleri dikkatlice kuru zemine kuru olarak karıştırılmıştır.

iii. Kompaksiyon deneyinden belirlenen optimum su içeriği ile seçilen optimum altı ve üstü su içerikleri her bir katkı malzemesi-kil karışımına eklenmiştir. Homojen bir kıvam elde edilene kadar karıştırılmış ve karışımların istenen su içeriğini sağlaması amacıyla çift kat plastik poşetlerde 24 saat süreyle bekletilmiştir.

iv. UCS deneyi için, karışım numuneleri, minyatür Harvard kompaksiyon aleti ile 38 mm çapında 76 mm yüksekliğinde üç tabaka halinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır. İlk tabaka kalıba yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra, ikinci ve üçüncü tabakalar da sırasıyla eklenmiş ve sıkıştırılarak tam numune elde edilmiştir.

v. Hazırlanan numuneler, kalıptan dikkatlice çıkarılarak nem içeriklerinin korunması amacıyla streç filmle sarılmıştır.

vi. Hazırlanan numuneler, yaklaşık 22°C ortam sıcaklığında hava geçirmez kaplar içerisinde 0, 3, 7 ve 14 gün süreyle küre bırakılmıştır.

Tablo 5.7. Deneysel program

No	Numune	Su İçeriği (%)	Kür süresi (gün)	Test
S1	Z	%13,0: %17,3: %20,0		
S2	Z+%0,5 NS	%13,0: %18,0: %20,0		
S3	Z+%0,7 NS	%13,0: %19,6: %20,0		
S4	Z+%1 NS	%13,0: %19,2: %20,0		
S5	Z+%0,5 NK	%13,0: %16,3: %20,0		
S6	Z+%0,7 NK	%13,0: %17,1: %20,0		
S7	Z+%1 NK	%13,0: %16,2: %20,0		
S8	Z+%1 BE	%13,0: %17,3: %20,0		
S9	Z+%1,5 BE	%13,0: %17,3: %20,0		
S10	Z+%2 BE	%13,0: %17,3: %20,0	0, 3, 7, 14	UCS
S11	Z+%5 SD	%13,0: %16,8: %20,0		Fiziksel Testler
S12	Z+%10 SD	%13,0: %17,2: %20,0		
S13	Z+%20 SD	%13,0: %17,8: %20,0		
S14	Z+%5 UK	%13,0: %16,1: %20,0		
S15	Z+%10 UK	%13,0: %16,6: %20,0		
S16	Z+%20 UK	%13,0: %16,8: %20,0		
S17	Z+%1 CE	%13,0: %17,3: %20,0		
S18	Z+%1,5 CE	%13,0: %17,3: %20,0		
S19	Z+%2 CE	%13,0: %17,3: %20,0		

Z: zemin; NS: nano-SiO₂; NK: nanokil; BE: bazalt lifi, SD: silis dumanı, UK: uçucu kül, CE: cam lifi

5.2.2. İncelenen Zeminin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Tezin bu aşamasında kullanılan kil örneğinin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla dane boyu dağılım analizleri (elek analizi ve hidrometre analizi), Atterberg limitleri, özgül ağırlık ile standart Proktor deneyleri yapılmıştır. Yürütülen deneyler ilgili ASTM standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır.

Su Muhtevası Tayini

Zemin örneğinin su muhtevası tayini ASTM D2216-19 esas alınarak gerçekleştirilmiştir (ASTM D2216-19, 2019). Bu doğrultuda üç adet paslanmaz metal kap temizlenmiştir. Kaplar numaralandırılarak boş bir şekilde 0,01 g hassasiyete sahip tartıda tartılmış ve çıkan sonuç kap ağırlığı (m_1) olarak not edilmiştir. Ardından zemin örneği kaplara doldurulmuştur ve tartılarak kap+yaş numune (m_2) olarak yazılmıştır. Zemin örneğiyle dolu olan kaplar 105 °C'lik etüve atılarak 24 saat boyunca bekletilmiştir (Şekil 5.7). Etüvden çıkarılan zemin örnekleri oda sıcaklığında bekletilerek soğutulmuştur. Tekrardan tartılarak kap+kuru numune (m_3) olarak not edilmiştir.



Şekil 5.7. Çalışmada kullanılan Etüv

$$w (\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada; w = su içeriği (%), m_1 = kap ağırlığı, g, m_2 = kap+yaş numune, g, m_3 = kap+kuru numune, g olarak verilmiştir.

Dane Boyu Dağılım Analizleri

Zemin türleri iri (kaba) taneli zeminler ve ince taneli zeminler olmak üzere iki gruba ayrılır. İri taneli zeminler çakıl ve kumdan, ince taneli zeminler ise kil ve siltten oluşmaktadır. Bir zemin türünün hangi zemin sınıfına dahil olduğunu belirlemek için elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılır. Elek analizi deneyi, zeminlerin 200 nolu elek üzerinde kalan iri kısmına uygulanır.

Özellikle ince taneli zeminlerde, kil ve silt boyutundaki taneler birbirlerine veya kum, çakıl boyutundaki tanelerin üzerine yapışarak topaklanmış halde olacağından, bunları birbirinden ayırmak için kesinlikle yıkayarak eleme yapılmalıdır. Elek analizi zeminin kaba taneli kısmına yönelik iken, hidrometre deneyi ise zeminin ince taneli kısmına yöneliktir. Elek analizi deneyi yapılırken ASTM D6913 / D6913M-17 standardı göz önüne alınarak yapılmıştır (ASTM D6913/D6913M-17, 2017).

İlk olarak kuru zemin örneği 200 nolu elek üzerine boşaltılır ve yıkayarak eleme yapılır. Yıkama işleminin uygulanmasının nedeni, ince taneli zeminlerde tanelerin birbirlerine yapışmış halde bulunabileceğidir. Elek üzerine alınan zemin örneği suyla birlikte yıkanarak elenir (Şekil 5.8). Eleğin altında akan su, temiz ve berrak oluncaya kadar yıkamaya devam edilir. Yıkamanın sonunda 200 nolu elek üzerinde kalan taneler hiç kayıp verilmeden etüvde 24 saat süreyle 105 °C’de kurutulur. Etüvden çıkarılan zemin örneği elek analizi için hazır hale gelmiş olur. Ardından yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla 3/4 in, 3/8 in, 4, 10, 30, 40, 50, 100 ve 200 nolu elekler dizilir ve elek sarsma tablasına konulur. En üst eleğe kuru numune eklenerek elek sarsma tablası çalıştırılır. Sarsma işlemi bittikten sonra her bir elek üzerinde kalan numune tek tek tartılır ve not edilir. Her bir elek için geçen yüzde (%P) aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$P (\%) = \frac{\text{Elekten geçen tanelerin toplam ağırlığı}}{\text{Elek analizi deneyinde kullanılan örneğin toplam ağırlığı}} \times 100 \quad (5.2)$$



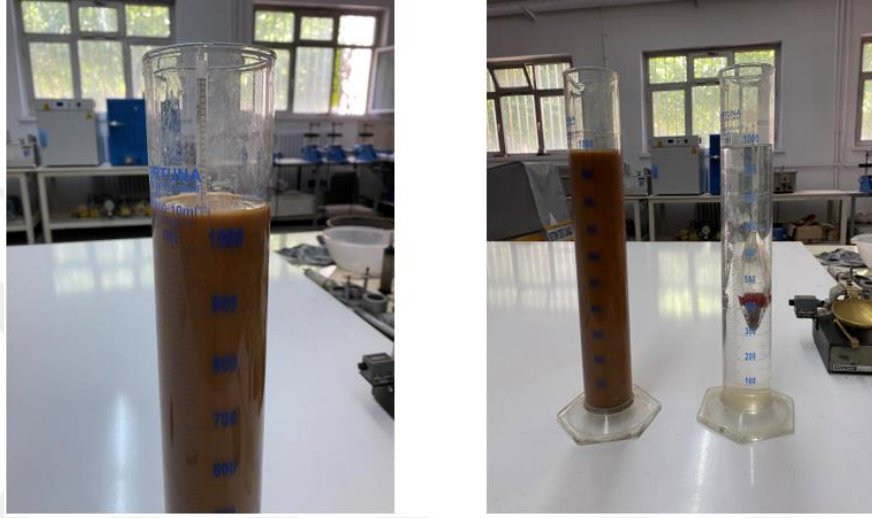
Şekil 5.8. Elek analizi

Zemin örneğinin hidrometre deneyi için ASTM D7928 standardı dikkate alınmıştır (ASTM D7928-16e1, 2017). Hidrometre deneyinin yapılma amacı, 200 nolu elek altında kalan numune örneğinin geçen yüzdeleri belirleyebilmektir. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi uygulanan bu deneyde

151 H tipi hidrometre kullanılmıştır. Tablo 5.8’de hidrometre deneyi için kullanılan veriler sunulmuştur.

Tablo 5.8. Hidrometre deneyi için kullanılan veriler

Zemin örneğinin özgül ağırlığı (G_s) gr/cm ³	2.66	Menisküs düzeltmesi	0,0008
Deney örneğinin kuru ağırlığı, gr	30	200 nolu elekten geçen yüzde, %	50,97



Şekil 5.9. Hidrometre deneyi

Özgül Ağırlık

Bu çalışmada ASTM D854-02 standardı göz önüne alınarak piknometre deneyi gerçekleştirilmiştir (ASTM D854-02, 2017). Yapılan elek analizi sonucu doğrultusunda zemin ince taneli zemin olarak bulunmuştur. Deneyde 100 ml’lik şişe kullanılmıştır. İlk olarak yoğunluk şişesi temizlenmiştir. Ardından içine damıtık su ilave edilmiştir ve şişenin kapağı seri bir hareketle kapatılarak içindeki fazla su kanaldan fışkırarak dışarı atılmıştır. Şişe içindeki suyla birlikte tartılmıştır. Bulunan değer w_1 olarak not edilmiştir. Şişenin kapağı çıkartılmıştır ve içerisine termometre daldırılarak suyun sıcaklığı ölçülmüştür. 100 ml’lik şişe kullanıldığı için zemin örneği 2 mm’lik elekten elenmiştir. Elekten elenen zemin örneğinden 20 g alınmış ve hiç kayıp verilmeden şişeye aktarılmıştır. Alınan kuru numune w_k olarak not alınmıştır. İçinde kuru numune olan şişeye bir miktar damıtık ve havası alınmış su ilave edilmiştir. Zemin taneleri birbirinden ayrılıp su ile tamamen homojen bir kıvam oluşturması için şişe ağzı kapatılarak çalkalanmıştır. Şişenin içerisindeki zemin örneğinin boşluklarında sıkışmış halde bulunan havanın çıkartılması için şişe cam desikatör içine yerleştirilmiştir (Şekil 5.10). Havası alınan şişenin içine tekrardan su ilave edilerek kapağı kapatılmıştır ve şişe+su+zemin olarak tartılmıştır. Bulunan değer w_2 olarak not

edilmiştir. Ardından kapak çıkartılarak karışımın sıcaklığı ölçülmüştür. Deney toplamda üç kez tekrarlanmıştır. Özgül ağırlığın hesaplanabilmesi için Denklem 5.3 kullanılmıştır. Deney sonucunda elde edilen değerler bu denklemde yerine yazılarak hesaplanmıştır.

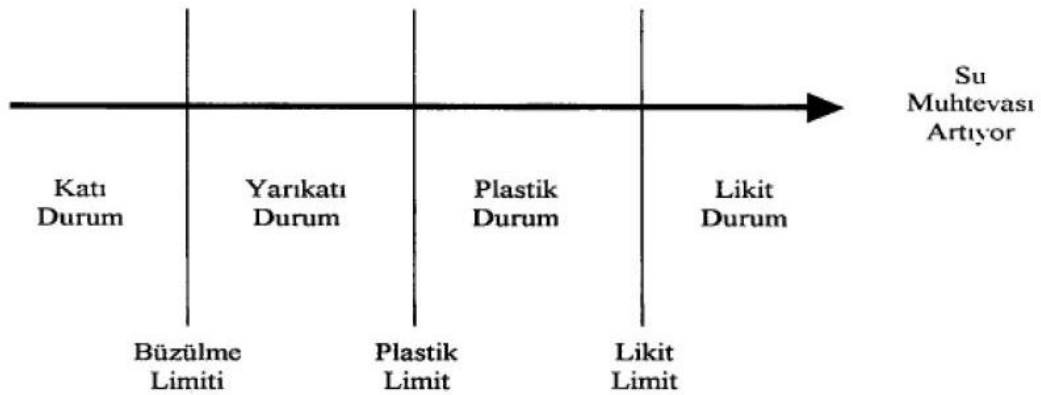
$$G_s = \frac{wk}{wk - (w_2 - w_1)} * K \quad (5.3)$$



Şekil 5.10. Özgül ağırlık deneyi

Kıvam (Atterberg) Limitleri

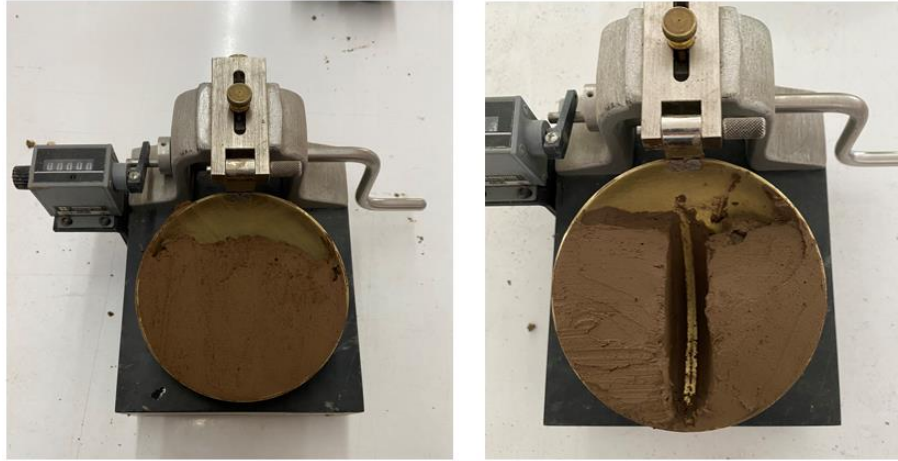
Zeminlerin farklı su içeriklerinde gösterdikleri davranış kıvam olarak adlandırılır. Zeminlerin kıvamlarını birbirinden ayırmak için Atterberg limitleri uygulanır. Yapılan bu deneyler sayesinde zeminin kıvamı hakkında bilgi sahibi olunur. Zeminlerin kıvam durumları şematik olarak Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Kohezyonlu zeminlerin su içeriklerine göre aldıkları kıvamlar (Das, 1995)

Casagrande Likit Limiti Deneyi

Bu deney Casagrande cihazı kullanılarak zeminlerin likit limitinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Çalışmada ASTM D4318-10e1 standardı göz önüne alınarak likit limit tayini yapılmıştır (ASTM D4318-10e1, 2017). Bunun için zemin örneği 40 nolu elekten elenerek içine bir miktar su ilave edilmiştir. Karıştırma kabında su+zemin örneği iyice karıştırıldıktan sonra Casagrande kabına aktarılmıştır. Yerleştirme işleminden sonra Casagrande kabının içindeki zemin örneğin üst yüzeyi aletin tabanlığına paralel olacak şekilde düzlenmiştir. Oluk açma bıçağı yardımıyla kabın içerisindeki örneğin ortasında bir oluk açılarak örnek iki parçaya bölünmüştür (Şekil 5.12). Düşme kolu, Casagrande kabının 10 mm yükseklikten saniyede 1 düşüş yapmasını sağlayacak hızda zemin örneğinin ortasında açılan oluk kapanıncaya kadar çevrilir. Oluğun kapandığı gözlemlendiğinde uygulanan düşüş sayısı not edilir. Kapanmanın olduğu bölgeden numune örneği alınarak önceden ağırlığı belirlenmiş kabın içine aktarılmıştır. Daha sonra tartılarak kap+yaş numune olarak not edilmiştir. Alınan numune örneği 105 °C'lik etüve atılarak 24 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numune örneği tartılarak kap+kuru numune olarak not edilmiştir. Yapılan işlemler farklı su içerikleri ile tekrar edilmiştir. Deneyde elde edilen düşüş sayısı ve buna karşılık gelen su içeriği değerleri, yatay eksende düşüş sayıları, düşey eksende ise su içeriği değerleri yer alacak şekilde bir grafik alanında işaretlenmiştir. İşaretlenen noktalardan geçen en iyi doğru çizilmiştir ve 25 düşüşe karşılık gelen su içeriği likit limit olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.12. Casagrande aleti ve likit limit deneyinin yürütülmesi

Plastik Limit

Bu deney, zeminin plastik kıvamda olduğu durumdaki en düşük su içeriğini belirlemek için yapılır. Bu çalışma ASTM D4318-10e1 standardı göz önüne alınarak uygulanmıştır (ASTM D4318-10e1, 2017). Numune hazırlama işlemi likit limit deneyinde yapılan işlemlerle aynıdır. Hazırlanan zemin örneği cam plaka üzerine yerleştirilerek parmaklar ile belli bir miktar basınç

uygulanarak yuvarlanmak suretiyle bir çubuk haline getirilir (Şekil 5.13). Yuvarlanan zemin örneğinin çapı 3 mm'ye ulaştığında yüzeylerinde çatlaklar ve yer yer kopmalar meydana geldiğinde numuneler önceden ağırlığı belirlenmiş kaba aktarılmıştır. Kaba aktarılan numune tartılarak kap+yaş numune olarak not edilmiştir. Su içeriğinin hesaplanabilmesi için numune 24 saat 105 °C'lik etüvde bekletilmiştir. Daha sonra kap tekrardan tartılmıştır. Çıkan değer kap+kuru numune olarak not edilmiştir. Bu işlemler 3 kere tekrarlandıktan sonra elde edilen sonuçların ortalaması alınarak plastik limit değeri bulunmuştur.



Şekil 5.13. Plastik limit deneyi

Plastisite İndeksi (PI) Hesabı

Plastisite indeksi (PI) zeminin bir plastik gibi davrandığı aralığı ifade eder. Denklem 5.4'teki bağıntı ile belirlenir.

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

Standart Proktor Deneyi

Standart Proktor deneyi için bu çalışmada ASTM D698-00ae1 standardı göz önüne alınmıştır (ASTM D698-00ae1, 2017). Numune hazırlamak için 5 kg ağırlığındaki zemin örneğine belirli oranda su ilave edilmiştir. 4326 gr ağırlığındaki ve 939,7 cm³ hacmindeki Proktor kabına zemin örneği 3 tabaka halinde eklenmiştir. Yerleştirilen her bir tabaka için 2,5 kg kütleli 0,305 m'den serbest bir şekilde düşen tokmakla birlikte 25 vuruş uygulanacak biçimde zemin örneği sıkıştırılmıştır (Şekil 5.14). Proktor kabının üst kısmında yer alan yaka kısmı çıkarıldıktan sonra kap tartılmıştır ve sıkıştırılmış numune + kalıp ağırlığı olarak not edilmiştir. Zemin örneğinin su içeriğini tespit etmek için sıkıştırılmış numuneden bir miktar alınarak ağırlığı önceden tartılmış kaba aktarılmıştır. Numune tartılarak kap+yaş numune olarak not edilmiştir ve etüve atılmıştır. Ardından zemin örneğine bir miktar daha su ilave edilerek deney tekrarlanmıştır. Her bir deneyin sonunda w ile γ_k değerleri Denklem 5.5 ve Denklem 5.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\gamma_n = \frac{w_{yas}}{v_{proktor}} \quad (5.5)$$

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1+w} \quad (5.6)$$

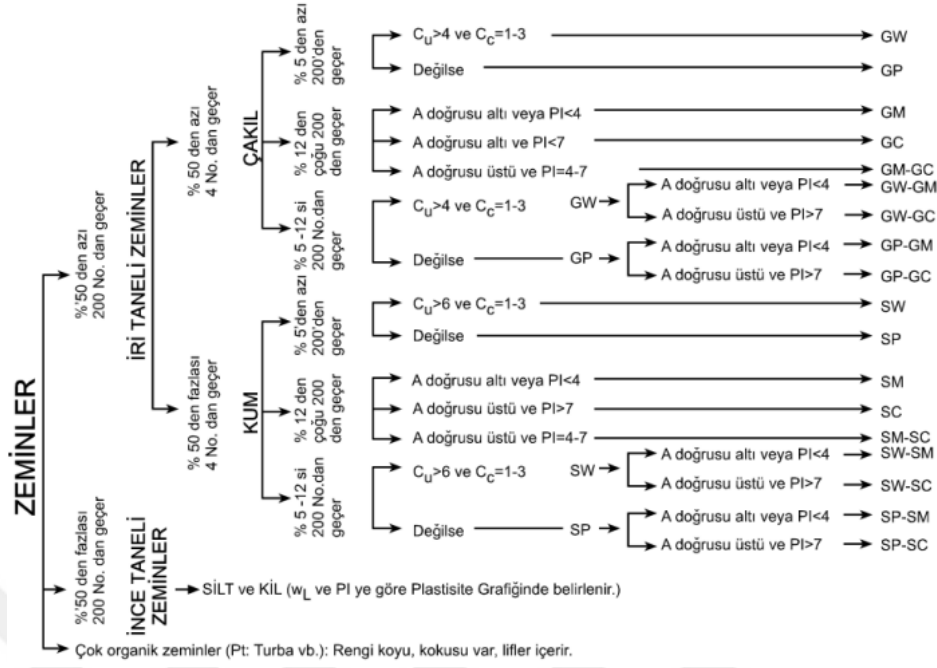
Deney, sıkıştırılmış numune+kalıp ağırlığı değeri düşmeye başladığı anda bitirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yatay eksen su içeriği, düşey eksen kuru birim hacim ağırlık (γ_k) olacak şekilde grafik çizilmiştir. Çizilen grafiğin tepe noktası, optimum su içeriği ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerini vermektedir.



