LAPONİT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KUM BİR ZEMİNİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Gökçe ERKMEN

Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Semet ÇELİK
2023
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

LAPONİT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KUM BİR ZEMİNİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Investıgation Of Strength And Freeze-Thaw Properties Of A Sand Soil Stabilized With Laponite)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gökçe ERKMEN

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Erzurum

Nisan, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Gökçe ERKMEN tarafından hazırlanan "Laponit İle Stabilize Edilmiş Kum Bir Zeminin Mukavemet Ve Donma-Çözülme Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı çalışması ../.. /2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Nanobilim Ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı , Nanobilim Ve Nanomühendislik Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Semet ÇELİK *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Semet ÇELİK *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	*Dr.Öğr.Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK* *Atatürk Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	*Dr.Öğr.Üyesi Harun AKOĞUZ* *Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi*	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve …… sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Semet ÇELİK danışmanlığında sunulan "Laponit İle Stabilize Edilmiş Kum Bir Zeminin Mukavemet ve Donma-Çözülme Özelliklerinin Araştırılması " başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	*17*	**30**
Kuramsal Temeller	*29*	**30**
Materyal ve Yöntem	*6*	**35**
Sonuçlar ve Öneriler	*1*	**20**
Araştırma Bulguları ve Tartışma	*0*	**20**
Tezin Geneli	*14*	**25**

Not: *Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının* ***%5'den*** *büyük olmaması gerekir.*

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Gökçe ERKMEN	Doç. Dr. Semet ÇELİK
26.4.2023	**26.4.2023**
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

***** Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☒ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve ……. sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun …./…/…. tarih ve ……. sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bana her türlü imkânı sağlayan ve destek olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Semet Çelik'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince desteklerinden dolayı Sayın Dr.Öğr. Üyesi Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresi boyunca, Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı, Zemin Mekaniği laboratuvarındaki görevlilere teşekkürlerimi sunarım. Deneylerimizde kullandığımız laponit malzemesinin temininde desteklerini sunan KENT KİMYA firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Bana bu başarı yolunda ilk adımı atmam noktasında hep destekçim olan Rahmetli babam Sayın Hüseyin BEZDİM'e ve annem Sayın Nurhan BEZDİM'e teşekkürü bir borç bilirim.

Maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve koşulsuz desteğinden ötürü sevgili eşim Sayın Murat Emre ERKMEN 'e ve hayatı güzel kılan çocuklarım Sayın Göktuğ Emir ERKMEN'e ve Sayın Göksu Ece ERKMEN'e şükranlarımı sunarım.

Gökçe ERKMEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LAPONİT İLE STABİLİZE EDİLMİŞ KUM BİR ZEMİNİN MUKAVEMET VE DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Gökçe ERKMEN

Danışman: Doç. Dr. Semet ÇELİK

Amaç: Sanayileşme ve şehirleşmenin büyümesiyle birlikte, zemin ve yapısal güçlendirme ve çevresel sürdürülebilirlik, geleneksel zemin iyileştirme yöntemlerinin şu anda karşı karşıya olduğu başlıca zorluklardandır. Geleneksel iyileştirme yöntemleri sınırlamalara sahiptir ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Nanoteknolojinin ve çok disiplinli uygulamaların hızla gelişmesiyle birlikte, nanomalzemeler zeminin iyileştirilmesinde kullanılmaya başlanılmıştır. Bu çalışmada, Polivinil asetat ve bir nanomalzeme olan laponit kullanılarak kötü derecelenmiş bir kum zeminin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu tez çalışmasında kötü derecelenmiş bir kum zemin (SP) kullanılmıştır. Zemin iyileştirme deneylerine başlamadan önce kum zeminin özgül ağırlığı, minimum boşluk oranı, maksimum boşluk oranı ve tane çapı dağılım eğrisi elde edilmiştir. Daha sonra, %10, %20 ve %30 oranlarında polivinil asetat (PVAc) ve %0,5, %1, %2 ve %3 oranlarında laponit kullanılarak %50 rölatif sıkılıktaki kum zemin iyileştirilmiştir. 7 ve 14 gün kür edilmiş numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmıştır. Ayrıca, 14 gün kür edilmiş numuneler 10 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmış numuneler ağırlık kayıpları ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

Bulgular: PVAc ve PVCa+Laponit katkılı numunelerde en yüksek serbest basınç mukavemeti 14 gün kür edilmiş %20 PVAc ve %3 laponit katkılı numuneden 1573,7 kPa olarak elde edilmiştir. 14 gün kür edilmiş ve 10 çevrim donma-çözülmeye maruz bırakılmış numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en az düşüş yine aynı %20 PVCa ve %3 laponit yüzdesinde yaklaşık %11 olarak elde edilmiştir. 14 gün kür edilmiş, PVAc ve PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kayıpları belirlenmiş ve genel olarak sabit PVCa yüzdesinde laponit yüzdesi arttıkça ağırlık kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.