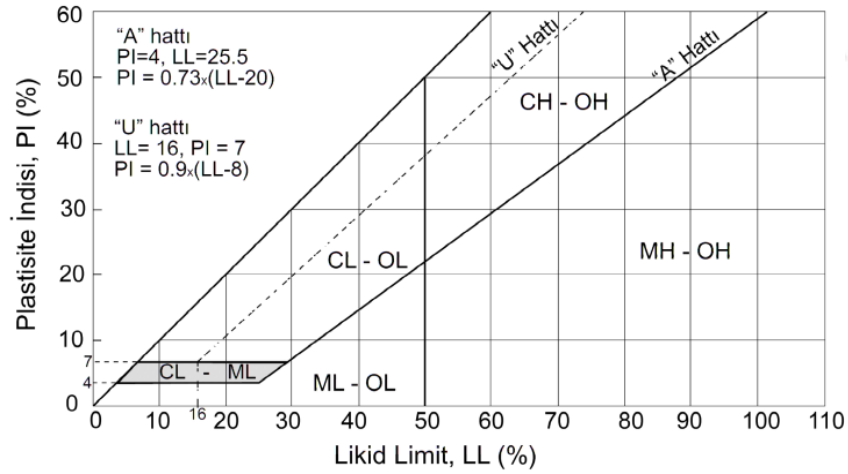
Şekil 5.14. Standart Proktor deneyi

5.2.3. İncelenen Zemin Örneğinin Sınıflandırılması

Zemin mühendisliğinde; temel tasarımı (inşaatı), şevlerin duraylılığı, yol yapımı, toprak istinat yapıları, toprak dolgu barajlar ve benzeri projelerde ve bilimsel çalışmalarda ve yayınlarda inceleme alanındaki zeminin tanımlanması ve bunun değişik mühendislik disiplinleri tarafından da anlaşılması için zeminlerin sınıflandırılması gerekir. Bu doğrultuda çalışmada ASTM D2487-00 standardı göz önüne alınmıştır (ASTM D2487-00, 2017). Zeminin sınıflandırılmasının yapılabilmesi için elek analizi ve Atterberg limitleri deneylerinden elde edilen sonuçlar dikkate alınmıştır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS) gereğince zeminin sınıflandırılması yapılmıştır (Şekil 5.15, Şekil 5.16).



Şekil 5.15. Zemin sınıflandırma sistemi (ASTM D2487-00, 2017)



Şekil 5.16. Plastisite kartı (ASTM D2487-00, 2017)

5.2.4. Numunelerin Hazırlanması

Fiziksel özellikleri belirlenen zemin numunelerinin serbest basınç dayanım (UCS) değerlerini belirlemek için 38 mm çapında, 76 mm yüksekliğinde numune örnekleri hazırlanmıştır.

Deney numunelerinin hazırlanma sürecinde kuru zemine farklı oranlarda SD ve UK (%5, %10, %20), NS ve NK (%0,5, %0,7, %1), CE ve BE (%1, %1,5, %2) eklenmiştir. Daha sonra kil+SD, kil+UK, kil+NS, kil+NK, kil+CE, kil+BE karışımları Proktor deneyinden elde edilen

optimum su içeriği göz önüne alınarak belirlenen su miktarı ile karıştırılmıştır. Aynı uygulama optimum su içeriğinden büyük ($w=20\%$) ve optimum su içeriğinden küçük ($w=13\%$) değerler kullanılarak tekrarlanmıştır. Karıştırılan zemin örneklerini UCS deneyine hazır hale getirmek için Harvard minyatür tokmağı kullanılmıştır (Şekil 5.17). Üç katman halinde sıkıştırılan killi zemin karışımında ilk tabaka kalıba eklenerek sıkıştırılmıştır. Daha sonra diğer iki tabaka ayrı ayrı yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Her örnek kalıptan çıkarıldıktan sonra su içeriğini muhafaza etmek amacıyla streçlere sarılmıştır (Şekil 5.17). Ardından nem kabına yerleştirilmiştir. Hazırlanan zemin numuneleri 0, 3, 7 ve 14 günlük kürlenme sürelerine bırakılmıştır.



Şekil 5.17. UCS deneyi için zemin numunelerinin hazırlanışı

Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Zeminin Hazırlanışı

Silis dumanı (SD) ve uçucu külün (UK) fiziksel özelliğini belirleyebilmek için killi zemine farklı oranlarda (%5, %10 ve %20) SD ve UK eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan zemin numunelerine Proktor deneyi uygulanmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Proktor deneyi için zemin örneklerinin hazırlanışı

Proktor deneyinden elde edilen optimum su içeriği dikkate alınarak belirlenen oranlarla karıştırılmış SD ve UK katkılı zemin numunelerine serbest basınç dayanım (UCS) deneyi uygulanmıştır. Bunun için %5, %10, %20 oranlarında SD ve UK katkılı zemin örnekleri optimum su içeriğinde, optimum su içeriğinden büyük ($w=20$) ve optimum su içeriğinden küçük ($w=13$) olacak şekilde hazırlanmıştır.

Nano-SiO₂ ve Nanokil Katkılı Zeminin Hazırlanışı

Nano-SiO₂ (NS) ve nanokilin (NK) fiziksel özelliğini belirleyebilmek için killi zemine farklı oranlarda (%0,5, %0,7 ve %1) NS ve NK karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan zemin numunelerine Proktor deneyi uygulanmıştır.

Proktor deneyinden elde edilen optimum su içeriği dikkate alınarak belirlenen oranlarla karıştırılmış NS ve NK katkılı zemin numunelerine serbest basınç dayanım (UCS) deneyi uygulanmıştır. Bunun için %0,5, %0,7, %1 oranlarında NS ve NK katkılı zemin örnekleri optimum su içeriğinde, optimum su içeriğinden büyük ($w=20$) ve optimum su içeriğinden küçük ($w=13$) olacak şekilde hazırlanmıştır.

Cam Lifi ve Bazalt Lif Katkılı Zeminin Hazırlanışı

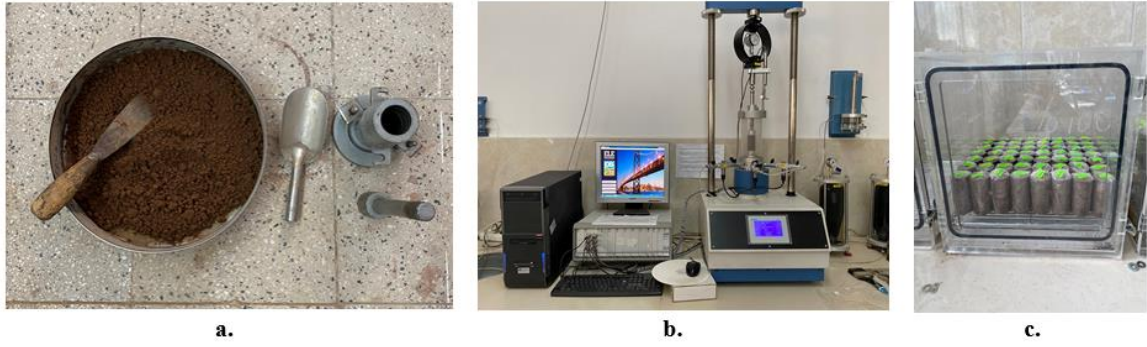
Killi zemin ile %1, %1,5, %2 oranlarında cam lifi (CE) ve bazalt lifi (BE) karıştırılarak optimum su içeriğinde, optimum su içeriğinden büyük ($w=20$) ve optimum su içeriğinden küçük ($w=13$) olacak şekilde hazırlanan zemin numunelerine serbest basınç dayanım (UCS) deneyi uygulanmıştır.

Nano Tabanlı Katkı Madde Zeminin Hazırlanışı

Killi zemine, en iyi dayanım sonucunu veren oranlar kullanılarak endüstriyel atık ve lif malzemeleri eklenmiştir ve yeni bir karışım oluşturulmuştur. Bu doğrultuda killi zemine, endüstriyel atık malzemesi olan silis dumanı (SD) %20 oranıyla eklenmiştir. Lif malzemesi olarak %2 oranında cam lifi (CE) kullanılmıştır. Sonuç olarak kil+SD+NS+CE ve kil+SD+NK+CE karışımları hazırlanmıştır.

5.2.5. Serbest Basınç Dayanımı (UCS) Deneyi

Yapılan deneylerle fiziksel özellikleri belirlenmiş zemin örneği serbest basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Bu çalışma ASTM D2166 standardı göz önüne alınarak uygulanmıştır (ASTM D2166, 2006). Zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarında ELE markalı üç eksenli deney cihazı (Şekil 5.19) kullanılarak belirlenmiştir. Aynı cihaz serbest basınç dayanım testi için de kullanılmaktadır. Kürlenme süresi bittikten sonra numuneler üç eksenli deney cihazına yerleştirilmiş ve dakikada 0,760 mm'lik bir hızla yüklenerek numune kırılana kadar işlem tekrarlanmıştır.



Şekil 5.19. a) Deney numunelerinin hazırlanışı b) UCS deney cihazı c) Nem kabındaki numuneler

Tez çalışmasında uygulanan deneyler, ilgili standartlar göz önüne alınarak yürütülmüştür (Tablo 5.9).

Tablo 5.9. Çalışmada kullanılan ilgili standartlara uygun numune örnekleri

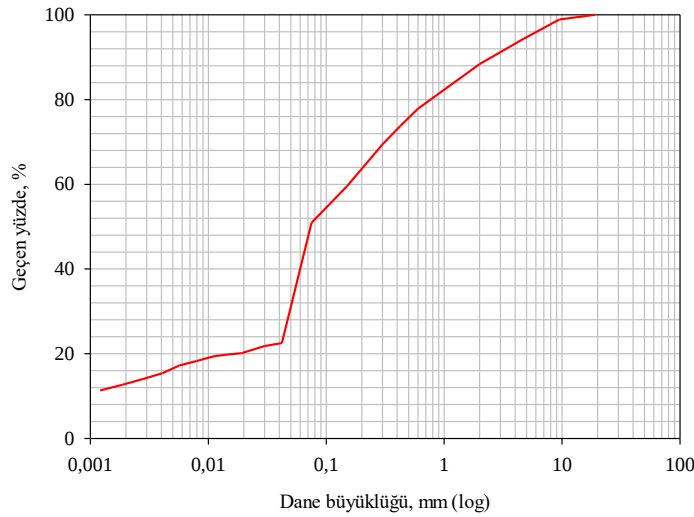
Test Türü	Standart	Kullanılan Numune Örneği
Zemin Örneğinin Sınıflandırılması	ASTM D2487-11	Z
Elek Analizi	ASTM D6913 / D6913M-17	Z
Hidrometre	ASTM D7928-21e1	Z
Özgül Ağırlık	ASTM D854-02	Z
Kıvam (Atterberg) Limitleri	ASTM D4318-10e1	Z Z+%5 SD Z+%20 SD Z+%5 UK Z+%20 UK
Standart Proktor Deneyi	ASTM D698-00ae1	Z Z+%0,5 NS – Z+%0,7 NS – Z+%1 NS Z+%0,5 NK – Z+%0,7 NK – Z+%1 NK Z+%5 SD – Z+%10 SD – Z+%20 SD Z+%5 UK – Z+%10 UK – Z+%20 UK
UCS Deneyi	ASTM D2166	Z Z+%0,5 NS – Z+%0,7 NS – Z+%1 NS Z+%0,5 NK – Z+%0,7 NK – Z+%1 NK Z+%1 BE - Z+%1,5 BE - Z+%2 BE Z+%1 CE - Z+%1,5 CE - Z+%2 CE Z+%5 SD – Z+%10 SD – Z+%20 SD Z+%5 UK – Z+%10 UK – Z+%20 UK Z+%20 SD+%1 NS+%2 CE Z+%20 SD+%1 NK+%2 CE

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, kil zeminlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde silis dumanı ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar, cam ve bazalt lifleri gibi lif takviyeleri ile nano-SiO₂ ve nanokil gibi nanoparçacıkların ayrı ayrı ve birlikte kullanımının, makro ve mikroyapısal düzeylerde ortaya koyduğu etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, katkı maddelerinin farklı su içeriklerinde (optimum altı, optimum ve optimum üstü) ve farklı kür sürelerinde (0, 3, 7 ve 14 gün) kil zeminler üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla tek eksenli basınç dayanımı (UCS) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Katkı malzemelerinin zemin iyileştirme performansları, Grey ilişki analizi yöntemiyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, mikroyapısal değişimleri incelemek üzere taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu bölümde değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

6.1. Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında kullanılan zemin örneği Elazığ ili, Ataşehir mahallesinden temin edilmiştir. Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik laboratuvarına getirilen zemin örneğinin fiziksel özelliklerini belirlemek için dane boyu dağılım analizleri, likit limit, plastik limit, özgül ağırlık ve standart Proktor testleri uygulanmıştır. Zemin örneğine yapılan elek analizi ve hidrometre deneyinden elde edilen granülometri eğrisi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Granülometri eğrisi

Özgül ağırlık deneyi üç kere tekrarlandıktan sonra elde edilen veriler ve her bir deney aşamasındaki ortam sıcaklığına bağlı olarak bulunan sıcaklık dönüştürme katsayısı, K, Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1. Özgül ağırlık deney sonuçları

K	Gs-kalibre
0,99791	2,78
0,99794	2,65
0,998142	2,57
Gs Ortalama	2,66

Zemin örneğinin kıvam limitini tayin edebilmek için likit limit, plastik limit deneyi yapılmış, likit limit deney sonuçları Tablo 6.2’de, plastik limit deney sonuçları Tablo 6.3’te verilmiştir.

Tablo 6.2. Likit limit deney sonuçları

Kap no	1	2	3
Vuruş sayısı	34	29	23
Yaş numune + kap, g	97,07	102,73	102,6
Kuru numune + kap, g	94,7	99,41	98,27
Su miktarı, g	2,37	3,32	4,33
Kap, g	86,39	91,58	90,11
Kuru numune, g	8,31	7,83	8,16
Su içeriği, %	28,52	42,4	53,06
Likit limit, %	49,45		

Tablo 6.3. Plastik limit deney sonuçları

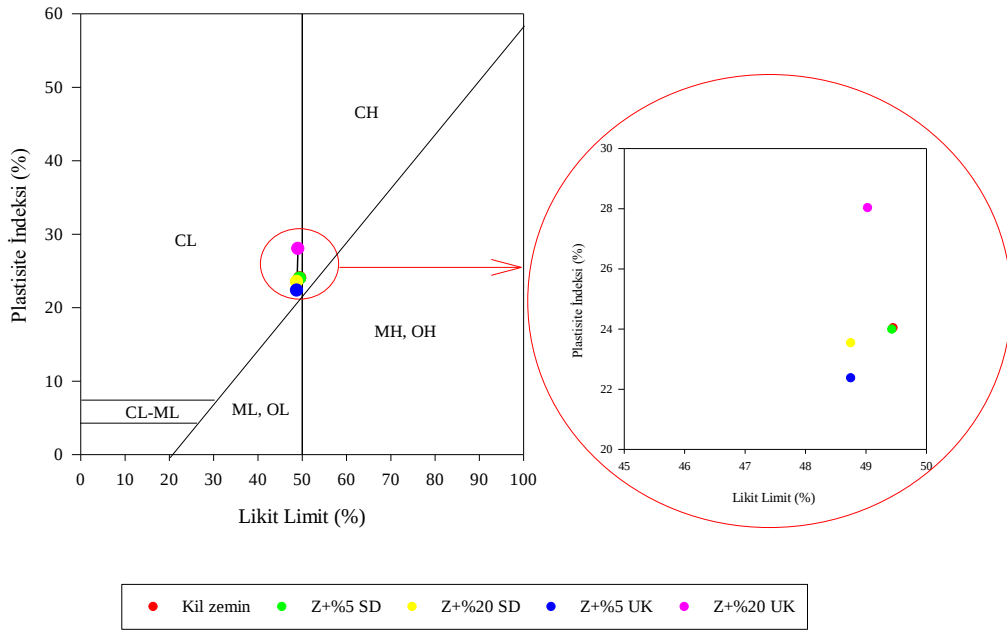
Kap no	1	2
Yaş numune + kap, g	14,73	15,08
Kuru numune + kap, g	13,72	13,94
Su miktarı, g	1,01	1,14
Kap, g	9,94	9,21
Kuru numune, g	3,78	4,73
Su içeriği, %	26,72	24,1
Plastik limit, %	25,41	

Tez çalışmasında kullanılan zemin örneğine elek analizi uygulanmıştır ve deney sonucunda 200 nolu elekten geçen yüzde %50,97 olarak belirlenmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre kullanılan zemin örneği ince taneli zemin sınıfına dahildir. Kıvam limitlerinden elde edilen likit limit değeri 49,45 ve plastik limit değeri 25,41'dir. Elde edilen sonuçlara göre Casagrande kartı üzerinde zemin sınıfı düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir.

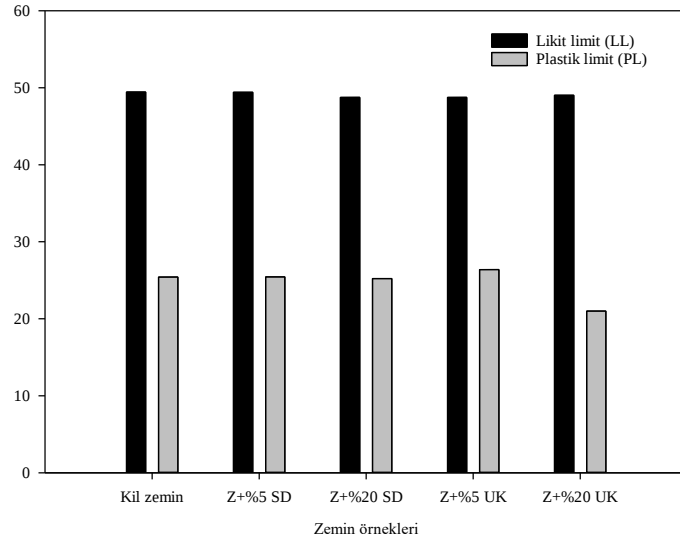
6.2. Katkı Malzemelerinin Killerin Fiziksel Özelliklerine Etkisi

Şekil 6.2'de kil zeminine farklı oranlarda karıştırılan silis dumanı ve uçucu kül numunelerinin plastisite kartındaki yerleri gösterilmiştir.

Şekil 6.3'te kil zeminine farklı oranlarda karıştırılan silis dumanı ve uçucu külün kıvam limitlerine etkisi gösterilmektedir. Zemin içindeki katkı maddesi içeriğinin artışıyla beraber likit limit ve plastik limit değeri azalma meydana gelmiştir.

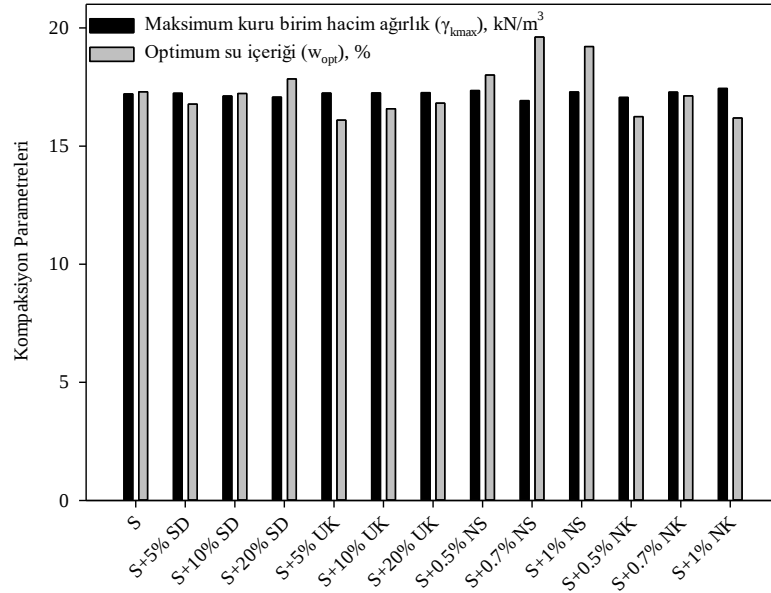


Şekil 6.2. Zemin örneklerinin plastisite kartındaki yeri



Şekil 6.3. Farklı oranlarda karıştırılan zemin örneklerinin likit limit ve plastik limit değerleri (SD: silis dumanı, UK: uçucu kül)

Zemin örneğine silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂ ve nanokilin farklı oranları eklenerek standart Proktor deneyi uygulanmıştır. Elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) değerleri Şekil 6.4’te verilmiştir.



Şekil 6.4. Kompaksiyon parametreleri

Maksimum oranda silis dumanı ve uçucu kül eklenmiş kil numunelerinin γ_{kmax} değerlerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemektedir. Ancak silis dumanı ilavesi w_{opt} değerinde hafif bir artış

sağlamıştır. Bu durum, eklenen katkı malzemesinin zemine kıyasla daha küçük taneli ve daha düşük özgül ağırlıklı olması nedeniyle, birim kütle başına daha fazla hacim kaplamasıyla açıklanabilir. Yani zemine göre daha hafif ve daha ince olan katkı maddesinin, karışım içinde daha geniş bir alana yayılması ve daha fazla yüzeyle etkileşime girerek daha fazla suya ihtiyaç duyulur (Aksoy, 2010); (Türköz et al., 2021); (Li et al., 2021).

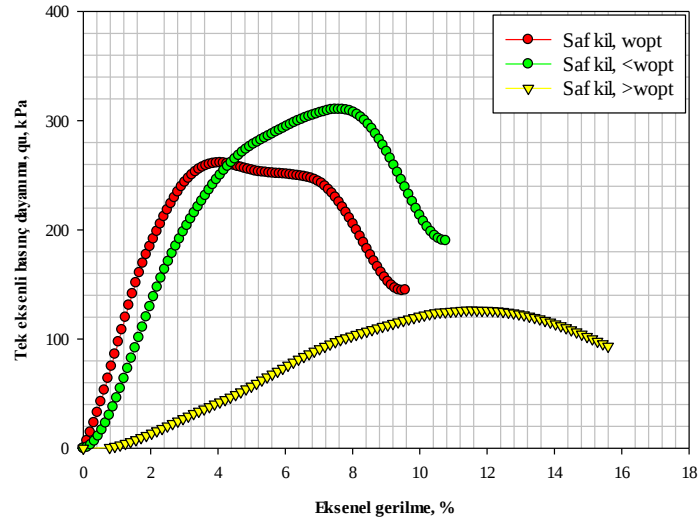
Öte yandan, nano-SiO₂ katkısı tüm katkı oranlarında kil numunelerinin Proktor parametrelerinde daha belirgin değişikliklere neden olmuştur. Bu durum, γ_{kmax} değerlerinde azalma ve w_{opt} değerlerinde artışla sonuçlanmıştır. Bu davranış, nano-SiO₂ parçacıklarının yüksek yüzey alanına sahip olması nedeniyle yeterli sıkıştırma için daha fazla suya ihtiyaç duyulmasıyla açıklanabilir ve bu durum önceki çalışmalar tarafından da desteklenmiştir (Kannan & Sujatha, 2023); (Kumar et al., 2007); (Bazarbekova et al., 2024). Ayrıca, nanokil katkısıyla zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığında artış meydana gelmiştir. Optimum su içeriğinde ise nanokil katkısıyla artış görülmüş ve maksimum değerine ulaştıktan sonra azalmıştır. Önceki çalışmalarda da killi zemine nanokil ekleyerek maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su içeriğinde benzer eğilim gözlenmiştir (Al Khazaleh et al., 2024).

Özetle, uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstriyel katkılarda γ_{kmax} değeri azalırken, nanomalzemeler için bu değer artmaktadır (Şekil 6.4). Endüstriyel katkılar söz konusu olduğunda, γ_{kmax} değerindeki azalma, zemin tanelerinin büyük boşluklar oluşturan ve düşük yoğunlukla sonuçlanan bileşiklerle kaplanarak büyük parçacıklar oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Nanomalzemelerde ise, nanoparçacıkların doğal zemin tanelerine göre daha yüksek yoğunlukta olması, γ_{kmax} değerindeki artışın nedenidir.

6.3. Katkısız ve Katkılı Kil Numunelerinin Tek Eksenli Basınç Altında Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışları

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışının tek eksenli basınç dayanımı (UCS) testi ile belirlenmesi; taşıma kapasitesi, stabilite analizi, malzeme özellikleri, tasarım, katkı maddelerinin etkinliği ve proje güvenliği gibi birçok açıdan önemlidir. Tez çalışmasının bu bölümünde farklı su içeriklerinde hazırlanan katkısız ve farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül, bazalt lif, cam lif, nano-SiO₂ ve nanokil katkılı kil numunelerine farklı kür şartlarında uygulanan UCS deneylerinden elde edilen tek eksenli basınç dayanımı-eksenel gerilme grafikleri sunulmuş olup, sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil 6.5 çalışma kapsamında incelenen CL sınıfı kil numunesinin farklı su içeriklerinde hazırlanmış örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı (kPa) ile eksenel gerilme (%) arasındaki ilişkisini göstermektedir. Grafik, optimum su içeriğinde (w_{opt}), optimum altı ($<w_{opt}$) ve optimum üstü ($>w_{opt}$) su içeriklerinde hazırlanan numunelerin davranışlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



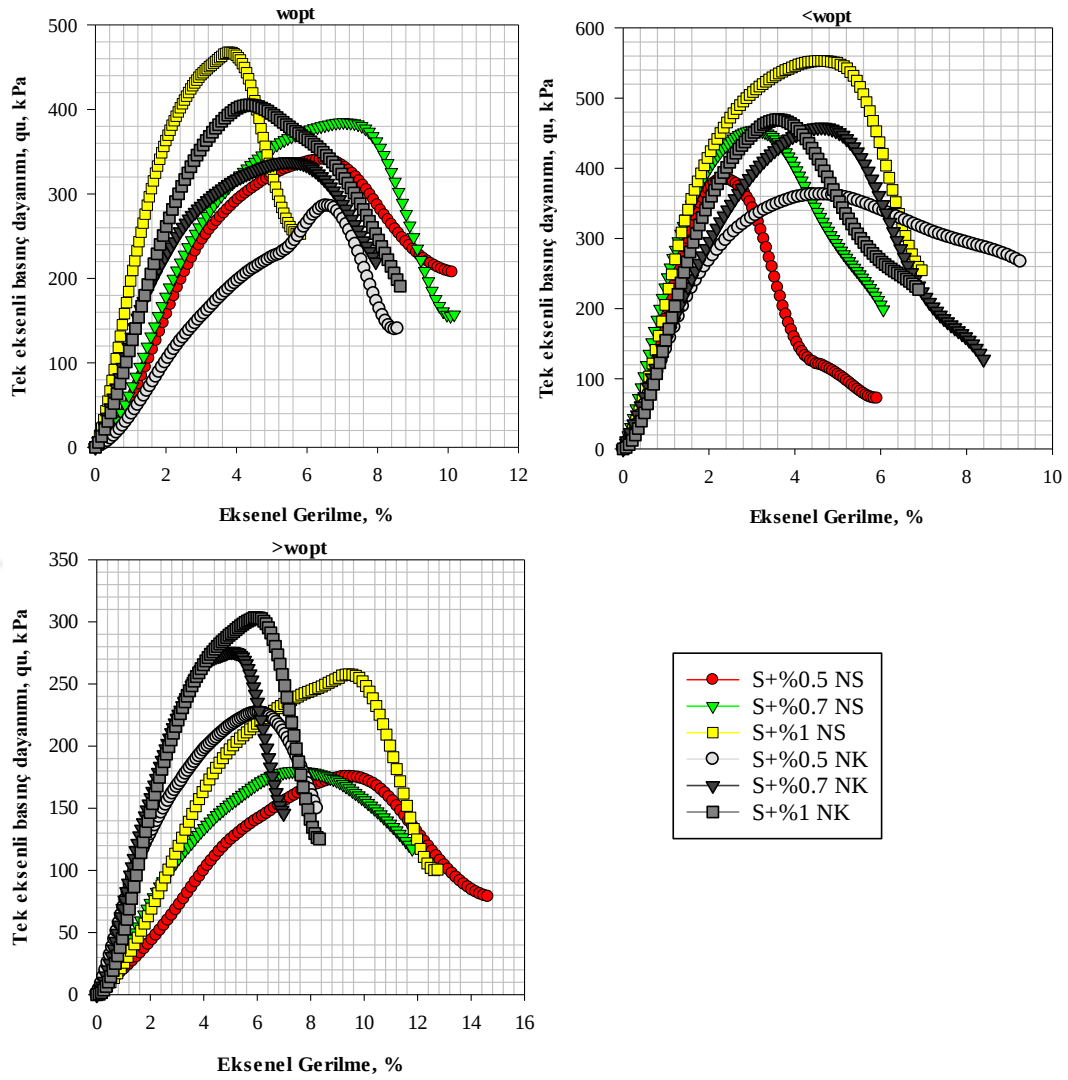
Şekil 6.5. Farklı su içeriklerinde, saf kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Grafikten de görüleceği üzere, optimum su içeriğine (w_{opt}) sahip kil numunesi (kırmızı eğri) en yüksek dayanımı yaklaşık 265 kPa civarında göstermektedir. Bu durum, optimum su içeriğinde kilin en iyi kompakte olduğu ve en yüksek dayanıma ulaştığını göstermektedir. Optimum altı su içeriğinde (yeşil eğri), dayanım artarak yaklaşık 310 kPa seviyesine kadar ulaşmıştır. Bu sonuç, düşük su içeriğinde parçacıklar arası temasın daha yoğun olduğu ve dolayısıyla daha yüksek içsel sürtünme ve kohezyonun geliştiği anlamına gelmektedir. Buna karşılık, optimum üstü su içeriğinde (sarı eğri) hazırlanan numune belirgin şekilde daha düşük bir dayanım göstermiş, maksimum tek eksenli basınç dayanımı 120 kPa seviyelerinde kalmıştır. Su içeriğinin artmasıyla birlikte, toprak matriksindeki serbest su miktarı artmakta ve bu da kohezyon kuvvetlerini azaltarak numunenin mukavemetini düşürmektedir. Ayrıca bu örneklerde daha sünek bir davranış gözlenmiş, deformasyon kapasitesi artmış ancak dayanım kaybı yaşanmıştır.

Kil ve katkılı kil numunelerinin UCS değerleri, Proktor eğrisinin kuru tarafındaki su içeriğinde maksimum değer gösterirken, su içeriği arttıkça yani eğrinin ıslak tarafına geçildikçe dayanım azalmıştır. Kuru tarafta, toprak taneleri daha yoğun bir şekilde sıkışabilir ve daha yüksek bir sıkışma derecesi elde edilir. Bu da tane temas noktalarının artması nedeniyle içsel sürtünmenin artmasına ve dolayısıyla toprağın mukavemetinin yükselmesine neden olur. Ayrıca, kuru taraftaki topraklar, düşük su içeriği nedeniyle taneler arasında daha fazla kilitlenme etkisine sahiptir. Bu kilitlenme etkisi, mekanik mukavemetin artmasıyla UCS değerlerini artırabilir.

Elde edilen bu bulgular, incelenen CL tipi kilin mekanik özelliklerinin su içeriğine yüksek derecede duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 6.6'da farklı su içeriklerinde, 0 günlük kür süresinde %0,5, %0,7 ve %1 NS ile %0,5, %0,7 ve %1 NK içerikli zemin numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı-eksenel gerilme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.6. Farklı su içeriklerinde, 0 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

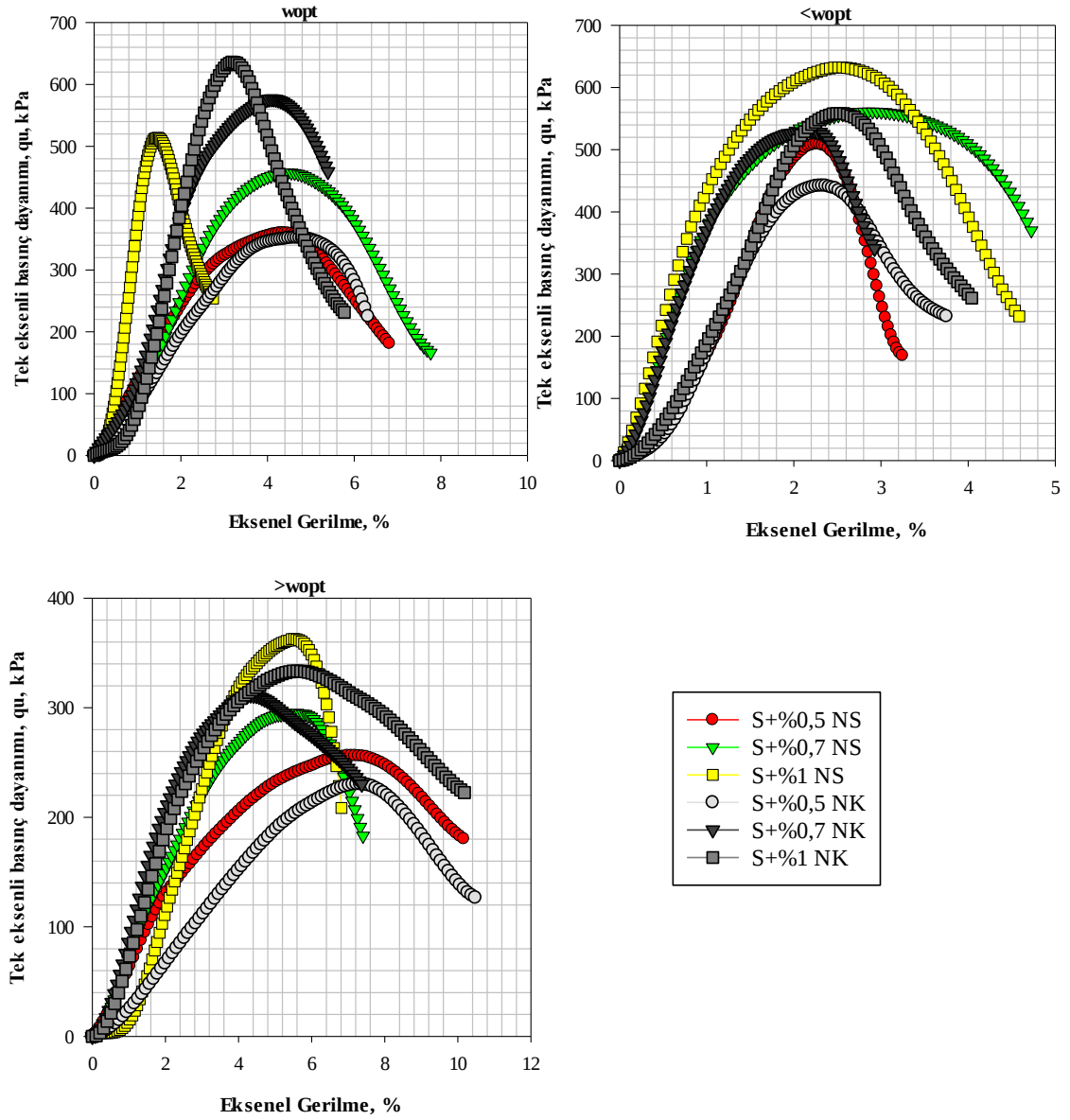
Optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerde %0,5, %0,7 ve %1 nano-SiO₂ (NS) ilaveli zemin numunelerinin dayanımlarında saf kile göre sırasıyla %30,33, %47,15 ve %78,89'luk artış gözlenmiştir. %0,5, %0,7 ve %1 nanokil (NK) katkılı zemin numunelerinin dayanımlarında ise sırasıyla %9,43, %29,35 ve %55,02'lik artış meydana gelmiştir. Şekil 6.6'da gösterildiği üzere, w_{opt} 'da incelenen örneklerde, %1 NS içeren numune en yüksek dayanımı (~467,86 kPa) göstermiştir. Bu katkının kil matrisine homojen dağılarak mikro yapıyı güçlendirdiği ve partiküller arası bağları artırdığı düşünülmektedir. NK katkılı numuneler de önemli ölçüde dayanım artışı sağlamıştır; özellikle %1 NK katkısı, NS katkısına yakın dayanım değerlerine ulaşmıştır (~405,27 kPa). Bu durum, her iki nanoparçacığın da etkili birer pozitif katkı malzemesi olduğunu göstermektedir. Ayrıca tüm katkı türleri için artan oranla birlikte dayanımda belirgin bir artış gözlemlenmiştir.

Şekil 6.6'da optimum su içeriğinden küçük ($<w_{opt}$), 0 günlük kür süresinde hazırlanan kil numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı-eksenel gerilme grafiklerinde, %0,5, %0,7 ve %1 NS ilaveli numuneler kil dayanımını sırasıyla %28,26, %55,20 ve %92,78 oranında arttırırken; %0,5, %0,7 ve %1 NK katkı oranları ise kilin dayanımında sırasıyla %20,00, %56,67 ve %60,85'lik artış göstermiştir. Tüm katkı kombinasyonları için en yüksek dayanımlar bu su içeriği seviyesinde elde edilmiştir. Özellikle %1 NS katkısı ile 553,02 kPa'lık bir q_u değeri elde edilmiştir. Bu durum, düşük su içeriğinde su moleküllerinin bağlayıcı etkisinin daha belirgin olması ve katkıların boşluk oranını azaltarak toprağın daha sıkı bir yapı kazanmasını sağlamasından kaynaklanmaktadır. NK katkısı da benzer şekilde yüksek dayanımlar sunmuş; %1 NK katkısı yaklaşık 470 kPa civarında dayanım göstermiştir. Ayrıca deformasyon kabiliyetinin daha sınırlı olduğu gözlenmiş, bu da yapının daha gevrek kırılma karakteri sergilediğini düşündürmektedir.

Şekil 6.6'da optimum su içeriğinden büyük ($>w_{opt}$), 0 günlük kür süresinde hazırlanan zemin numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı-eksenel gerilme grafiklerine göre, %0,5, %0,7 ve %1 NS ilaveli zemin numunelerinin dayanımları sırasıyla %18,69, %20,40 ve %50,19'luk artış gösterirken; %0,5, %0,7 ve %1 NK katkılı zemin numunelerinin dayanımlarında sırasıyla %38,52, %57,22 ve %67,68'lik artış gözlenmiştir. Özellikle yüksek su içeriği nedeniyle yapıda serbest su miktarının artması, katkıların mikro yapıyı güçlendirme etkisini zayıflatmıştır. Bu bağlamda, en yüksek dayanım 303,51 kPa ile %1 NK katkısında elde edilmiştir. NS katkısı ise bu su içeriğinde NK kadar etkili olmamış ve %1 oranında dahi maksimum 257,77 kPa'lık dayanım sağlamıştır. Genel olarak $>w_{opt}$ grubunda tüm katkıların etkisi sınırlı kalmış, deformasyon kapasitesi artmış ancak mukavemet azalmıştır.

Stabilize edilmiş zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde kür süresi, özellikle dayanım gelişimi açısından kritik bir parametredir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂ ve nanokil gibi puzolanik ve nanoparçacık içeren katkıların kullanıldığı zeminlerde, kür süresi uzadıkça mekanik dayanımda belirgin artışlar gözlemlenmektedir. Bu durum, katkı malzemelerinin zamanla gerçekleşen kimyasal reaksiyonları sayesinde bağlayıcı ürünlerin (örneğin C-S-H ve C-A-S-H) oluşumuna bağlıdır.

Şekil 6.7'de farklı su içeriklerinde, 3 günlük kür süresinde %0,5, %0,7 ve %1 NS ile %0,5, %0,7 ve %1 NK içerikli zemin numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı-eksenel gerilme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.7. Farklı su içeriklerinde, 3 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Elde edilen bulgular doğrultusunda, NS ve NK katkılarının kil zeminlerin tek eksenli basınç dayanımını anlamlı düzeyde artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerde, 3 günlük kür süresi sonunda UCS değerlerinde belirgin artışlar meydana gelmiştir. Öte yandan, optimum altı su içeriğinde (<wopt) hazırlanan numunelerde katkıların dayanım üzerindeki etkisi daha da belirginleşmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerin UCS dayanımları, 3 günlük kür sonrasında, %0,5, %0,7 ve %1 NS ilaveli zemin numuneleri için sırasıyla %37,59, %74,92 ve %96,35 oranında artarken; %0,5, %0,7 ve %1 NK içerikli zemin numunelerinde ise sırasıyla %34,70, %120,44 ve %143,23 oranında artış göstermiştir. Bu durum,

NK katkısının optimum su içeriğinde NS'ye kıyasla daha yüksek bir iyileştirici etki sunduğunu göstermektedir.

Öte yandan, optimum altı su içeriğinde (<wopt) hazırlanan numunelerde katkıların dayanım üzerindeki etkisi daha da belirginleşmiştir. NS katkısı ile %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında sırasıyla %76,14, %95,91 ve %123,14 oranlarında dayanım artışı gözlemlenirken, aynı oranlarda NK katkısı ile bu artışlar %50,38, %84,71 ve %94,83 seviyelerinde kalmıştır. Bu sonuçlar, düşük su içeriğinin katkıların mikro yapıda daha etkin bir şekilde dağılmasına olanak tanıdığını ve dolayısıyla mukavemet gelişiminin bu şartlarda daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

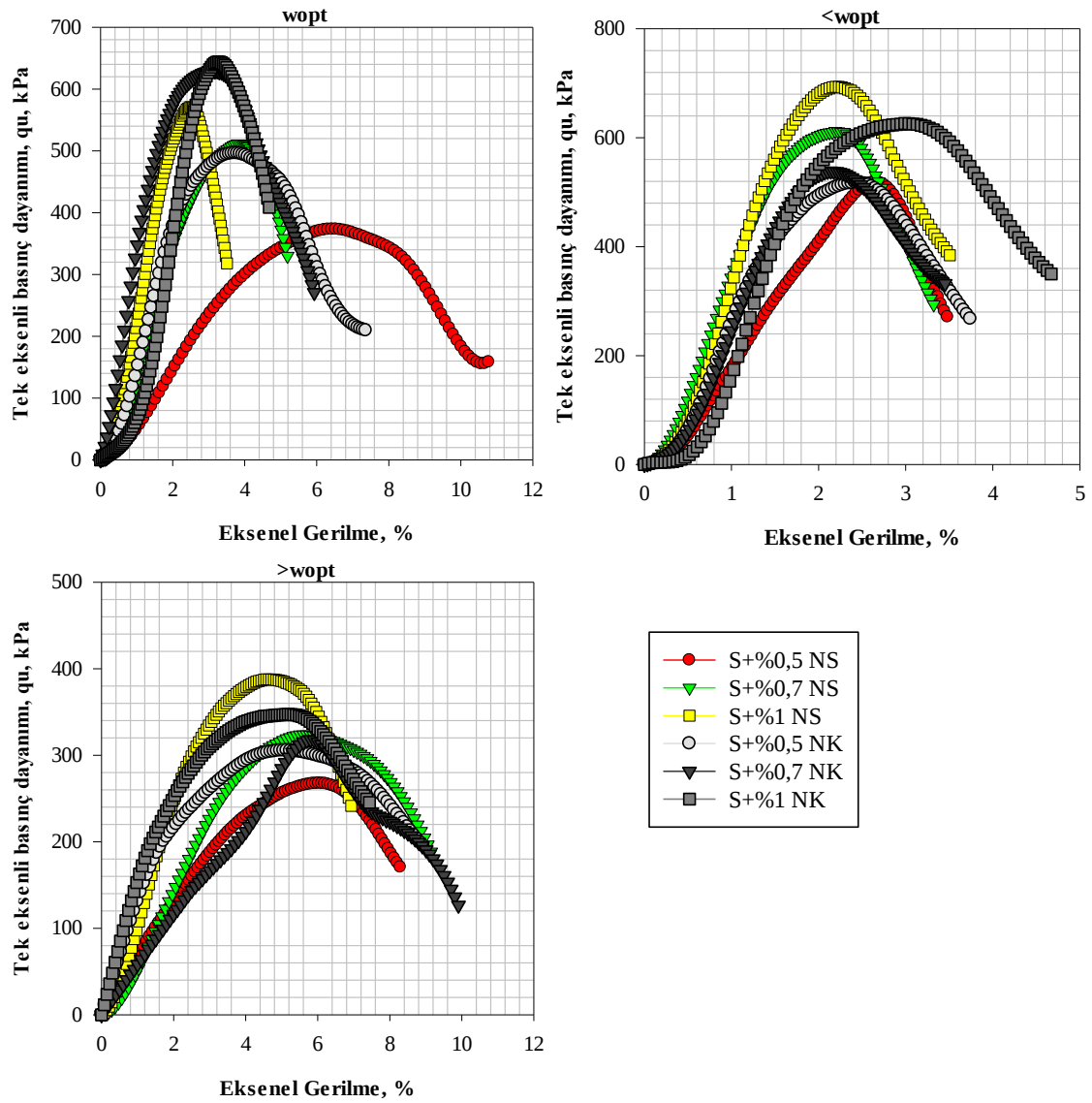
Buna karşılık, optimum üstü su içeriğinde (>wopt) hazırlanan numunelerde katkıların etkinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. %0,5, %0,7 ve %1 NS katkılarıyla sırasıyla %49,60, %64,43 ve %90,32 oranında dayanım artışı sağlanırken, aynı oranlarda NK katkılarıyla %39,66, %70,75 ve %79,12 oranlarında artış elde edilmiştir. Yüksek su içeriği nedeniyle yapıda oluşan serbest su, katkıların bağlayıcı etkisini sınırlandırmakta ve zemin matrisinde mukavemet gelişimini kısıtlamaktadır. Genel olarak her iki katkı malzemesi de farklı su içeriklerinde pozitif etkiler sunsa da, katkı miktarı ile birlikte su içeriğinin de dikkatli şekilde optimize edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 6.8'de, farklı su içeriklerinde hazırlanarak 7 günlük kür uygulanan %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında NS ile NK katkılı zemin numunelerine ait tek eksenli basınç dayanımı-eksenel gerilme ilişkileri sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre, katkı oranı arttıkça zemin numunelerinin tek eksenli basınç dayanımlarında anlamlı iyileşmeler sağlandığı gözlemlenmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerde, NS katkısı ile %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında sırasıyla %42,75, %95,68 ve %118,31 oranlarında dayanım artışı elde edilirken; aynı oranlarda NK katkısı ile bu artışlar sırasıyla %89,81, %140,72 ve %146,20 olarak ölçülmüştür. Bu durum, özellikle NK katkısının optimum koşullarda NS'ye kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir.