Sonuç: Dr=%50 rölatif sıkılıkta hazırlanmış kötü derecelenmiş bir kum zeminde üzerinde yapılan iyileştirme deneyleri sonucunda, polivinil asetat yüzdesinin serbest basınç mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir. Sabit polivinil asetat yüzdesinde laponit yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca, sabit polivinil asetat yüzdesinde laponit yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetindeki düşüşün azaldığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, %20 polivinil asetat ve %3 laponit kullanılarak yapılan iyileştirmenin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Laponit, Polivinil Asetat, Donma-Çözülme, Serbest Basınç Mukavemeti

Nisan 2023, 73 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF STRENGTH AND FREEZE-THAW PROPERTIES OF A SAND SOIL STABILIZED WITH LAPONITE

Gökçe ERKMEN

Danışman: Assoc. Prof. Dr. Semet ÇELİK

Purpose: With the growth of industrialization and urbanization, ground and structural reinforcement and environmental sustainability represent major challenges that traditional soil improvement methods are currently facing. Traditional materials methods have limitation and cause environmental pollution. With the rapid development of nanotechnology and multidisciplinary applications, nanomaterials have started to be used in soil improvement. In this study, it was aimed to improve a poorly graded sand soil by using polyvinyl acetate and a nanomaterial, laponite.

Method: In this thesis, a poorly graded sand soil (SP) was used. Before starting the soil improvement experiments, the specific gravity, minimum void ratio, maximum void ratio and grain diameter distribution curve of the sand soil were obtained. Then, 50% relative density sand soil was improved by using 10%, 20% and 30% polyvinyl acetate (PVAc) and 0,5%, 1%, 2% and 3% laponite. The unconfined compression test was performed on samples cured for 7 and 14 days. In addition, the weight losses and unconfined compressive strengths of the samples cured for 14 days and exposed to 10 freeze-thaw cycles were determined.

Finding: The highest unconfined compressive strength of the PVAc and PVCa+Laponite added samples was obtained as 1573.7 kPa in the 14 days cured samples with 20% PVAc and 3% laponite added. When the unconfined compressive strengths of the samples cured for 14 days and exposed to 10 cycles of freeze-thaw before and after the freeze-thaw cycle were compared, the least decrease in percentage was obtained as approximately 11% at the same 20% PVCa and 3% laponite percentage. After the freeze-thaw cycle, the weight losses of the PVAc and PVAc+ laponite added samples, which were cured for 14 days, were obtained and it was determined that the weight losses decreased as the laponite percentage increased in the constant PVCa percentage.

Results: As a result of the improvement experiments on a poorly graded sand soil prepared with a relative density of Dr=50%, it was determined that the percentage of polyvinyl acetate increased the unconfined compressive strength. It was observed that as the percentage of laponite increased in the constant polyvinyl acetate percentage, the unconfined compressive strength also increased. In addition, it was concluded that the decrease in unconfined compressive strength decreased as the percentage of laponite increased in the constant polyvinyl acetate percentage. As a result, it was determined that the improvement using 20% polyvinyl acetate and 3% laponite gave the best results.

Keywords: Laponite, Polyvinyl Acetate, Unconfined Compressive Strength, freezing-thawing

April 2023, 73 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
İÇİNDEKİLER vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xi
GİRİŞ 1
Amaç ve Kapsam 4
KURAMSAL TEMELLER 5
Kum 5
Laponit 8
Polivinil Asetat 13
Zeminlerin İyileştirilmesi ve Uygulanan Teknikler 14
İri taneli zeminlerin katkı malzemesiz iyileştirilmesi 18
Diğer metodlar 19
Zeminlerin İyileştirmesinde Kullanılan Nanomalzemeler 19
Kolloidal silika 19
Bentonit 20
Karbon nanotüp 21
Zeminlerde Donma-Çözülme Olayı 23
Literatür Özetleri 24
MATERYAL ve YÖNTEM 28
Materyal 28
Deneylerde kullanılan kumun özellikleri 28
[a]ASTM D2487, [b]ASTM D854, [c]ASTM D2216 30
Deneylerde Kullanılan Laponitin Özellikleri 30
Deneylerde Kullanılan Polivinil Asetat (PVAc) 31