Optimum altı su içeriğinde hazırlanan numunelerde katkıların UCS dayanımı üzerindeki etkisi artış göstermiştir. NS katkısı ile %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında sırasıyla %67,24, %97,22 ve %123,39 oranında artış sağlanırken; NK katkısı ile bu artışlar %66,85, %73,59 ve %101,73 seviyelerinde kalmıştır.

Buna karşılık, optimum üstü su içeriğine sahip numunelerde ise katkıların etkinliği bir miktar azalmış; NS katkısıyla %53,95, %75,45 ve %99,88 oranlarında dayanım artışı sağlanırken, NK katkısıyla bu değerler %68,51, %73,21 ve %84,44 olarak gerçekleşmiştir.

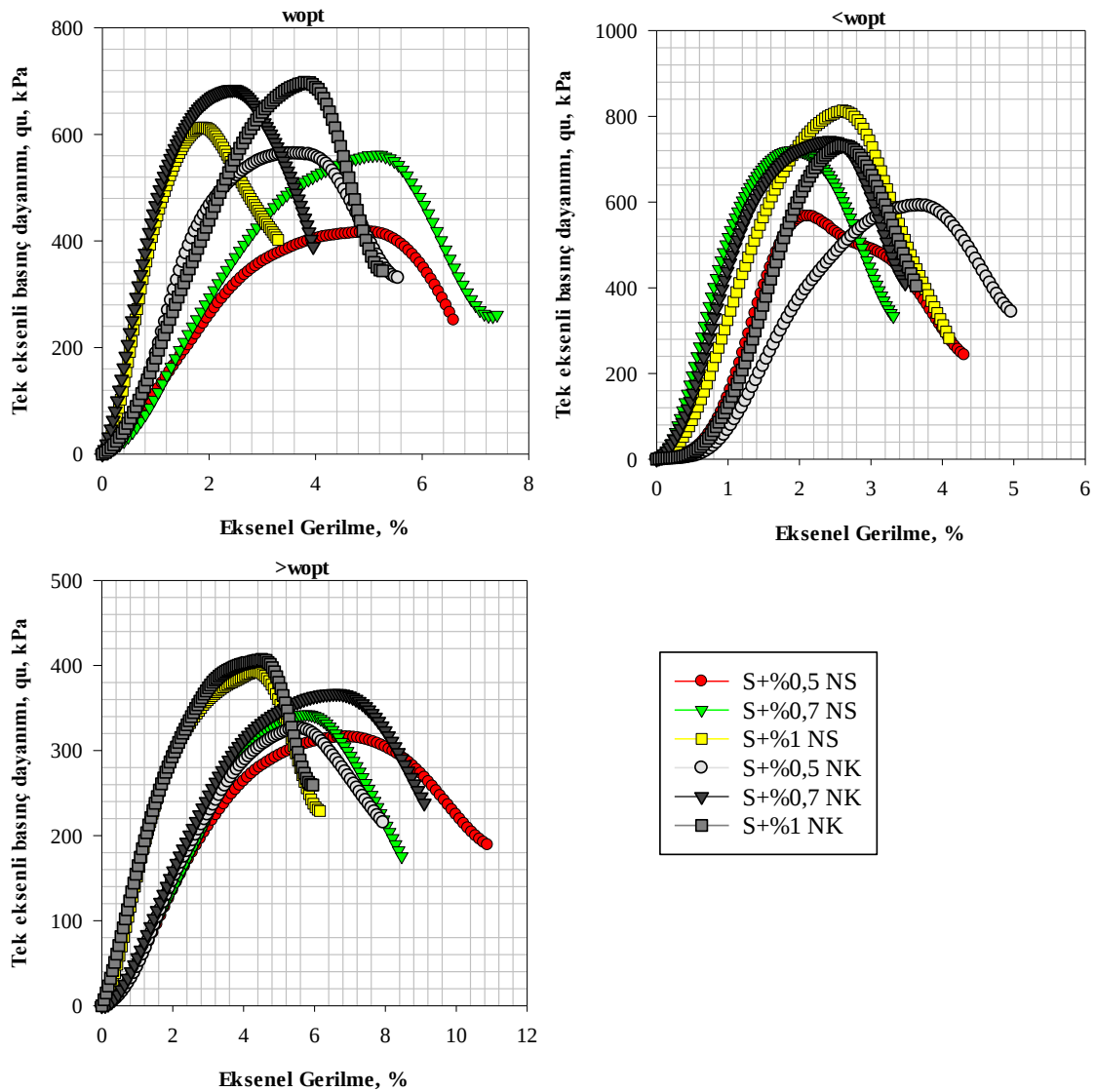


Şekil 6.8. Farklı su içeriklerinde, 7 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Şekil 6.9’da sırasıyla optimum, optimum üstü ve optimum altı su içeriklerinde hazırlanarak 14 gün kürlenmiş nanosilika (NS) ve nanokil (NK) katkılı zemin numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. Elde edilen veriler, katkı miktarındaki artışla birlikte zemin numunelerinin dayanım değerlerinin anlamlı düzeyde arttığını göstermektedir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerde, %0,5, %0,7 ve %1 oranlarında NS katkısıyla elde edilen dayanım artışları sırasıyla %59,44, %114,79 ve %134,40 olurken; aynı oranlarda NK katkısı ile bu artışlar %115,73, %161,79 ve %166,81 seviyelerine ulaşmıştır. Bu durum, özellikle 14 günlük kürlenme süresi sonunda NK katkısının NS’ye kıyasla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

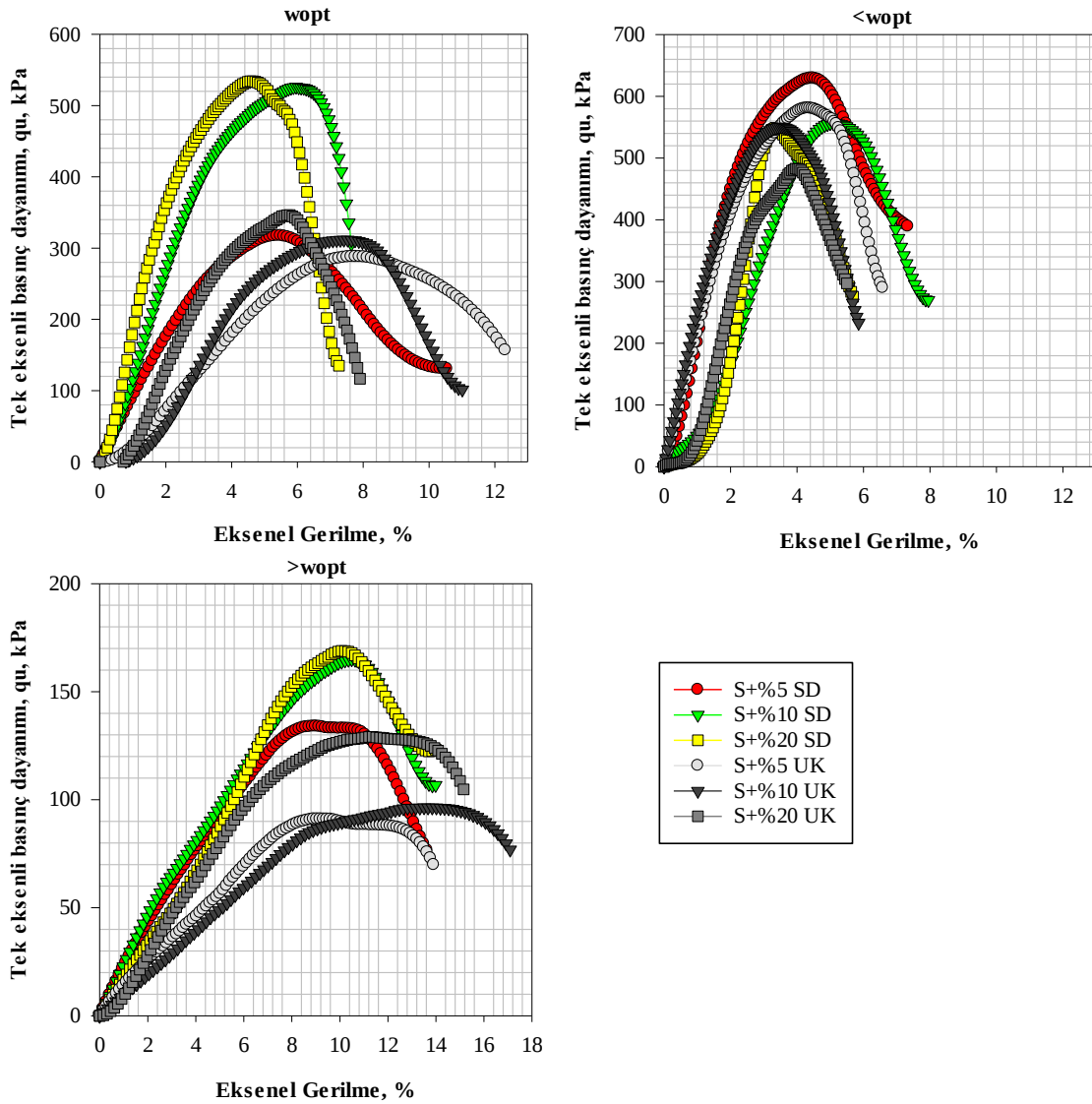
Optimum altı su içeriğinde hazırlanan numunelerde de katkıları önemli oranda dayanım artışı sağlamıştır. NS katkılı numunelerde sırasıyla %82,73, %132,33 ve %162,24 oranlarında artış elde edilirken; NK katkılı numunelerde bu oranlar %90,85, %139,65 ve %135,82 olarak gerçekleşmiştir.

Optimum üstü su içeriğine sahip numunelerde katkıların etkisi daha da belirgin hâle gelmiştir. NS katkısıyla elde edilen dayanım artışları sırasıyla %149,71, %170,77 ve %210,56 olurken, NK katkısıyla bu artışlar %157,76, %190,11 ve %221,91 seviyelerine yükselmiştir. Bu bulgular, katkıların uzun süreli kürlenme ile birlikte yüksek su içeriğinde bile etkinliğini artırdığını göstermektedir.



Şekil 6.9. Farklı su içeriklerinde, 14 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda nanoparçacık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

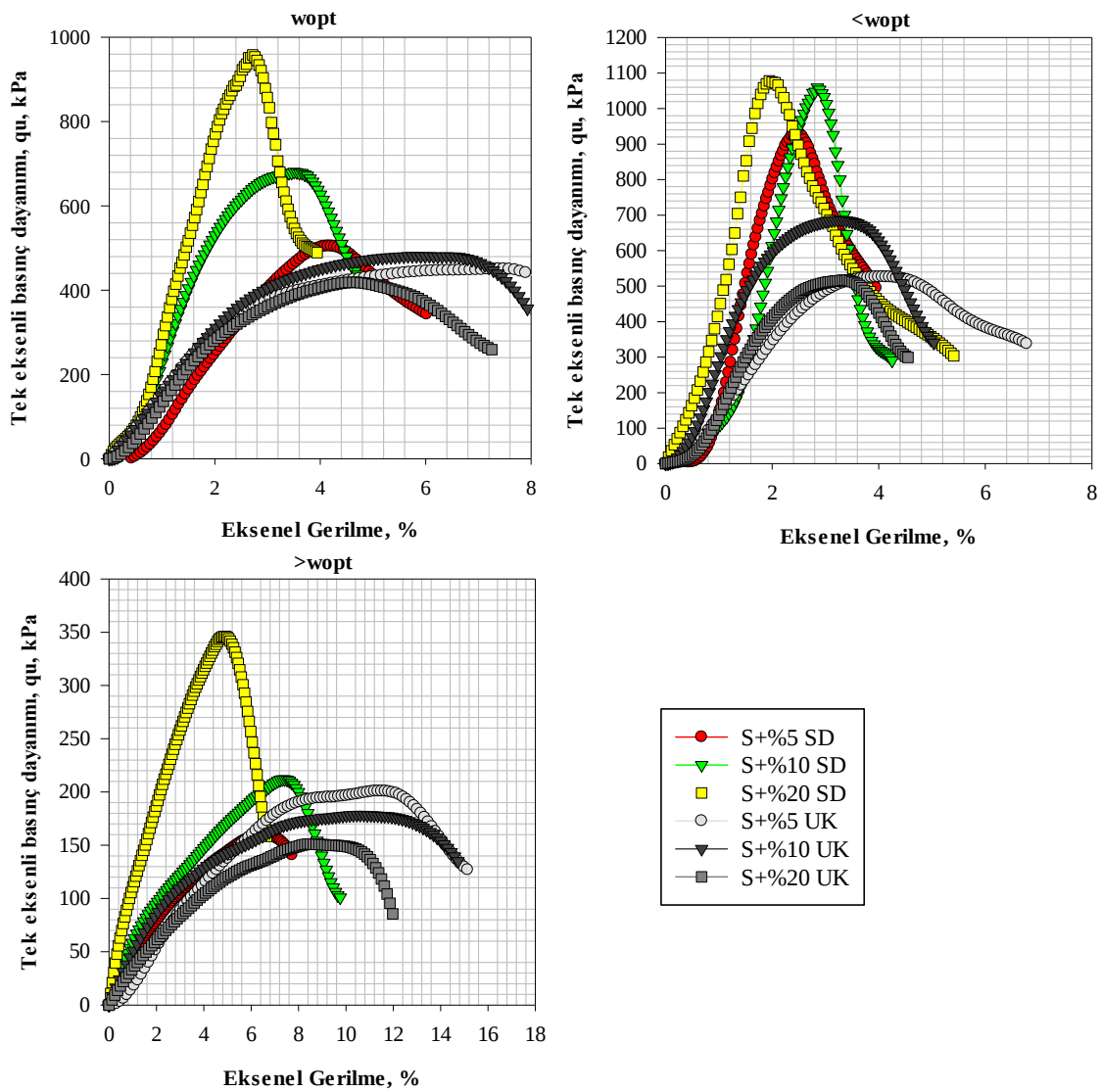
Farklı su içeriklerinde ve kürlenme sürelerinde silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) katkıli zemin numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme davranışları Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve 6.13'te sunulmuştur. Özellikle SD katkısının, UK'ye kıyasla zeminlerin UCS dayanımını çok daha etkili bir şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi, kürlenme uygulanmadan test edilen numunelerde, hem silis dumanı hem de uçucu kül katkılarının zemin dayanımı üzerinde pozitif etkiler gösterdiği, ancak bu etkinin su içeriğine ve katkı türüne bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.10. Farklı su içeriklerinde, 0 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkıli numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Optimum su içeriğinde SD katkısının, özellikle %10 ve %20 oranlarında kullanıldığında, dayanımı %100'ün üzerinde artırarak oldukça etkili olduğu görülmüştür (sırasıyla %101,24 ve

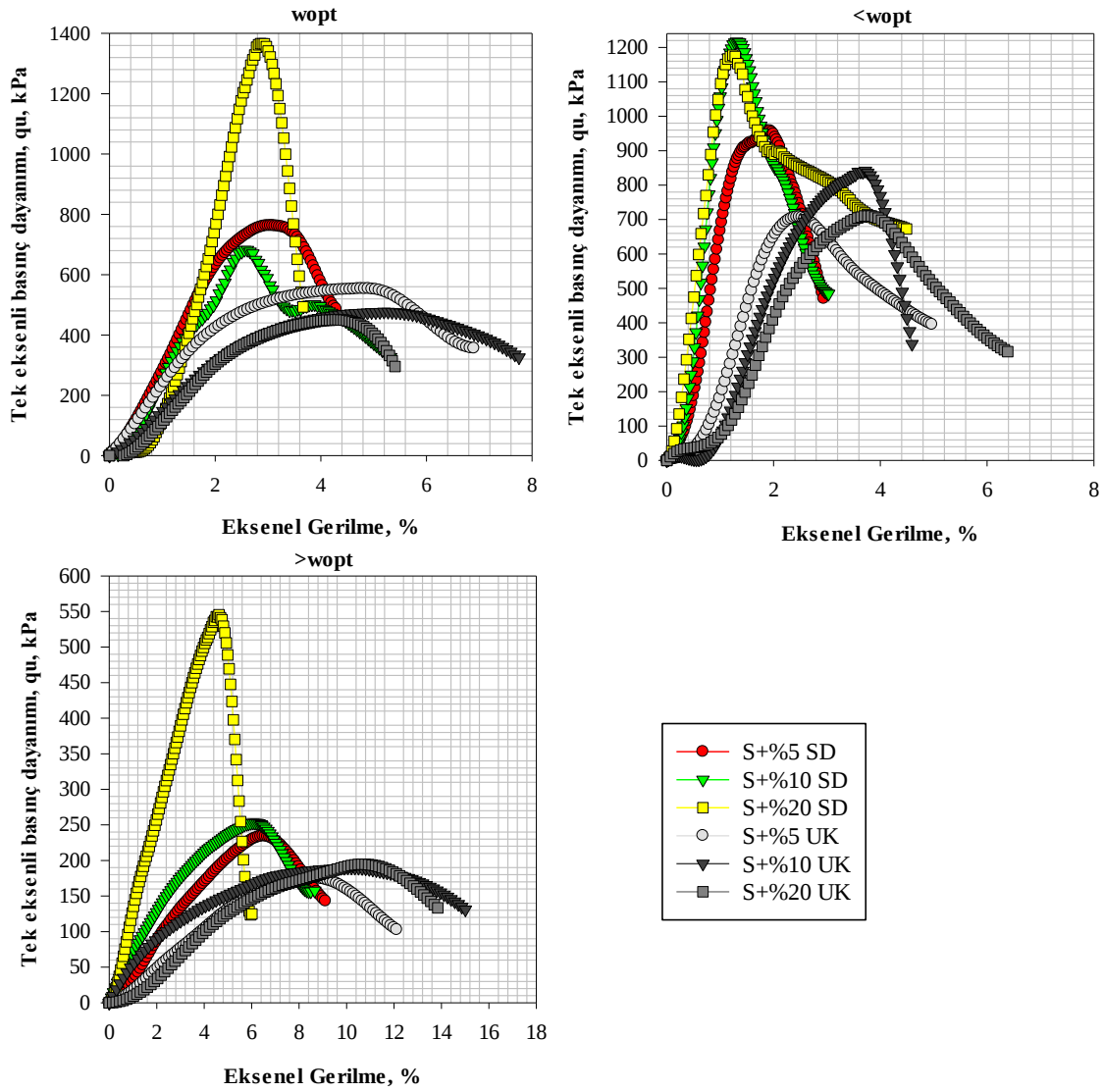
%104,28 artış). UK katkısı ise aynı koşullarda daha sınırlı dayanım artışları sağlamış (%32,48'e kadar), SD'ye kıyasla daha zayıf performans sergilemiştir. Optimum üstü su içeriğinde SD katkısının etkisi azalmakla birlikte yine de artış sağlarken, UK katkısı düşük oranlarda dayanımı azaltmış, yalnızca %20 katkıda hafif bir artış (%2,06) göstermiştir. Buna karşın, optimum altı su içeriğinde her iki katkı da oldukça başarılı sonuçlar vermiş; %5 SD katkısı ile %102,86 ve %5 UK katkısı ile %87,23 oranlarında artışlar elde edilmiştir. Bu bulgular, kurlenme uygulanmadan da SD katkısının özellikle optimum ve optimum altı su içeriklerinde zemin dayanımını belirgin şekilde artırabildiğini, UK katkısının ise yalnızca belirli koşullarda etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.11. Farklı su içeriklerinde, 3 günlük kurlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

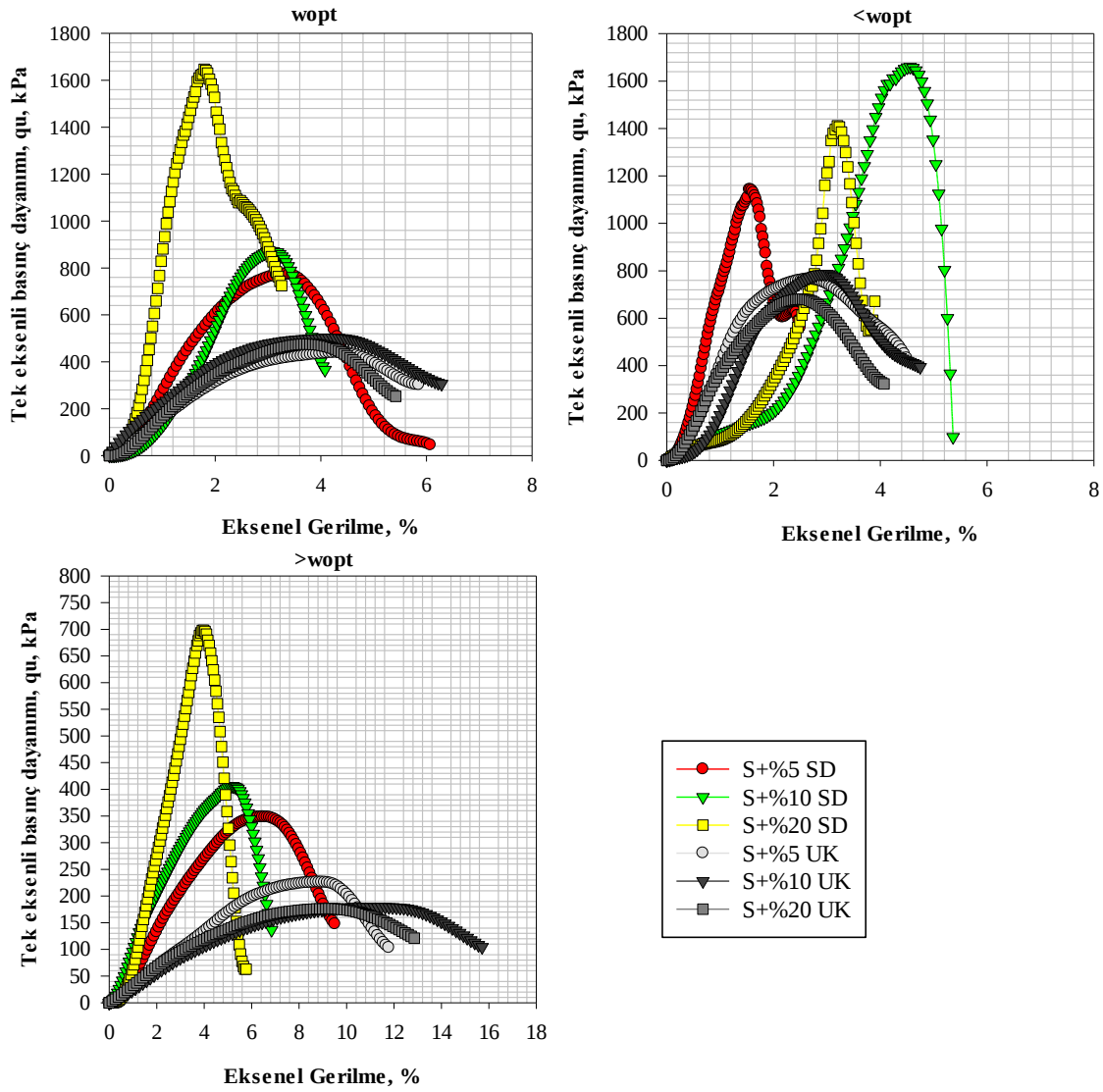
Şekil 6.11’de sırasıyla optimum, optimum üstü ve optimum altı su içeriklerinde hazırlanarak 3 gün kür sonrası SD ve UK katkılı zemin numunelerine ait gerilme–şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. 3 günlük kürlenme süresinde, SD katkısının zemin dayanımı üzerindeki etkisinin oldukça belirgin olduğu, katkı oranı ve su içeriği ile birlikte bu etkinin arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle optimum su içeriğinde %10 ve %20 SD katkıları ile sırasıyla %160,40 ve %266,43 gibi yüksek oranlarda dayanım artışları elde edilmiştir. Uçucu kül katkısı da dayanımı artırmış olmakla birlikte, %5 ve %10 oranlarında %72,28 ve %84 artış sağlarken, %20 UK katkısında bu artış %60,16’ya düşmüştür. Optimum üstü su içeriğinde SD katkısı yine UK’ye göre daha etkili olmuş, özellikle %20 SD ile %173,58 oranında artış sağlanmıştır. UK katkısı ise su fazlası nedeniyle daha düşük performans göstermiştir. En dikkat çekici sonuçlar, optimum altı su içeriğinde elde edilmiştir; burada SD katkısı ile %247,36’ya varan dayanım artışları gerçekleşmiş ve bu, hem su içeriği hem de katkı oranının sinerjik etkisini ortaya koymuştur. UK katkısı ise aynı koşullarda %121,16 ile en yüksek artışı %10 oranında sağlamıştır. Bu veriler, kısa süreli kürlenme koşullarında SD katkısının özellikle düşük ve optimum su içeriklerinde zemin dayanımını artırmada son derece etkili bir katkı maddesi olduğunu göstermiştir.

Şekil 6.12’de, 7 günlük kür süresi sonunda hazırlanan ve farklı su içeriklerine (optimum, optimum üstü ve optimum altı) sahip SD ve UK katkılı zemin numunelerine ait gerilme–şekil değiştirme davranışları verilmiştir. 7 günlük kürlenme süresi sonrasında, zemin örneklerine ilave edilen SD ve UK’nın dayanım üzerindeki etkisinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Özellikle optimum su içeriğinde %20 SD katkısı ile %422,36 gibi yüksek bir dayanım artışı elde edilmiştir. Bu durum, SD’nin pozolanik reaksiyonlarının kür süresiyle birlikte geliştiğini ve dayanımı anlamlı ölçüde artırdığını göstermektedir. Aynı koşullarda UK katkısı daha sınırlı etki göstermiş, en yüksek artış %5 UK oranında %111,77 olarak gözlemlenmiştir. Optimumun üzerindeki su içeriğinde SD katkısı ile elde edilen %331,23’lük artış, su fazlalığına rağmen bağlayıcı reaksiyonların etkili biçimde sürdüğünü ortaya koyarken, UK katkısında artışlar %53,79 ile daha düşük kalmıştır. En yüksek dayanımlar ise optimum altı su içeriğinde elde edilmiş; burada %10 SD katkısıyla %292,02, %20 SD ile ise %279,38 oranında artış sağlanmıştır. UK katkısı da bu koşullarda nispeten başarılı olmuş ve %171,21’e varan artışlar göstermiştir.



Şekil 6.12. Farklı su içeriklerinde, 7 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

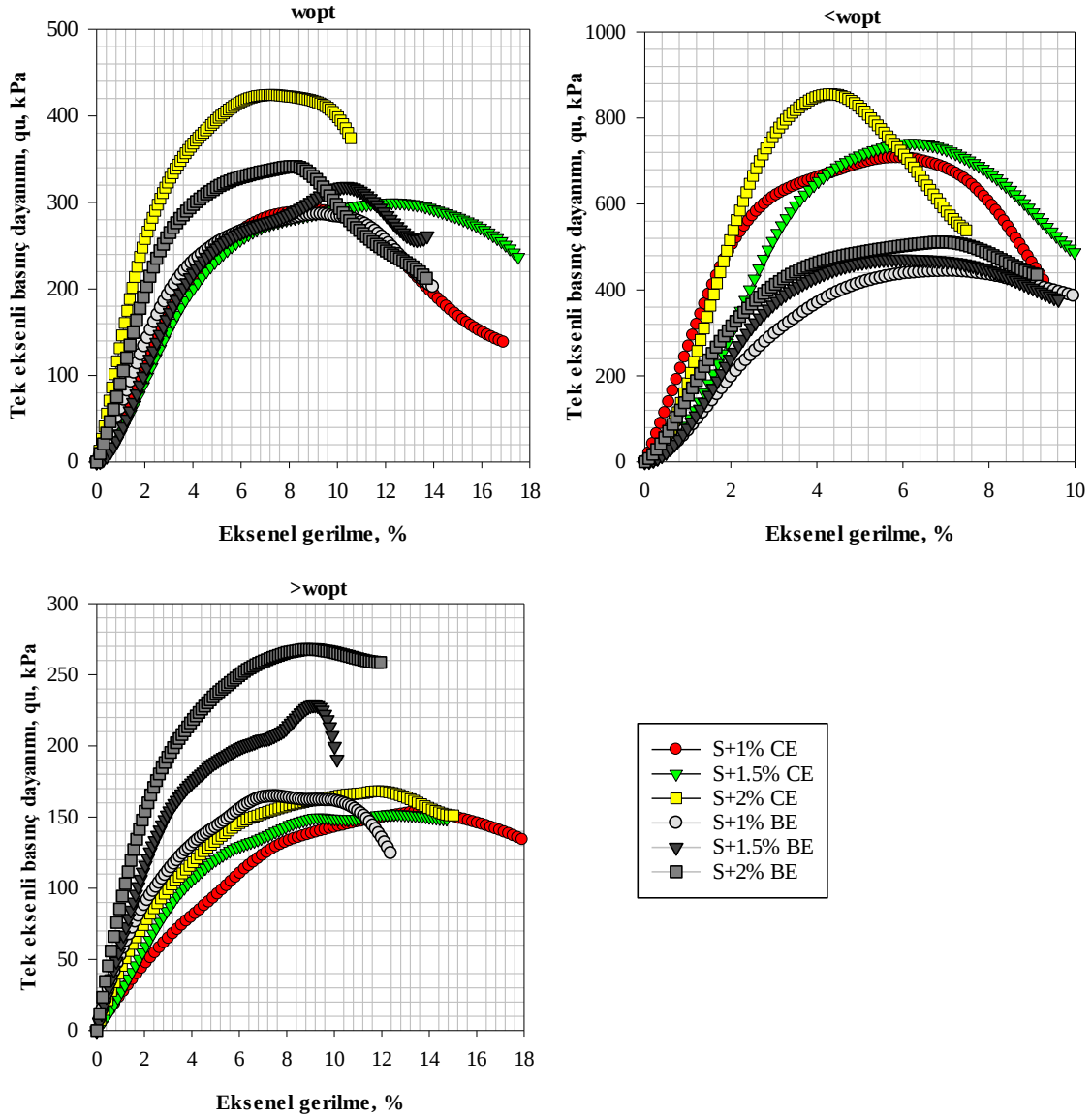
Şekil 6.13'te 14 günlük kür süresi sonunda hazırlanan ve farklı su içeriklerine (optimum, optimum üstü ve optimum altı) sahip SD ve UK katkılı zemin numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme davranışları sunulmuştur. Elde edilen bulgular, hem silis dumanı hem de uçucu kül katkılarının UCS dayanımı üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Tüm su içeriği koşullarında SD katkısının UK katkısına kıyasla çok daha yüksek dayanım artışları sağladığı görülmüştür. Özellikle optimum su içeriğinde %20 SD katkısıyla %529,75 gibi son derece yüksek bir dayanım artışı sağlanmış, bu da silis dumanının pozitif reaksiyonlarının kür süresiyle birlikte zemin matrisini önemli ölçüde güçlendirdiğini göstermektedir. Öte yandan, aynı koşullarda %20 UK katkısı yalnızca %81,64'lük bir artışla daha sınırlı bir iyileşme sağlamıştır. Optimum altı su içeriğinde de benzer şekilde, SD katkısı ile %434,76'ya varan artışlar gözlenirken, UK katkısı %153,71 ile daha düşük oranda kalmıştır.



Şekil 6.13. Farklı su içeriklerinde, 14 günlük kürlenme süresinde farklı oranlarda endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Şekil 6.14'te farklı su içeriklerinde (optimum, optimum üstü ve optimum altı) hazırlanan lif katkılı zemin numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Çalışmada kullanılan lif katkılarının etkisi değerlendirildiğinde, hem bazalt lifi (BE) hem de cam lifi (CE) ilavesinin kil zeminlerin dayanım özelliklerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Tüm su içeriği koşullarında BE katkısı ile UCS dayanımında kademeli artışlar sağlanırken, optimum üstü su içeriğinde %2 BE katkısı ile %111,70'lik, optimum altı su içeriğinde ise %64,82'lik artış değerlerine ulaşılmıştır. CE katkısı ise özellikle optimum altı su içeriğinde dikkat çekici dayanım artışları sağlamıştır. %2 CE katkısıyla bu koşulda %175,74'lük artış elde edilmiş, bu da cam lifinin düşük su içeriğine sahip zeminlerde etkili bir şekilde performans gösterdiğini göstermiştir. Optimum su içeriğinde ise her iki lif katkısı da artan oranlarla dayanımda iyileşme sağlamış, %2 CE katkısıyla %62,21'lik, %2 BE katkısıyla %30,56'lık artış elde edilmiştir. Genel olarak, cam lifinin özellikle optimum altı su

içeriklerinde, bazalt lifinin ise optimum üstü su içeriklerinde daha etkili olduğu, her iki lif türünün de kilin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.14. Farklı su içeriklerinde, farklı oranlarda lif katkılı kil numunelerinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Katkısız ve katkılı kil numunelerinin tek eksenli basınç dayanımları, Proktor eğrisinin kuru tarafındaki su içeriğinde hazırlanan numuneler için maksimum değer göstermiş; su içeriği arttıkça (ıslak tarafa geçtikçe) dayanımlarında kayıplar görülmüştür. Kuru tarafta, zemin taneleri daha yoğun sıkışabildiğinden, tane temas noktaları artarak içsel sürtünmeyi artırmış ve dayanımı yükseltmiştir. Ayrıca, düşük su içeriği, taneler arasında daha fazla kilitlenme etkisi yaratarak mekanik dayanımı ve UCS değerini arttırmıştır. Benzer sonuçlar Arabani ve Haghsheno,

Mirzababaei vd. tarafından yürütülen çalışmalarla da elde edilmiştir (Arabani & Haghsheno, 2020); (Mirzababaei et al., 2013).

Kilin UCS dayanımının artan silis dumanı ve uçucu kül içeriği ile birlikte ve daha uzun kür sürelerinde kademeli olarak arttığı görülmektedir. Tüm su içeriklerinde, artan kür süresi ile birlikte silis dumanı uçucu küle göre daha yüksek dayanım göstermiştir. Silis dumanı, numunenin içyapısını önemli ölçüde değiştirerek dayanımın artmasına neden olmaktadır. Bu değişim, silis dumanındaki reaktif silikanın alkali ortamda kil parçacıklarıyla kimyasal tepkimeye girerek bağlayıcı bir yapı oluşturmamasından kaynaklanmaktadır (Tran et al., 2023); (Banu & Attom, 2023); (Ohadian et al., 2024). Bu kimyasal reaksiyon, numune dayanımındaki artışla doğrudan ilişkilidir.

Artan nano-SiO₂ ve nanokil içeriği ile birlikte ve daha uzun kür sürelerinde kilin UCS değerinde sürekli bir artış olduğu yukarıdaki grafiklerden elde edilmiştir. Artan su içeriğine rağmen, kür süresi uzadıkça nanokil, nano-SiO₂'ye kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir. Abbasi vd. çalışmalarında nanokilin bir stabilizatör olarak kullanılmasının, zemin yapısını dağılmış bir yapıdan daha floküle ve kararlı, dağılmayan bir yapıya dönüştürdüğünü ortaya koymuştur (Abbasi et al., 2018). Bu da, su varlığında zemin parçacıkları ile nanokil arasındaki etkileşimler sayesinde zemin parçacıkları arasındaki yapışma kuvvetinin ve dolayısıyla dayanımın arttığı anlamına gelmektedir.

Elde edilen bulgular kapsamında, silis dumanı, nanoSiO₂ ve nanokil gibi katkı malzemelerinin kil zeminlerle etkileşime girerek dayanımı artırdığı ve bu etkinin özellikle daha uzun kür sürelerinde belirginleştiğini belirlenmiştir. Bu katkıların cam elyaf ile birlikte kullanılması, kimyasal bağ oluşumu, içyapının iyileştirilmesi ve gerilme dayanımının artırılması gibi farklı mekanizmaların sinerjik etkisini sağlamaktadır. Ayrıca, silis dumanı gibi endüstriyel atıkların ve düşük dozda kullanılan nanomalzemelerin bir araya getirilmesiyle, performansı yüksek ancak aynı zamanda ekonomik açıdan da uygulanabilir karışımların elde edilmesi mümkün olmuştur. Bu nedenle, teknik iyileşme ile birlikte maliyet etkinliğini de sağlayan nano tabanlı katkı kombinasyonlarının geliştirilmesi gerekli ve avantajlı bulunmuştur.

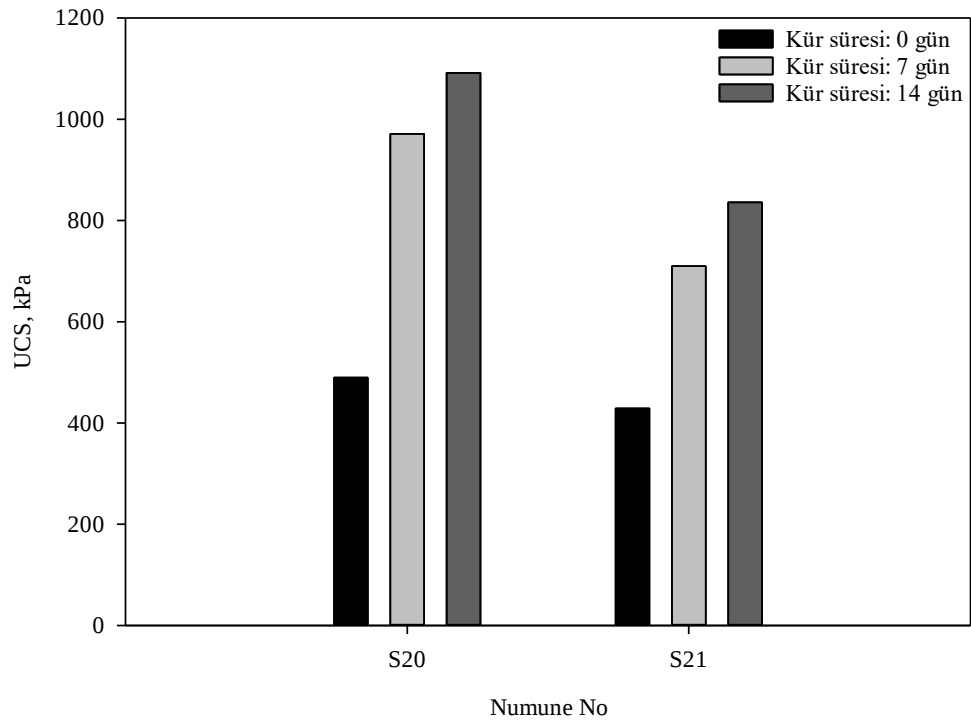
Bu çalışmada, silis dumanı-nanoSiO₂-cam elyaf ve silis dumanı-nanokil-cam elyaf kombinasyonlarının kil zeminlerin tek eksenli basınç dayanımı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, optimum su muhtevasında hazırlanan karışımlar farklı kür süreleri altında UCS testlerine tabi tutulmuştur. Aynı ayrı değerlendirilen silis dumanı ve nanomalzemelerin katkısı sonucunda, 3 günlük kür süresinin kimyasal reaksiyonlar için yeterli zaman sağlamadığı ve bu nedenle UCS değerinde sınırlı bir artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, katkı maddelerinin birleşik etkilerinin değerlendirilmesinde 0, 7 ve 14 günlük kür sürelerinin daha anlamlı sonuçlar verdiği ve mekanik iyileşmenin daha belirgin hale geldiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.4'te tez çalışması kapsamında nano tabanlı katkı maddeleriyle hazırlanan karışımlara ait deneysel program sunulmuştur.

Tablo 6.4. Nano tabanlı katkı maddeleriyle hazırlanan karışımların deneysel programı

No	Numune	Su İçeriği (%)	Kür süresi (gün)	Test
S20	Z+%20 SD+%1 NS+%2 CE	%17,3	0, 7, 14	UCS
S21	Z+%20 SD+%1 NK+%2 CE	%17,3	0, 7, 14	UCS

Şekil 6.15'te, optimum su içeriğinde hazırlanarak 0, 7 ve 14 günlük kür sürelerine tabi tutulan Z+%20 SD+%1 NS+%2 CE ve Z+%20 SD+%1 NK+%2 CE içerikli zemin numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı (UCS) değerleri sunulmuştur.



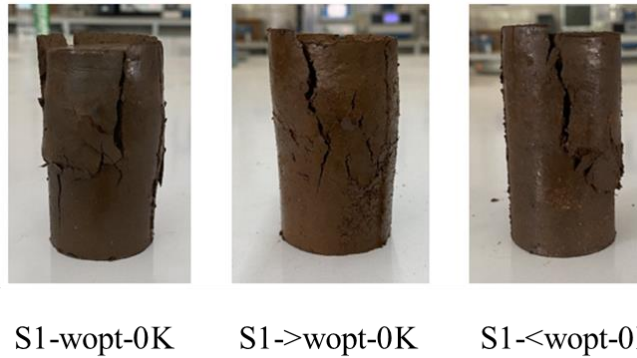
Şekil 6.15. Hazırlanan karışımın UCS değerleri

Saf kil zeminle karşılaştırıldığında, Z+%20 SD+%1 NS+%2 CE içeren numunelerin tek eksenli basınç dayanımında, 0, 7 ve 14 günlük kür süreleri sonunda sırasıyla %87,15, %271,34 ve %317,50 oranlarında artış gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, Z+%20 SD+%1 NK+%2 CE katkı numunelerde ise aynı kür süreleri sonunda dayanım artışları sırasıyla %63,83, %171,49 ve %219,74 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hem nanoSiO₂ hem de nanokil katkılarının cam elyaf ve silis dumanı ile birlikte kullanıldığında zemin dayanımını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır.

6.4. Katkısız ve Katkılı Zemin Numunelerinin Kırılma Modları

Tez çalışmasının bu bölümünde hazırlanan zemin numunelerinin UCS deneyi sonunda oluşan kırılma modları farklı su içeriklerinde ve farklı kür şartlarında incelenmiştir. UCS deneyi sonunda elde edilen katkısız ve katkılı numunelerin kırılma modlarına ait görüntüler, katkı maddelerinin numunenin kırılma davranışını nasıl etkilediğini somut biçimde ortaya koymakta ve katkının malzeme içyapısında oluşturduğu değişimleri gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır. Özellikle katkıların gevrek ya da sünek kırılma davranışı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi, malzemenin performansını daha kapsamlı bir şekilde yorumlamaya olanak sağlar. Ayrıca, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntü analizlerinin de yapılmış olması, numune içyapısındaki mikroskobik değişimlerin detaylı incelenmesine olanak tanıyarak, kırılma modlarının mikro düzeydeki sebeplerine ışık tutmakta ve makroskobik gözlemlerle desteklenmiş bilimsel bir bütünlük sağlamaktadır.