Deneylerde kullanılan polivinil asetatın özellikleri Tablo5'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan Polivinil Asetat Şekil 17'de gösterilmiştir. 31
Yöntem 32
Serbest basınç deneyi 34
Donma-çözülme deneyi 36
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 38
Serbest Basınç Deneyi Sonuçları 38
Polivinil asetat katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri 38
Polivinil asetat ve laponit katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri 40
Donma-Çözülme Deney Sonuçları 45
%10 PVAc katkılı ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme deney sonuçları 45
%15 PVAc katkılı ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme deney sonuçları 48
%20 PVAc katkılı ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme deney sonuçları 50
%10 PAVc ,%15 PAVc ve %20 PVAc ve laponit katılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi 52
SONUÇLAR ve ÖNERİLER 54
KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ 60

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. Zeminlerin Karakteristik Özgül Ağırlıkları (Önalp, 2002). 7
Tablo 2. Zemin İyileştirme Metotlarının Sınıflandırılması (Chu et al., 2009) 15
Tablo 3. Deneylerde Kullanılan Kum Zemine Ait İndeks Özellikleri 30
Tablo 4. Deneylerde Kullanılan Laponit-Rd'nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri 31
Tablo 5. Deneylerde Kullanılan Polivinil Asetatın Özellikleri 31
Tablo 6. Deney Programı 33
Tablo 7. Polivinil Asetat Katkılı Numunelerin UCS değerleri 38
Tablo 8. Laponit ve Polivinil Asetat Katkılı Numunelerin UCS değerleri 40
Tablo 10. %10 PVAc ve %10 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri 46
Tablo 11. %15 PVAc ve %15 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin 10 Donma-Çözülme Çevrimi Sonucu Oluşan Ağırlık Kayıpları 48
Tablo 12. %15 PVAc Katkılı ve %15 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri 49
Tablo 13. %20 PVAc ve %20 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin 10 Donma-Çözülme Çevrimi Sonucu Oluşan Ağırlık Kayıpları 50
Tablo 14. %20 PVAc ve %20 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri 51
Tablo 15. %10 PAVc, %15PAVc ve %20 PAVc ve Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri 52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kuvarsın (α ve β) kimyasal yapısı 6
Şekil 2. Zemin sınıflandırma sistemlerinin tane boyut aralıkları 7
Şekil 3. Laponitin nanokristal geometrisinin şematik gösterimi(disk şekli) ve kimyasal yapısı 9
Şekil 4. (a) Laponit parçacıkları, (b) Sol halde laponit dispersiyonu, (c) Jel halinde laponit dispersiyonu, (d) Kum-laponit numunesi 9
Şekil 5. Laponitin mikro yapısı 10
Şekil 6. Laponit kristalleri su ile etkileşime girerek jel oluşumu meydana getirmesi 10
Şekil 7. Farklı kürlenme sürelerine sahip laponit uygulanmış numuneler için CSR ile sıvılaşmaya kadar olan döngü sayısı arasındaki ilişki 11
Şekil 8. Deneylerde kullanılan Laponitin parçacıklı hali ve jel hali 12
Şekil 9. Polivinil asetatın kimyasal yapısı 13
Şekil 10. Deneylerde kullanılan Polivinil Asetat 13
Şekil 11. Kolloidal-silika uygulanmış zeminin UCS'si ile kür süresi arasındaki ilişki 20
Şekil 12. Boru şeklindeki olan CNT materyali 22
Şekil 13. Deneylerde kullanılan kum 28
Şekil 14. Kum zeminin etüvde kurutulması 29
Şekil 15. Deneylerde kullanılan kum zemininin tane çapı dağılım eğrisi 29
Şekil 16. Deneylerde kullanılan Laponit-Rd 30
Şekil 17. Deneylerde kullanılan Polivinil Asetat 32
Şekil 20. Hazırlanan deney numuneleri 34
Şekil 21. Serbest basınç deneyinde gerilmeler, gerilme izi ve Mohr dairesi 35
Şekil 22. (a)Serbest basınç deney aleti, (b)Yükleme yapılmadan önce, (c)Yükleme yapıldıktan sonra 35
Şekil 23. (a)Donma-çözülme cihazı, (b)cihaza konulmak üzere hazırlanan numuneler ve (c) cihaza konulan numuneler 36
Şekil 24. PVAc katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki UCS değerlerinin PVAc yüzdesine bağlı olarak değişimi 39
Şekil 25. %10 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki UCS değerlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişim 41