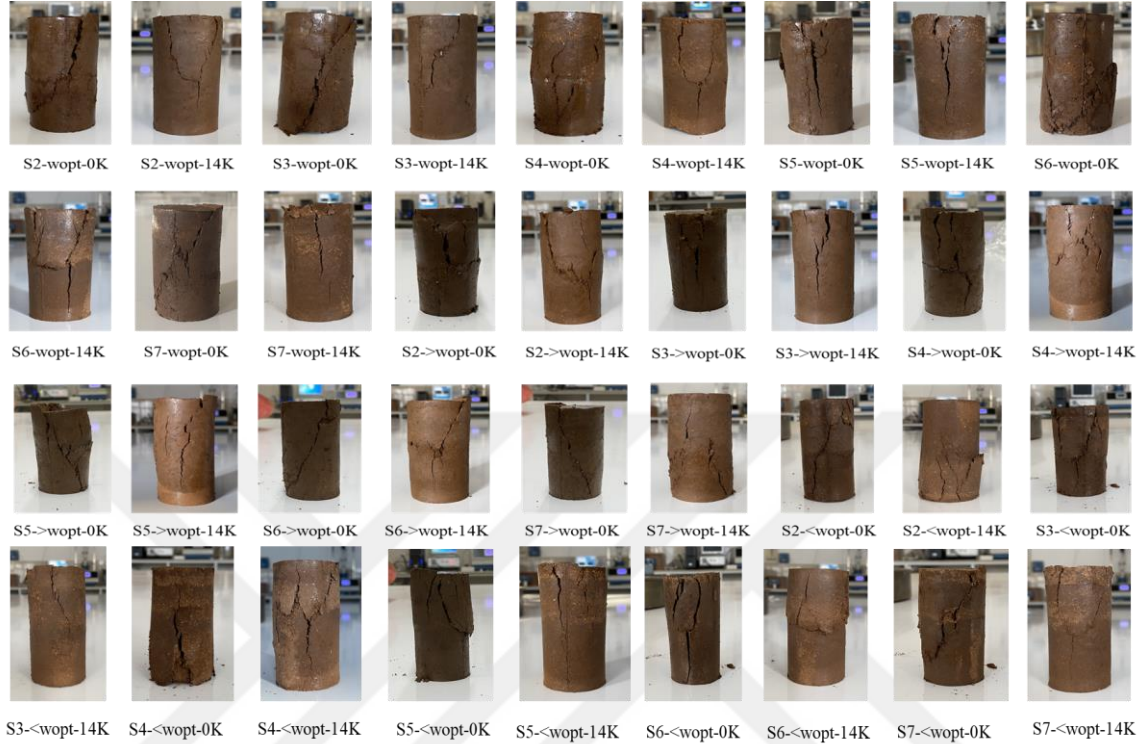
Optimum su içeriğinde, optimumdan büyük ve optimumdan küçük olmak üzere üç farklı su içeriklerinde hazırlanan saf kil numunelerinin kırılma modları Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, su içeriğindeki değişim, kil numunelerinin kırılma davranışını doğrudan etkilemiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan numunede (S1-wopt-0K) daha belirgin ve dikey yönelimli çatlaklar gözlenirken, optimum altı su içeriğinde (S1-<wopt-0K) çatlakların daha az geliştiği ve kırılmanın daha gevrek bir karakter taşıdığı anlaşılmaktadır. Öte yandan, optimum üstü su içeriğinde hazırlanan numunede (S1->wopt-0K), daha yaygın çatlak oluşumu ve yüzeyde bozulmalar görülmüş, bu da numunenin daha plastik bir davranış sergilediğini göstermiştir. Bu bulgular, Şekil 6.5'te verilen saf kile ait gerilme-şekil değiştirme davranışlarıyla tutarlıdır.



Şekil 6.16. Farklı su içeriklerinde hazırlanan saf kil numunelerinin (S1) kırılma modları

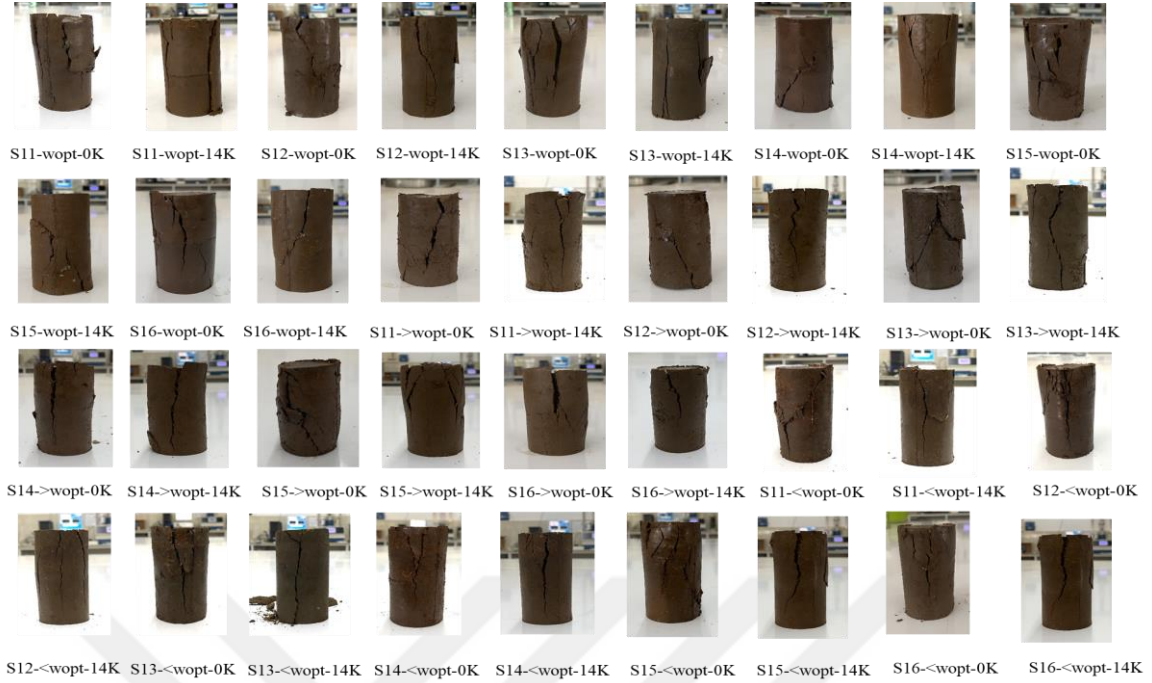
Optimum su içeriğinde farklı oranlarda hazırlanan nanomalzeme katkılı S2, S3, S4, S5, S6 ve S7 numunelerinin farklı kürleme sürelerinde kırılma modları Şekil 6.17'de verilmiştir. Nano-SiO₂ ve nanokil karışımıyla hazırlanan zemin numunelerinde belirgin bir kayma kırılma düzlemi ortaya çıkmıştır. Kile nanomalzemelerin eklenmesiyle numunenin kırılma davranışını süneklikten

gevrekliğe kaydırmıştır. Bu kırılma davranış zemin numunesi kohezyonundaki artıştan kaynaklanmıştır, bu da zemin mukavemetini artırmış ve sünekliği azaltmıştır.



Şekil 6.17. Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda hazırlanan nanomalzeme katkı numunelerinin (S2, S3, S4, S5, S6, S7) kırılma modları

Şekil 6.18’de, optimum su içeriğinde hazırlanmış ve farklı kür sürelerine tabi tutulmuş çeşitli oranlardaki endüstriyel atık katkı numunelere ait kırılma modları sunulmuştur. Silis dumanı ve uçucu kül ile stabilize edilen numunelerde, hem kür öncesinde hem de 14 günlük kür sonrası yapılan UCS testlerinde kırılma modlarının, numunenin üst kısmından alt kısmına doğru gelişen dikey kesme şeklinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.18. Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda hazırlanan endüstriyel atık katkı numunelerinin (S11, S12, S13, S14, S15, S16) kırılma modları

Şekil 6.19'da, S8, S9, S10, S17, S18 ve S19 numunelerine ait UCS testi sonrası gözlemlenen kırılma modları sunulmuştur. Uygulanan tek eksenli basınç yüklemesi sonucunda numunelerde çatlaklar meydana gelmiş olsa da, lif katkılı numunelerde kil matrisi ile lifler arasında oluşan bağlayıcı etki sayesinde numuneler tamamen iki parçaya ayrılmamıştır. Özellikle optimum su içeriğinin altında hazırlanan lif katkılı numunelerde liflerin topaklanma eğiliminde olduğu ve bu durumun zemin yapısının homojen dağılmasını engellediği tespit edilmiştir. Buna karşılık, optimum su içeriğinin üzerinde hazırlanan örneklerde liflerin matrise daha homojen şekilde dağıldığı ve bunun da numunenin bütünlüğünü ve kırılma davranışını olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, maksimum karışım oranına sahip lif takviyeli numunelerde kırılma yatay yönde meydana gelmiş, bu durum özellikle cam elyaf katkısı içeren numunelerde daha belirgin hale gelmiştir. Lif oranının artmasıyla birlikte çatlak oluşumunun da arttığı tespit edilmiştir. Bazalt lif katkılı numuneler ise, genellikle numune merkezinden başlayan ve uygulanan dikey yükle birlikte yüksek genleşme gösteren dikey çatlaklarla karakterize edilmiştir. Bu kırılma modları, kullanılan katkı türü ve miktarının zemin davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

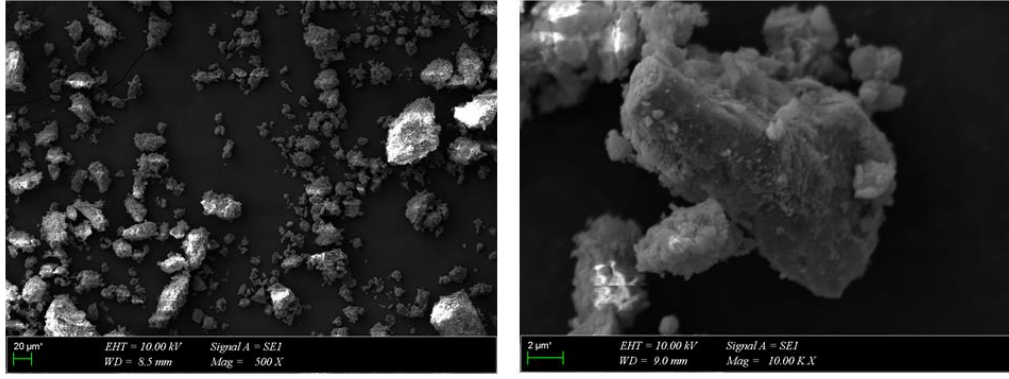


Şekil 6.19. Farklı su içeriklerinde farklı oranlarda hazırlanan lif katkılı numunelerinin (S8, S9, S10, S17, S18, S19) kırılma modları

6.5. Mikroyapısal Analiz (SEM Görüntüleri)

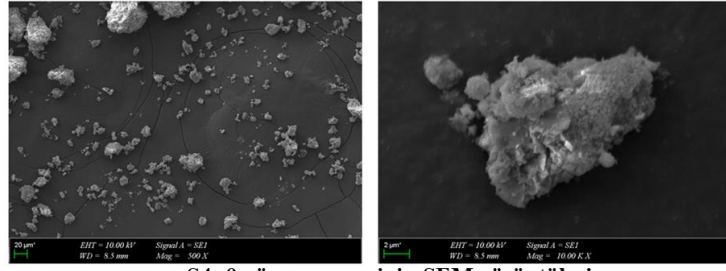
Çalışmanın bu bölümünde tek eksenli basınç testi sonucu 0 gün ile 14 gün kür sürelerinde optimum su içeriğinde hazırlanan S1, S4, S7, S10, S13, S19, S20, S21 numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelenmiştir. Numunelerin görüntüleri 500x ve 10000x yakınlaştırma oranları ile alınmıştır. Bu şekiller ortalama boyut ve gözeneklilik değerlerini göstermektedir. Killi zemin gözenekliliğin katkı maddelerinin varlığıyla azaldığı ve gözeneklerde meydana gelen bu azalmayla beraber mukavemetlerinde artış meydana gelmiştir.

Şekil 6.20’de tek eksenli basınç testi için optimum su içeriğinde hazırlanan saf kil zeminin (S1) SEM görüntüleri verilmiştir. İncelenen kil numunesinin SEM görüntüsü, levha şeklinde bir yapıya sahiptir. Bu levhalar genellikle geniş yüzey alanına ve ince kalınlığa sahiptir. Levhalar arasındaki boşluklar, numunenin gözenekli bir yapıya ve su geçirgenliğine sahip olduğunu göstermektedir.

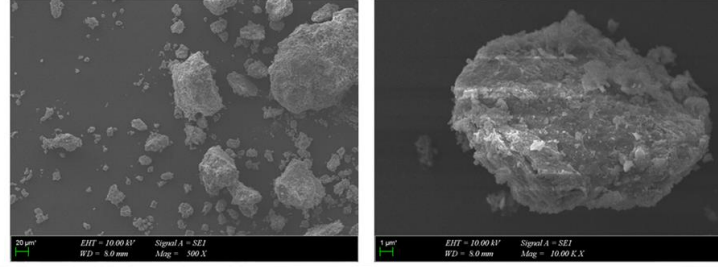


Şekil 6.20. S1 numunenin SEM görüntüleri

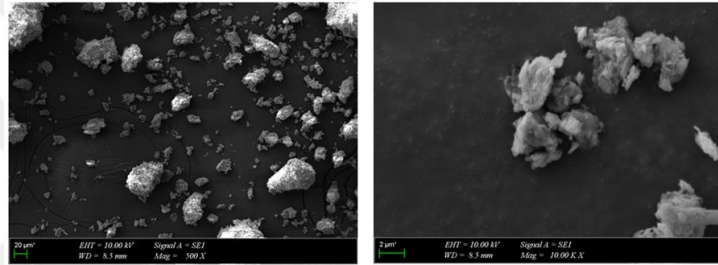
Şekil 6.21’de nanoparçacık katkılı kil numunelerinin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri sunulmuştur. Nanokil katkılı kil numunelerinde mikrogözeneklerin dolduğu ve daha flok benzeri bir yapının baskın hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kil parçacıkları arasında daha fazla temas ve yapışmanın oluşmasına yol açarak daha yüksek UCS değerlerine neden olmuştur. 14 günlük kürleme süresinin ardından hazırlanan numunelerde, SEM görüntülerinde hem gözenekliliğin azaldığı hem de daha düzgün bir yapı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, nanoparçacık içeren zemin numunelerinin dokusu, nanoparçacık içermeyen karışımlara göre daha düzgün ve daha yoğun bir yapı sergilemiştir. Nanokil ilavesi, kil yapısını sıkılaştırarak çok küçük boşlukları dahi ortadan kaldırmıştır.



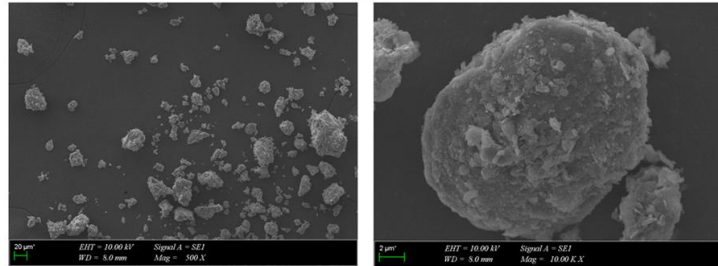
S4- 0 gün numunesinin SEM görüntüleri



S4-14 gün numunesinin SEM görüntüleri



S7- 0 gün numunesinin SEM görüntüleri

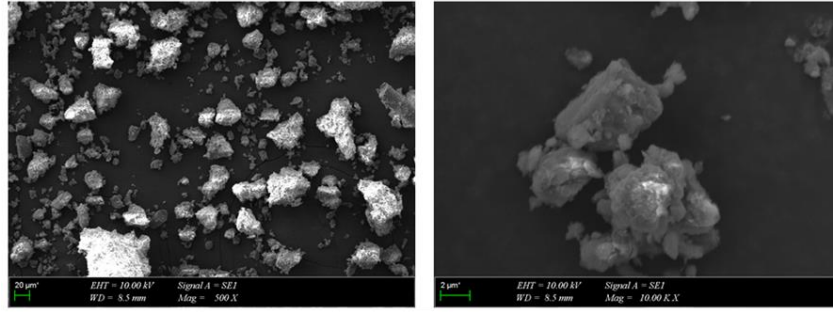


S7- 14 gün numunesinin SEM görüntüleri

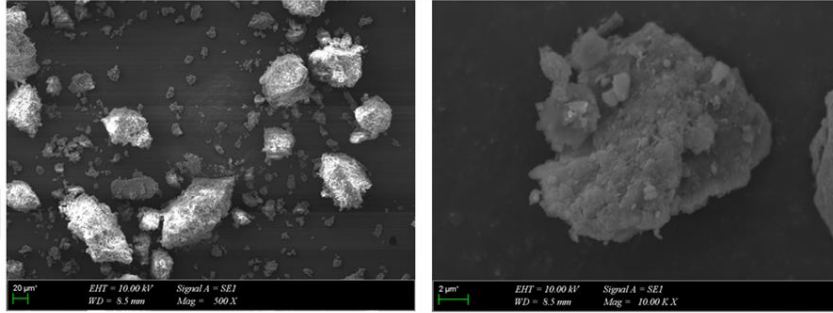
Şekil 6.21. Nanoparçacık katkılı kil numunelerinin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri

Şekil 6.22’de lif katkılı kil numunelerinin SEM görüntüleri sunulmuştur. Bazalt fiber kil matrisine kütleler hâlinde dağılarak topaklanma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ayrıca bazalt fiberin yüzeydeki kil parçacıklarıyla kısmen entegre olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, arayüzey bağlarının zayıf olduğu ve mikrogözeneklerin oluştuğu fark edilmektedir. Bu durum, bazalt fiberin kil matrisiyle sınırlı düzeyde bir aderans geliştirdiğini göstermektedir. Öte yandan, cam fiber matris içinde daha homojen bir dağılım sergileyerek daha az topaklanma eğilimindedir. Liflerin kil parçacıkları arasında daha yaygın ve düzenli bir şekilde bulunduğu izlenmektedir. Ayrıca, cam fiber ile kil matrisi arasında daha belirgin bir arayüzey oluştuğu gözlemlenmektedir. Cam fiberin kil

parçacıklarına daha sıkı bir şekilde tutunduğu, yüzey etkileşiminin bazalt fibere kıyasla daha etkin olduğu değerlendirilmektedir.



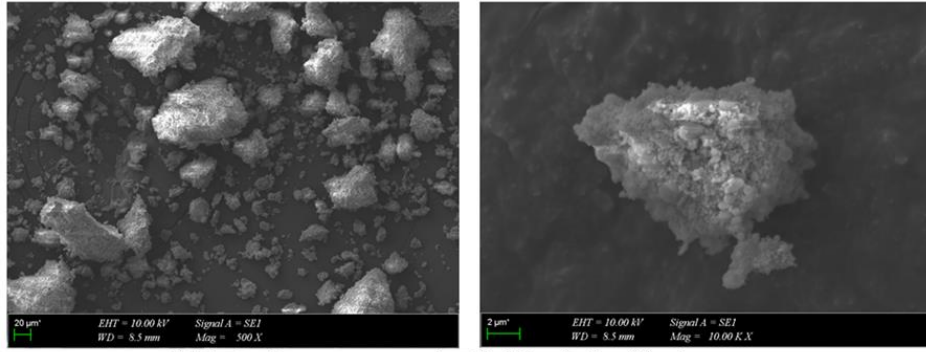
S10 numunenin SEM görüntüleri



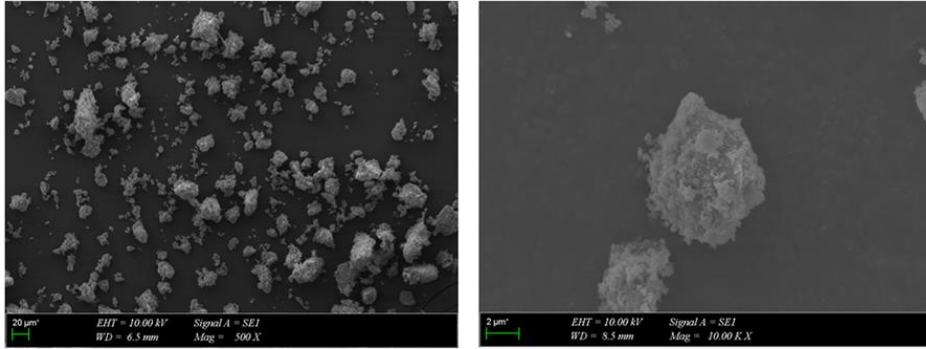
S19 numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.22. Lif katkılı kil numunelerinin SEM görüntüleri

Şekil 6.23'te endüstriyel atık numuneler içinde daha fazla dayanım sağlayan silis dumanının SEM görüntüleri verilmiştir. Kil parçacıkları %20 silis dumanı ile stabilize edildiğinde, %1 oranda nanokil ile benzer bir davranış göstererek mikro gözeneklerin dolduğu ve daha flok benzeri bir yapının baskın hale geldiği gözlemlenmiştir. Öte yandan, silis dumanında gözlemlenen aglomerasyon (yığılma) olgusunun, daha yoğun bir yapıya sahip olması nedeniyle nano-SiO₂ ile stabilize edilen yapılarda azaldığı görülmektedir.



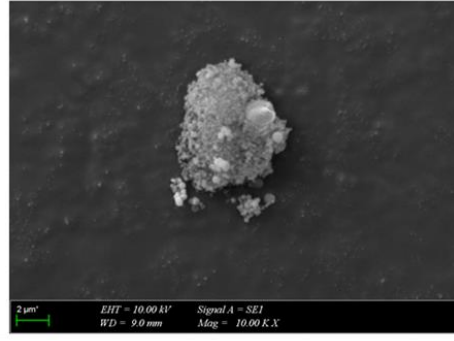
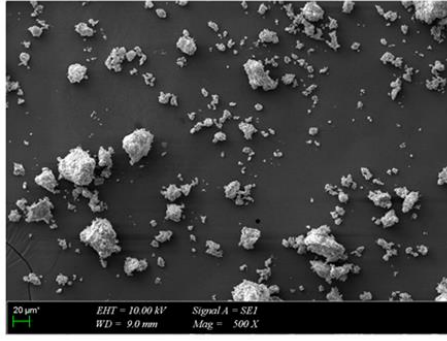
S13- 0 gün numunenin SEM görüntüleri



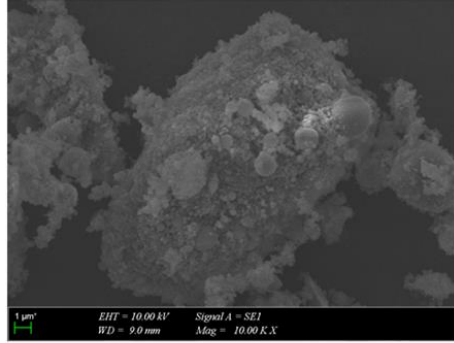
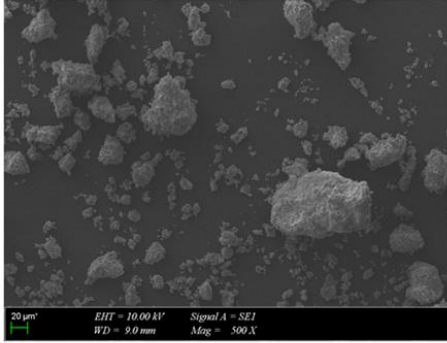
S13- 14 gün numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.23. Endüstriyel atık katkılı kil numunelerinin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri

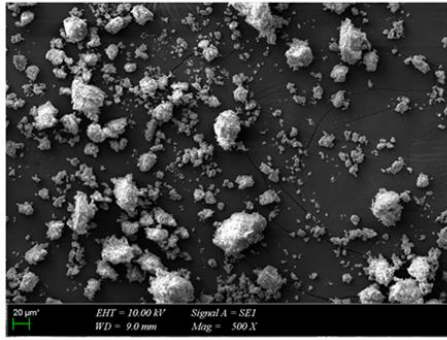
Şekil 6.24'te nano-tabanlı karışımlarla stabilize edilen numunelerin SEM görüntülerinde, silis dumanının daha küçük boyutlu nanoparçacıklar üzerine çökerek, nanoparçacıkların çekirdek olduğu kümeler oluşturduğu ve büyüttiği görülmektedir. Silis dumanı yüksek puzolanik özelliklere sahip çok ince taneli bir malzemedir. Bu ince taneler, kil parçacıkları arasındaki boşlukları doldurarak zemin yapısını daha sağlam ve homojen hale getirir. Bu durum, zeminin gözenekliliğini ve su geçirgenliğini azaltır. Ayrıca, nano-SiO₂ ve nanokil, büyük yüzey alanları ve yüksek reaktiviteleri sayesinde kil parçacıklarıyla daha etkili bir şekilde etkileşime girer. Bu etkileşimler, kil parçacıkları arasındaki bağlayıcı kuvvetleri artırarak zeminin mekanik özelliklerini iyileştirir. Ayrıca, nanoparçacıklar kil yüzeyinde pozitif yükler oluşturarak elektrostatik çekimi artırır. Bu da kil parçacıklarının birbirine daha yakın durmasını sağlar ve zemin yapısının kararlılığını artırır. Hibrit karışımlarda yer alan cam lifler ise zeminin taşıma kapasitesini artırır ve çekme dayanımını iyileştirir. Lifler, çatlakların oluşmasını ve ilerlemesini engelleyerek zemin yapısının bütünlüğünü korur. Gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Bu da lokal zayıflıkların ve çatlakların oluşmasını önler.



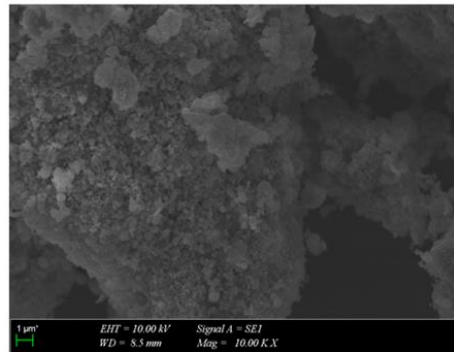
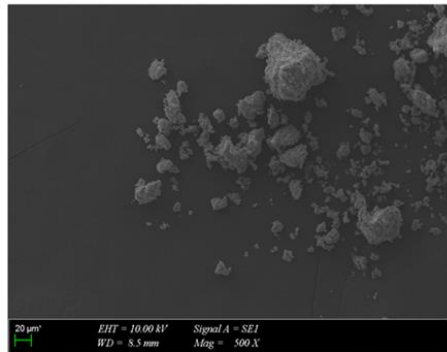
S20- 0 gün numunenin SEM görüntüleri



S20- 14 gün numunenin SEM görüntüleri



S21- 0 gün numunenin SEM görüntüleri



S21- 14 gün numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.24. SD-nanoparçacık-CF karışımlarıyla hazırlanan kil numunelerin farklı kür koşullarında SEM görüntüleri

7. ENDÜSTRİYEL ATIK, LİF VE NANOMALZEME KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ KİLLİ ZEMİNLERİN DAYANIMLARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Tez çalışmasının bu bölümünde endüstriyel atık, lif ve nanomalzeme kullanılarak güçlendirilmiş killi zemin numunelerinin dayanımlarının karşılaştırmalı analizi Grey ilişkisel analiz yöntemiyle yapılmıştır.

7.1. Grey İlişkisel Analiz Yöntemiyle Karşılaştırmalı Değerlendirme

Grey ilişkisel analiz (GRA) yöntemi, birden çok faktörle birden çok değişken arasındaki karşılıklı karmaşık ilişkilerin çözümlenmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılır. Belirlenen faktörler arasındaki geometrik ilişkinin derecesini ölçerek verilerin doğrudan değerlendirilmesine yardımcı olmuştur (Cui et al., 2009). GRA yöntemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

- Alternatiflerin ve kriterlerin belirlenmesi
- Performans matrisinin oluşturulması
- Normalleştirilmiş bir performans matrisinin oluşturulması
- Referans dizisinin oluşturulması
- Fark matrisinin belirlenmesi
- Grey korelasyon katsayısının belirlenmesi
- Grey korelasyon derecesinin hesaplanması

1. Adım: Alternatiflerin ve kriterlerin belirlenmesi ile ilgilidir.

2. Adım: Alternatif ve kriterler belirlendikten sonra bir performans matrisi oluşturulur. Alternatif sayısı X ve kriter sayısı Y ise X x Y sırasına sahip performans matrisi şu şekilde ifade edilir:

$$f = [f_{ik}]_{X \times Y} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1Y} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2Y} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_{X1} & f_{X2} & \dots & f_{XY} \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

f_{ik} 'deki alt indisler i. alternatfin k. kritere göre değerini göstermektedir. $i=1,2,3,\dots,X$ ve $k=1,2,3,\dots,Y$ şeklindedir.

3. Adım: Performans matrisindeki değerler [0, 1] aralığında normalize edilir. Performans matrisindeki her bir elemanın normalleştirilmiş değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$f' = [f'_{ik}]_{X \times Y} = \begin{bmatrix} f'_{11} & f'_{12} & \dots & f'_{1Y} \\ f'_{21} & f'_{22} & \dots & f'_{2Y} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f'_{X1} & f'_{X2} & \dots & f'_{XY} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Bu tez çalışmasında Grey ilişkisel analizle birlikte killerin tek eksenli dayanım parametreleri üzerinde endüstriyel atık, nanomalzeme ve lif oranları, kür süreleri, su içeriğinin etki dereceleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda öncelikle tek eksenli dayanım parametreleri üzerinde referans dizi olarak seçilecek ve diğer parametreler karşılaştırma dizisi olarak kullanılacaktır.

4. Adım: Her bir kriterin en büyük normalleştirilmiş değeri Denklem 7.3 kullanılarak normalleştirilmiş matristen referans dizisini (R_j) oluşturulur:

$$R_j = \max_{i=1}^X (X_{ik}) \quad (7.3)$$

5. Adım: Normalleştirilmiş bir terim ile referans değeri arasındaki fark Denklem 7.5 kullanılarak fark matrisini oluşturur.

$$\Delta_{ij} = |R_j - X_{ij}| \quad (7.4)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1Y} \\ \Delta_{21} & \Delta_{22} & \dots & \Delta_{2Y} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \Delta_{X1} & \Delta_{X2} & \dots & \Delta_{XY} \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

6. Adım: Her terim için grey korelasyon katsayısı şu şekilde belirlenir:

$$\xi_{ik} = \frac{\min_{i=1}^X \min_{i=1}^Y \Delta_{ik} + \chi \max_{i=1}^X \max_{i=1}^Y \Delta_{ik}}{\Delta_{ik} + \chi \max_{i=1}^X \max_{i=1}^Y \Delta_{ik}} \quad (7.6)$$

Burada $X \in [0,1]$ ayırt edici katsayısı olarak bilinir ve bu değer genellikle orta düzeyde ayırt edici etkilerle birlikte iyi bir kararlılık sunduğu için genellikle 0,5 değerini alır.

7. Adım: Grey korelasyon derecesinin belirlenmesi:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\xi_{ik}] \quad (7.7)$$

Burada r_i , referans dizisi ile i . veri dizisi arasında ölçülen korelasyonun büyüklüğünü gösteren Grey korelasyon derecesidir.

Tez çalışma kapsamında killi bir zemin farklı su içeriklerinde, farklı kür süreleri altında ve farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂, nanokil, bazalt lifi ve cam lifi ile stabilize edilmiştir. Stabilize edilmiş killi zeminin UCS (tek eksenli basınç dayanımı) değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 7.1’de sunulmuştur.

Tablo 7.1. Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde, farklı oranlarda katkıli killi zeminin UCS değerleri

Referans Dizisi		Karşılaştırma Dizisi							
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9
No	qu*	SD*	UK*	NSiO ₂ *	NK*	CL*	BL*	K*	w*
1	261,537	0	0	0	0	0	0	0	0,173
2	317,562	0,05	0	0	0	0	0	0	0,167
3	526,305	0,1	0	0	0	0	0	0	0,160
4	534,269	0,2	0	0	0	0	0	0	0,153
5	288,183	0	0,05	0	0	0	0	0	0,162
6	311,660	0	0,1	0	0	0	0	0	0,154
7	346,478	0	0,2	0	0	0	0	0	0,145
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
168	428,464	0,2	0	0	0,01	0,02	0	0	0,173
169	489,474	0,2	0	0,01	0	0,02	0	0	0,173
170	710,059	0,2	0	0	0,01	0,02	0	7	0,173
171	971,186	0,2	0	0,01	0	0,02	0	7	0,173
172	836,229	0,2	0	0	0,01	0,02	0	14	0,173
173	1091,921	0,2	0	0,01	0	0,02	0	14	0,173
*qu: Maksimum UCS; SD: Silis Dumanı; UK: Uçucu Kül; N-SiO ₂ : Nano SiO ₂ ; NK: Nanokil; Cam Lifi: CL; Basalt Lifi: BL; Kür Süresi: K; Su içeriği: w									

Grey korelasyon analizi ile bu zeminin UCS değerleri üzerinde hangi parametrenin daha etkili olduğunun anlaşılması için şu adımlar izlenmiştir:

1. Adım: Grey korelasyon analizi için referans dizisi (Y₁=UCS), karşılaştırma dizisi ise (Y₂=Silis dumanı, Y₃=Uçucu kül, Y₄=Nano-SiO₂, Y₅=Nanokil, Y₆=Cam lifi, Y₇=Bazalt lifi, Y₈=Kür süresi, Y₉=Su içeriği) olarak tanımlanmıştır.

2. Adım: Tablodaki UCS değerleri (Y₁) ve değişkenler (Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆, Y₇, Y₈, Y₉) kullanılarak performans matrisi şu şekilde oluşturulmuştur:

$$X = \begin{bmatrix} 261,537 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,173 \\ 317,562 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,167 \\ 526,305 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,160 \\ 534,269 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,153 \\ 288,183 & 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,162 \\ 311,660 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,154 \\ 346,478 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,145 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 428,464 & 0,2 & 0 & 0 & 0,01 & 0,02 & 0 & 0 & 0,173 \\ 489,474 & 0,2 & 0 & 0,01 & 0 & 0,02 & 0 & 0 & 0,173 \\ 710,059 & 0,2 & 0 & 0 & 0,01 & 0,02 & 0 & 7 & 0,173 \\ 971,186 & 0,2 & 0 & 0,01 & 0 & 0,02 & 0 & 7 & 0,173 \\ 836,229 & 0,2 & 0 & 0 & 0,01 & 0,02 & 0 & 14 & 0,173 \\ 1091,921 & 0,2 & 0 & 0,01 & 0 & 0,02 & 0 & 14 & 0,173 \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

3. ve 4. Adım: Her kriterin maksimum değeri referans dizisini oluşturmaktadır:

$R = [\max(\text{UCS}), \max(\text{Silis dumanı}), \max(\text{Uçucu kül}), \max(\text{Nano-SiO}_2), \max(\text{Nanokil}), \max(\text{Cam lifi}), \max(\text{Bazalt lifi}), \max(\text{Kür süresi}), \max(\text{Su içeriği})]$

Tablo 7.1'deki verilere göre referans dizisi $R = [1659,699; 0,2; 0,2; 0,01; 0,01; 0,02; 0,02; 14; 0,2]$ olarak belirlenmiştir.

Performans matrisi, her kriter için maksimum değere bölünerek normalize edilir:

$$X = \begin{bmatrix} 0,158 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,865 \\ 0,191 & 0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,836 \\ 0,317 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,798 \\ 0,322 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,764 \\ 0,174 & 0 & 0,25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,81 \\ 0,188 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,770 \\ 0,209 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,724 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0,258 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0,865 \\ 0,295 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0,865 \\ 0,428 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0,5 & 0,865 \\ 0,585 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0,5 & 0,865 \\ 0,504 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0,865 \\ 0,658 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0,865 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

5. Adım: Referans dizisi ile normalize edilmiş matris arasındaki fark matrisi:

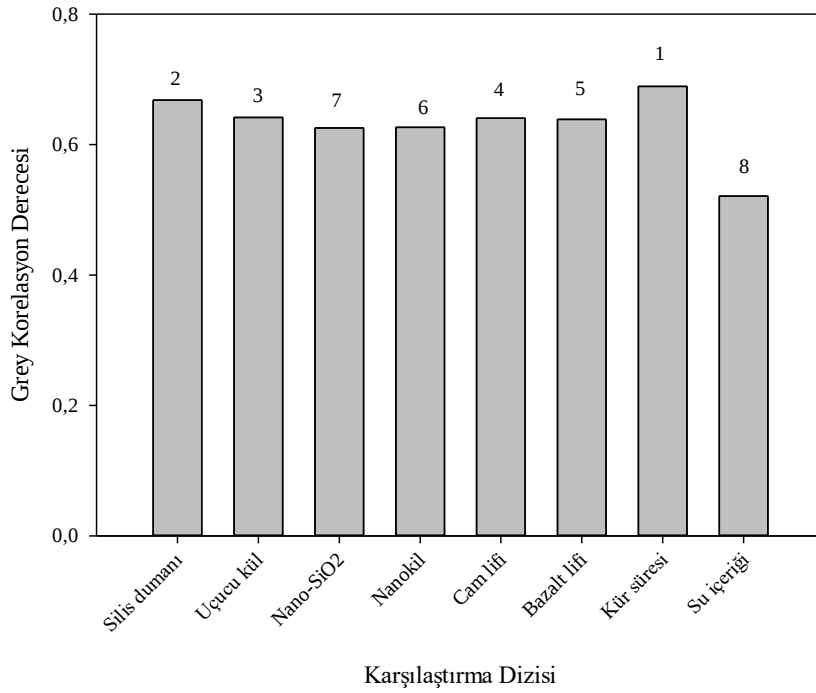
$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0,158 & 0,158 & 0,158 & 0,158 & 0,158 & 0,158 & 0,158 & 0,707 \\ 0 & 0,059 & 0,191 & 0,191 & 0,191 & 0,191 & 0,191 & 0,191 & 0,644 \\ 0 & 0,183 & 0,317 & 0,317 & 0,317 & 0,317 & 0,317 & 0,317 & 0,480 \\ 0 & 0,678 & 0,322 & 0,322 & 0,322 & 0,322 & 0,322 & 0,322 & 0,442 \\ 0 & 0,174 & 0,076 & 0,174 & 0,174 & 0,174 & 0,174 & 0,174 & 0,636 \\ 0 & 0,188 & 0,312 & 0,188 & 0,188 & 0,188 & 0,188 & 0,188 & 0,582 \\ 0 & 0,209 & 0,791 & 0,209 & 0,209 & 0,209 & 0,209 & 0,209 & 0,515 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0,742 & 0,258 & 0,258 & 0,742 & 0,742 & 0,258 & 0,258 & 0,607 \\ 0 & 0,705 & 0,295 & 0,705 & 0,295 & 0,705 & 0,295 & 0,295 & 0,570 \\ 0 & 0,572 & 0,428 & 0,428 & 0,572 & 0,572 & 0,428 & 0,072 & 0,437 \\ 0 & 0,415 & 0,585 & 0,415 & 0,585 & 0,415 & 0,585 & 0,085 & 0,280 \\ 0 & 0,496 & 0,504 & 0,504 & 0,496 & 0,496 & 0,504 & 0,496 & 0,361 \\ 0 & 0,342 & 0,658 & 0,342 & 0,658 & 0,342 & 0,658 & 0,342 & 0,207 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

6. Adım: Denklem 7.6 kullanılarak karşılaştırma dizisi için hesaplanan Grey Korelasyon Katsayısı değerleri şu şekildedir:

$$X = \begin{bmatrix} 0,760 & 0,760 & 0,760 & 0,760 & 0,760 & 0,760 & 0,760 & 0,414 \\ 0,895 & 0,723 & 0,723 & 0,723 & 0,723 & 0,723 & 0,723 & 0,437 \\ 0,732 & 0,612 & 0,612 & 0,612 & 0,612 & 0,612 & 0,612 & 0,510 \\ 0,424 & 0,608 & 0,608 & 0,608 & 0,608 & 0,608 & 0,608 & 0,531 \\ 0,742 & 0,868 & 0,742 & 0,742 & 0,742 & 0,742 & 0,742 & 0,44 \\ 0,727 & 0,616 & 0,727 & 0,727 & 0,727 & 0,727 & 0,727 & 0,462 \\ 0,705 & 0,387 & 0,705 & 0,705 & 0,705 & 0,705 & 0,705 & 0,492 \\ \cdot & & & & & & & \\ \cdot & & & & & & & \\ \cdot & & & & & & & \\ 0,403 & 0,659 & 0,659 & 0,403 & 0,403 & 0,659 & 0,659 & 0,452 \\ 0,415 & 0,629 & 0,415 & 0,629 & 0,415 & 0,629 & 0,629 & 0,467 \\ 0,466 & 0,539 & 0,539 & 0,466 & 0,466 & 0,539 & 0,874 & 0,534 \\ 0,547 & 0,461 & 0,547 & 0,461 & 0,547 & 0,461 & 0,854 & 0,641 \\ 0,502 & 0,498 & 0,498 & 0,502 & 0,502 & 0,498 & 0,502 & 0,581 \\ 0,594 & 0,432 & 0,594 & 0,432 & 0,594 & 0,432 & 0,594 & 0,707 \end{bmatrix}$$

(7.11)

7. Adım: Denklem 7.7 kullanılarak karşılaştırma dizisi için hesaplanan Grey Korelasyon Derecesinin ve UCS üzerindeki sıralamalarını gösteren grafik Şekil 7.1’de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Grey korelasyon dereceleri

Şekil 7.1'de görüldüğü üzere, UCS açısından Grey ilişki sıralaması şu şekildedir: $K > SD > UK > CL > BL > NK > NSiO_2 > w$. Grey ilişki analizi sonuçlarına göre, kil numunelerinin tek eksenli basınç dayanımı üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kür süresi, silis dumanı, uçucu kül, cam lifi, bazalt lifi, nanokil, nano silika ve su içeriği olarak belirlenmiştir. Kür süresi, zamanla kil/katkı bağlanma mekanizmalarını geliştirerek dayanımı en çok artıran faktör olmuştur. Silis dumanı ve uçucu kül, puzolanik reaksiyonları tetikleyerek ve kil yapısında daha yoğun ve kararlı bir matris oluşturarak dayanımı önemli ölçüde artırmıştır. Lif katkıları, numunelere çekme dayanımı kazandırarak mikro çatlak oluşumunu engellemiş ve böylece UCS üzerinde olumlu etki göstermiştir. Nanomalzemeler arasında, küçük tanecik boyutu sayesinde yüzey alanını artıran nanokil, kil matrisindeki boşlukları azaltarak dayanımı iyileştirmiştir. Nano silika ise daha etkili bağlayıcı özelliklere sahip olmasına rağmen, diğer katkılara kıyasla etkisinin daha düşük olduğu görülmüş, bu durum katkı oranı ve dağılımının optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Su içeriği, bağlayıcı reaksiyonlar için belirli bir miktarda gerekli olsa da fazla su dayanımı düşürebileceği için en az etkili parametre olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, her bir parametrenin mekanik özelliklere olan katkısını kapsamlı bir şekilde değerlendirmekte ve optimum katkı seçimi ile karışım tasarımı konusunda rehberlik sağlamaktadır.

8. SONUÇLAR

Farklı su içeriklerinde, farklı kür sürelerinde ve farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂, nanokil, cam lif ve bazalt lif katkılı killi zemin numunelerinin tek eksenli basınç testine tabi tutulup hangi oranlarda iyileşme meydana geldiğini incelemek bu tez çalışmasının temel amacı kapsamındadır. Sonuçlar, her bir katkı maddesi ile ilişkili farklı davranış modelleri tanımlamakta ve bunların pratik mühendislik uygulamaları üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Uygulanan deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- Çalışmada kullanılan killi zeminin likit limiti %49,45, plastik limiti ise %25,41 olarak belirlenmiştir. Silis dumanı (SD) ilavesiyle likit limit değeri %48,75'e, plastik limit değeri ise %25,21'e düşmüştür. Uçucu kül (UK) katkısı ile ise likit limit %49,03 olarak ölçülmüş, plastik limit değeri ise %21'e gerilemiştir. Elde edilen bu sonuçlar, her iki endüstriyel atığın da zeminin plastiklik özelliklerini belirli ölçüde azalttığını göstermektedir. Özellikle uçucu kül katkısının plastik limit üzerinde daha belirgin bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir.
- Kompaksiyon deneyleri sonucunda, katkı maddelerinin killi zeminin optimum su içeriği (w_{opt}) ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) üzerinde farklı düzeylerde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak, silis dumanı ve uçucu kül katkıları optimum su içeriğinde sınırlı değişimlere yol açarken, özellikle uçucu kül katkısının daha düşük su içeriği değerlerine neden olduğu dikkati çekmektedir. Nano silika katkısı ise optimum su içeriğini belirgin şekilde artırmış; bu da, nano boyuttaki parçacıkların yüksek yüzey alanı nedeniyle daha fazla suya ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur. Nano kil katkısı ise su içeriği üzerinde düzensiz bir değişim göstermiştir; bu durum, katkının dağılımı ve kil ile etkileşiminin karmaşık yapısına bağlanabilir.
- Maksimum kuru birim hacim ağırlığı açısından değerlendirildiğinde, katkı maddelerinin etkilerinin daha sınırlı olduğu görülmüştür. Silis dumanı ve nano silika katkılarında bazı oranlarda hafif düşüşler gözlemlenirken, uçucu kül ve nano kil katkılarında daha stabil veya hafif artış eğilimleri görülmüştür. Bu sonuçlar, katkıların yoğunluk ve zemin yapısına entegrasyon biçimine bağlı olarak kompaksiyon özelliklerinde farklı tepkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Genel olarak, katkı maddelerinin optimum su içeriği üzerinde, maksimum kuru birim hacim ağırlığa kıyasla daha belirgin etkiler yarattığı söylenebilir.
- Uygulanan tek eksenli basınç (UCS) deneyleri sonucunda, katkı maddesi oranının artmasının genel olarak killi zeminin dayanımını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Nano silika (NS) katkılı numunelerde, katkı oranındaki artış ile birlikte dayanımda %30 ila %79 arasında artış gözlemlenmiş, benzer şekilde nano kil (NK) katkılı numunelerde ise bu

artış %9 ila %55 aralığında gerçekleşmiştir. Bu durum, her iki nanomalzemenin de zemin matrisinde bağlanmayı güçlendirdiğini ve dayanımı artırıcı etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

- Kürlenme süresi faktörü de katkı maddelerinin etkinliğini önemli ölçüde artırmıştır. Kür süresi ilerledikçe kimyasal reaksiyonların tamamlanması ve bağ yapıların gelişmesi sayesinde zemin mukavemetinde belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Özellikle %1 NS katkılı numunede 0 güne kıyasla 14 gün sonunda yaklaşık %56 oranında bir artış kaydedilmiştir. NK katkılı numunelerde ise bu artış %112 seviyelerine ulaşmış, bu da NK'nın kürlenme sürecine daha duyarlı bir katkı maddesi olduğunu göstermiştir. Endüstriyel atık katkılarından silis dumanı (SD), 14 günlük kür sonunda en yüksek dayanım artışını sağlayarak başlangıç değerine göre %208'in üzerinde bir iyileşme ortaya koymuştur. Uçucu kül (UK) katkılı numunelerde de dayanımda artış görülmüş olmakla birlikte, bu artış SD'ye göre daha sınırlı kalmış ve %37 civarında gerçekleşmiştir.
- Lif katkısının da zemin dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir. Özellikle %2 oranında bazalt elyaf (BE) ve cam elyaf (CE) katkısı ile hazırlanan numunelerde sırasıyla %30 ve %62 oranında dayanım artışı sağlanmıştır.
- Su içeriğinin tek eksenli basınç dayanımı (UCS) üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, optimum su içeriğinin üzerinde ($w = \%20$) hazırlanan numunelerin dayanım değerlerinin, optimum su içeriğinde hazırlanan numunelere kıyasla azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, fazla suyun zeminin iç yapısında fazladan boşluklar oluşturarak partiküller arası bağları zayıflatmasından kaynaklanmaktadır. Ancak katkı maddesi oranının ve kürlenme süresinin artışı, dayanım üzerinde olumlu etkiler yaratmış; özellikle 14 günlük kür sonrası %1 NK katkılı numune 407,22 kPa ile bu grup içinde en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır.
- Buna karşılık, optimum su içeriğinin altında ($w = \%13$) hazırlanan numunelerde ise daha belirgin bir dayanım artışı gözlemlenmiştir. Katkı maddelerinin (mineral katkılar, nanomalzemeler ve lifler) oranındaki artış, düşük su içerikli zemin numunelerinde UCS değerlerinde anlamlı iyileşmeler sağlamıştır. Bu artış, partiküller arası daha yoğun bir kümelenme, daha yüksek iç sürtünme ve azalan gözenek suyu basıncı gibi faktörlerle açıklanabilir.
- Kürlenme süresi ilerledikçe UCS değerlerinin de düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, katkı maddeleriyle birlikte yürüten kimyasal reaksiyonların zamanla daha etkin hale gelerek zemin matrisini güçlendirmesiyle ilişkilidir. Bu kapsamda, optimum su içeriğinin altında ($w = \%13$) ve %10 silis dumanı (SD) katkısıyla hazırlanan numune, 14 günlük kür sonunda 1659,70 kPa değerine ulaşarak tüm örnekler içinde en yüksek dayanımı göstermiştir. Bu sonuç, su içeriği, katkı oranı ve kürlenme süresinin birlikte

değerlendirilmesinin zemin stabilizasyonunda kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

- En iyi dayanım sonucunu veren katkı malzemeleriyle hazırlanan karışımların UCS değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu doğrultuda %20 SD, %1 NS, %2 CE ve %20 SD, %1 NK, %2 CE içerikli zemin numunelerinin dayanımlarında sırasıyla %87,15 ve %63,83'lük artış görülmüştür.
- Genel olarak, SEM görüntüleri, en etkili katkı maddeleriyle elde edilen iyileştirilmiş mikro yapı ve azalan gözenekliliği görsel olarak doğrulayarak Grey ilişki analizini desteklemektedir. Bu sonuçlar, maksimum dayanım artışı sağlamak için kür süresi, silis dumanı miktarı ve nanomalzemelerin optimize edilmesinin önemini vurgularken; çekme dayanımını ve çatlak direncini artırmak amacıyla lif kullanımının gerekliliğine dikkat çekmektedir.
- Grey ilişki analizi sonuçlarına göre, tek eksenli basınç dayanımı üzerinde en etkili parametre kür süresi olmuştur. Silis dumanı ve uçucu kül, puzolanik reaksiyonlarla dayanımı artırırken; cam ve bazalt lifleri mikro çatlakları engelleyerek yapısal bütünlüğü güçlendirmiştir. Nanokil, boşlukları doldurarak dayanımı iyileştirmiş; nano silikanın etkisi ise katkı oranı ve dağılımının yeterince optimize edilmemesi nedeniyle sınırlı kalmıştır. Su içeriği ise fazla olduğunda dayanımı düşürdüğü için en az etkili parametre olmuştur. Bu sonuçlar, katkı türü ve oranlarının kür süresiyle birlikte dikkatle seçilmesinin, kil zeminlerin mekanik özelliklerini geliştirmede belirleyici olduğunu göstermektedir.

ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında farklı oranlarda silis dumanı, uçucu kül, nano-SiO₂, nanokil, bazalt lif ve cam lif kullanılarak farklı kürlenme süresinde, farklı su içeriklerinde hazırlanan kil zemin numunelerinin dayanımları incelenmiş ve karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Yapılan çalışmanın sonuçlarına dayanarak killi zemin türlerini stabilize etmede silis dumanı, nano-SiO₂ ve cam lifinin bir arada kullanılması önerilmektedir.

Mineral katkı maddesi olarak silis dumanı katkılı zemin numunelerinin dayanımları göz önüne alındığında, zemini stabilize etmede farklı oranlarda silis dumanının kullanılabileceği önerilmektedir. Özellikle %20 SD içerikli killi zeminde önemli iyileşmelerin görülmesi beklenmektedir.

Zemini iyileştirmede nanomalzeme katkı maddesi olarak nano-SiO₂ ilaveli zemin numunelerinin kullanılması önerilmektedir. Kürlenme süresinin artmasıyla işlenmiş killi zemin örneklerinin daha iyi dayanım sonucu verebileceği beklenmektedir.

Bu çalışmanın bulgularına dayanarak, SD, cam lifi ve nanoparçacıkların birlikte kullanıldığı kil zeminlerin stabilizasyonuna yönelik etkilerinin daha kapsamlı değerlendirilebilmesi amacıyla, farklı geoteknik problemlere yönelik konsolidasyonlu-drenajlı (CD) ve konsolidasyonlu-drenajsız (CU) üç eksenli test koşulları altında ilave deneysel çalışmaların yürütülmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, N., Farjad, A., & Sepehri, S. (2018). The Use of Nanoclay Particles for Stabilization of Dispersive Clayey Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 327–335.
- Ahmadi, S., Ghasemzadeh, H., & Changizi, F. (2021). Effects of thermal cycles on microstructural and functional properties of nano treated clayey soil. *Engineering Geology*, 280.
- Aishwarya, R., & Rachel, P. (2023). Comparative study on optimum moisture content and maximum dry density of sandy clay soil with basalt reinforced sandy clay soil. *Materials Today: Proceedings*, 77, 557–562.
- Aksoy, H. S. (2010). Silis Dumanının Killi Bir Zemin Üzerindeki Stabilizasyon Etkisi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 74–78.
- Aksu, G., & Eskisar, T. (2023). The geomechanical properties of soils treated with nanosilica particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15, 954–969.
- Al-Khalili, A. M., Ali, A. S., & Al-Taie, A. J. (2021). Effect of metakaolin and silica fume on the engineering properties of expansive soil. *2nd International Conference for Civil Engineering Science*.
- Al Khazaleh, M., Karumanchi, M., Bellum, R. R., & Subramani, A. K. (2024). Experimental Assessment of Geotechnical Properties of Nano-Clay-Stabilized Soils: Advanced Sustainable Geotechnical Solution. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(8).
- Ali, A., Mir, B. A., Gul, N., & Malik, F. Z. (2022). Strength and Microstructural Behavior of Soft Soil Treated with Zeolite Nanoparticles. *Transportation Infrastructure Geotechnology*.
- Angin, Z. (1993). *Estimating Structural Design Parameters for Slab-on-Grade Supported Residential and Light Commercial Structures from Fundamental Soil Moisture Changes*. Texas Tech University.
- Arabani, M., & Haghsheno, H. (2020). The effect of water content on shear and compressive behavior of polymeric fiber-reinforced clay. *SN Applied Sciences*, 2, 1759.
- Arabani, M., Shalchian, M. M., & Majd Rahimabadi, M. (2023). The influence of rice fiber and nanoclay on mechanical properties and mechanisms of clayey soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 407.
- Arslan, E., Ekinci, E., Garip, Z., Küçük, F., & Sert, S. (2024). A sustainable solution for soil improvement: a decision tree model combined with metaheuristic optimizations for fiber reinforced clays. *Environment, Development and Sustainability*.
- Arya, P., Patel, S. B., Bharti, G., Shukla, B. K., & Hurukadli, P. (2023). Impact of using a blend of bagasse ash and polyester fiber in black cotton soil for improvement of mechanical and geotechnical properties of soil. *Materials Today: Proceedings*, 78, 738–743.
- ASTM D2166. (2006). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D2216-19. (2019). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. In *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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.
- 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.
- ASTM D6913/D6913M-17. (2017). Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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.
- ASTM D7928-16e1. (2017). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. In *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854-02. (2017). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Banu, S. A., & Attom, M. F. (2023). Effect of curing time on lime-stabilized sandy soil against internal erosion. *Geosciences*, 13(102).
- Bazarbekova, A., Naik, S. R., Kim, Y.-R., Little, D., Jung, J. S., & Park, Y. B. (2024). One-part alkali-activated soil stabilization with sodium metasilicate: Mechanical-geochemical-mineralogical characterization. *Transportation Geotechnics*, 44, 101163.
- Blayi, R. A., Sherwani, A. F. H., Hashim, H., Faraj, R. H., & Daraei, A. (2020). Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder. *Case Studies in Construction Materials*, 13.
- Borhan, T. M. (2012). Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials and Design*, 42, 265–271.
- Changizi, F., & Haddad, A. (2016). Effect of Nano-SiO₂ on the Geotechnical Properties of Cohesive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34, 725–733.
- Craig, R. F. (1974). *Craig's Soil Mechanics*.
- Cui, J., Dang, Y., & Liu, S. (2009). Study on novel property of some grey relational analysis models. *Journal of Grey System*, 12(2), 83–88.
- Das, B. M. (1995). Principles of Foundation Engineering. In *Geotechnics for Developing Africa*.
- Dehghanian, K. (2021). Killi zeminlerin özelliklerinin uçucu kül kullanarak iyileştirilmesi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 66–72.
- Demirel, S., & Öz, H. Ö. (2017). Atık Malzemelerin Kendiliğinden Yerleşen Beton Performansına Etkisi. *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 40–48.
- Diambra, A., Ibraim, E., Muir Wood, D., & Russell, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 238–250.
- Erenson, C. (2015). *Atık Lastiklerin Taş/Kum Kolon Uygulamalarında Kullanılmasının Deneyisel Olarak İncelenmesi*. Aksaray Üniversitesi.
- Farshadi, A., Mehrnahad, H., & Abdoli, M. (2023). Effects of glass fibers and nanoclay on the strength parameters of aeolian sand: an experimental study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(278), 1–14.
- Fiore, V., Scalici, T., Bella, G. Di, & Valenza, A. (2015). A review on basalt fibre and its composites. *Composites Part B*, 74, 74–94.
- Gelsefidi, S., Alireza, S., Mohammed, M. S., & Hasan, B. M. (2013). Application of Nanomaterial to Stabilize A Weak Soil. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*.

- Ghasabkolaie, N., Choobbasti, A. J., & Roshan, N. (2017). Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17, 639–650.
- Gürocak, Z., & Aslan Topçuoğlu, Y. (2023). Bazalt fiber kullanımının düşük plastisiteli kilin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 688–701.
- Hanus, M. J., & Harris, A. T. (2013). Nanotechnology innovations for the construction industry. *Progress in Materials Science*, 58, 1056–1102.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2015). *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*.
- Kannan, G., & Sujatha, E. R. (2023). Effect of Nano Additive on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Soil. *Journal of Natural Fibers*, 20(1).
- Krishnan, J., & Shukla, S. (2019). The behaviour of soil stabilised with nanoparticles: an extensive review of the present status and its applications. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(436).
- Kulanthaiivel, P., Selvakumar, S., Soundara, B., Kayalvizhi, V. S., & Bhuvaneshwari, S. (2021). Combined effect of nano-silica and randomly distributed fibers on the strength behavior of clay soil. *Nanotechnology for Environmental Engineering*.
- Kumar, A., Walia, B. S., & Bajaj, A. (2007). Influence of fly ash, lime, and polyester fibers on compaction and strength properties of expansive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(3), 242–248.
- Kumar Patel, S. (2022). Experimental Investigation of Glass Fiber Reinforced Clayey Soil for Its Possible Application as Pavement Subgrade Material. *New Approaches in Foundation Engineering*.
- Li, L., Xuan, D., Chu, S. H., & Poon, C. S. (2021). Modification of recycled aggregate by spraying colloidal nano silica and silica fume. *Materials and Structures*, 54, 1–15.
- Majeed, Z. H., Taha, M. R., & Jawad, I. T. (2014). Stabilization of Soft Soil Using Nanomaterials. *Research Ournal of Applied Sciences, Engineeringg and Technology*, 8(4), 503–509.
- Mirzababaei, M., Miraftab, M., Mohamed, M., & McMahon, P. (2013). Unconfined compression strength of reinforced clays with carpet waste fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, 139(3), 483–493.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*.
- Mohammadi, M., Rajabi, A. M., & Khodaparast, M. (2022). Experimental and Numerical Evaluation of the Effect of Nano Calcium Carbonate on Geotechnical Properties of Clayey Sand Soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 35–46.
- Naseem, A., Mumtaz, W., Fazal-e-Jalal, & Backer, H. D. (2019). Stabilization of expansive soil using tire rubber powder and cement kiln dust. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56(1), 54–58.
- Niroumand, H., Zain, M. F. ., & Naghavi, S. (2013). The Influence of Nano-Clays on Compressive Strength of Earth Bricks as Sustainable Materials. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 89, 862–865.
- Noolu, V., Bingi, N., & Chavali, R. V. P. (2024). Assessing the synergistic effects of GGBS and glass fiber on expansive soil behavior using response surface methodology. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(32).
- Ohadian, A., Khayat, N., Mokhberi, M., & Horpibulsuk, S. (2024). Soft Clay Modified with Municipal Solid Waste and Stabilized with Nano-MgO for Pavement Subgrade and Embankment Fill Applications. *Transportation Geotechnics*, 46, 101261.

- Özdemir, D., Mecit, H. D., Seventekin, N., & Öktem, T. (2006). Cam lifleri. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 1, 281–287.
- Pivnenko, K., Eriksen, M. K., Martin-Fernandez, J. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2016). Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, 54, 44–52.
- Şahbaz, İ., & Ünsever, Y. S. (2020). Çimento ve polipropilen lif kullanarak düşük plastisiteli kil zeminlerin iyileştirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(3), 1409–1420.
- Salimi, M., Payan, M., Hosseinpour, I., Arabani, M., & Ranjbar, P. Z. (2024). Impact of clay nano-material and glass fiber on the efficacy of traditional soil stabilization technique. *Materials Letters*, 360.
- Saran, O., & Demiröz, A. (2022). Zemin Stabilizasyonunda Bazalt Fiber ve Uçucu Kül Kullanımının Araştırılması. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 495–511.
- Schübeler, P. (1996). Conceptual Framework for Municipal Solid Waste Management in Low-Income Countries. *Waste Management and Research*.
- Sharma, T., & Singh, S. (2023). Influence of nanosilica on properties of soil. *Materials Today: Proceedings*.
- Soğancı, A. S., Yenginar, Y., & Orman, A. (2022). Geotechnical Properties of Clayey Soils Stabilized with Marble Dust and Granulated Blast Furnace Slag. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., & Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcomings, and Solutions. *ACI Materials Journal*, 118, 157–167.
- Tao, G., Guo, E., Yuan, J., Chen, Q., & Nimbalkar, S. (2023). Permeability and Cracking of Compacted Clay Liner Improved by Nano-SiO₂ and Sisal Fiber. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(12), 5109–5122.
- Taşçı, G. (2011). *Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi*.
- Teizer, J., Venugopal, M., Teizer, W., & Felkl, J. (2012). Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap between Researchers and Industry Professionals. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138, 594–604.
- Tohumcu, İ., & Bingöl, A. F. (2013). Fresh Concrete Properties and Compressive Strength of Self Compacting Concretes With Silica Fume and Fly Ash. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 31–44.
- Tomar, A., Sharma, T., & Singh, S. (2020). Strength properties and durability of clay soil treated with mixture of nano silica and Polypropylene fiber. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3449–3457.
- Totiç, E., Göktepe, F., & Yaşar, M. (2019). Uçucu kül katkısının killi zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 769–778.
- Tran, T. Q., Ju, H., Nguyen, T.-N., Hoang, T. P., Abdelaziz, S. L., & Brand, A. S. (2023). Effects of curing temperature on cement-stabilized soils. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1289(1), 012097.
- Türköz, M., Savaş, H., & Tasci, G. (2018). The effect of silica fume and lime on geotechnical properties of a clay soil showing both swelling and dispersive features. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(735).
- Türköz, M., Umu, S. U., & Öztürk, O. (2021). Effect of silica fume as a waste material for

- sustainable environment on the stabilization and dynamic behavior of dispersive soil. *Sustainability*, 13(8).
- Uysal, F., & Yılmaz, V. (2021). Nano parçacık silisyum dioksit (SiO₂) ile yüksek fırın cürufu karışımının kompaksiyon özelliklerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 307–311.
- Varaprasad, B. J. S., Joga, J. R., & Joga, S. R. (2021). Exploratory study on argo-industrial wastes for improving geotechnical properties of expansive soil – As sustainable material. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6665–6673.
- Waleed, M., Alshawmar, F., Abu-Bakr Jamil, M., & Jafri, T. H. (2024). Assessing the stabilization impact of silica fume and phosphogypsum on hydro-mechanical characteristics of clayey sand. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(301).
- Yazici, M. F., & Keskin, S. N. (2023). Enhancing Mechanical Properties of Low Plasticity Clay Soil Using Hemp Fibers: Effects of Fiber Content and Fiber Surface Coating. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*.
- Yazici, M. F., & Keskin, S. N. (2024). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and Development of Predictive Models: Effects of Fiber Length and Fiber Content. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 13593–13611.
- Yong, R. N., & B.P., W. (1975). *Soil Properties and Behaviour*.
- Zafar, T., Ansari, M. A., & Husain, A. (2024). Soil stabilization by reinforcing natural and synthetic fibers – A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*.

ÖZGEÇMİŞ

Nagihan DOĞAN

KİŞİSEL BİLGİLER

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

Öğrenci Orcid ID : 0009-0004-3825-2358
Danışman Orcid ID : 0000-0002-5391-5859

EĞİTİM BİLGİLERİ

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

✓ AUTOCAD, IDECAD, MICROSOFT OFFICE

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

- Doğan N., Fırat M. E. (2024). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Cam Elyaf Kullanılarak İyileştirilen Kilin Mühendislik Performansının Değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(4): 784-798.

Bildiriler:

- Doğan N., Fırat M. E. (2023). Farklı Su İçeriklerinde Nano-SiO₂ Katkılı Killerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. 12. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi

Projeler:

- Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) destekli TEKF.23.52 protokol numaralı proje