Şekil 26. %15 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki UCS değerlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi 42
Şekil 27. %20 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. UCS değerlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi 43
Şekil 30. %10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 donma-çözülme çevrimi sonu oluşan ağırlık kayıpları 46
Şekil 31. %10 PVAc ve %10 PVAc+ Laponit katkılı numunelerin 14.gün donma-çözülme öncesi ve sonrası UCS değerleri 47
Şekil 32. %15 PVAc katkılı ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 donma-çözülme çevrimi sonu oluşan ağırlık kayıpları 48
Şekil 33. %15 PVAc ve %15 PVAc+ Laponit katkılı numunelerin 14.gün donma-çözülme öncesi ve sonrası UCS değerleri 49
Şekil 34. %20 PVAc ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 donma-çözülme çevrimi sonu oluşan ağırlık kayıpları 50
Şekil 35. %20 PVAc ve %20 PVAc+ Laponit katkılı numunelerin 14.gün donma-çözülme öncesi ve sonrası UCS değerleri 51
Şekil 36. PVAc ve PVAc+Laponit katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve donma-çözülme sonrası UCS değerleri (14.gün) 53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ASTM	: Amerikan Malzeme ve Test Derneği
Cc	: Derecelenme Katsayısı
CS	: Kolloidal silika
Cu	: Üniformluluk Katsayısı
D_{10}	: Zeminin Efektif Dane Çapı
D_{30}	: Granülometri Eğrisinde %30 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
D_{60}	: Granülometri Eğrisinde %60 geçen yüzdesine karşılık gelen çap
Gs	: Özgül ağırlık
nm	: Nanometre
UCS	: Serbest Basınç Mukavemeti
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
w	: Su muhtevası
w_n	: Doğal su muhtevası
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
γ_{kmaks}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
γ_{kmin}	: Minimum kuru birim hacim ağırlık
γn	: Doğal birim hacim ağırlık
γs	: Dane birim hacim ağırlığı

GİRİŞ

Doğal zeminler her zaman inşaat mühendisliğinin gerekliliklerini karşılayacak kadar güçlü mekanik özelliklere sahip değildir. Bu durumda, zemin iyileştirme tekniği gereklidir. Geniş anlamda, zemin iyileştirmesi esas olarak kesme mukavemeti ve rijitliğin arttırılması, oturma ve yanal deformasyonun azaltılması, hidrolik iletkenliğin ayarlanması ve zemin sıvılaşması riskinin azaltılması anlamına gelir (Liu et al., 2020).

Zeminler iri taneler, su ve hava dolu boşluklardan meydana gelir. Ayrıca içerisinde organik maddelerde bulunabilir. Kum, parçalanmış kaya ve mineral taneciklerden oluşan bir malzemedir.

Zemin iyileştirme, zemine uygulanacak mühendislik uygulamasına göre belirli özelliklerinin fiziksel, kimyasal ve biyolojik uygulamalarla stabilize edilmesi olarak tanımlanabilir. Zemin iyileştirme, yerine zemin ıslahı, modifikasyonu ve stabilizasyonu gibi çeşitli terimlerde eş anlamlı olarak kullanılabilir.

Bir zemin veya saha, gerekli minimum mühendislik özelliklerine sahip değilse ve/veya tasarım gereklilikleri için yetersiz performans sağladığı değerlendirilmişse ”zayıf” olarak değerlendirilebilir. Bir zemin minimum gereksinimlere yakınsa “marjinal” olarak kabul edilebilir. ”Kötü” veya yetersiz zemin ve/veya saha koşulları geçerli olduğunda, durum için mevcut alternatifleri göz önünde bulundurmak gerekir. Bu alternatifler şunları içerebilir:

- Projeden vazgeçilmesi
- Mevcut “zayıf” zemin değiştirilmesi
- Projenin veya tasarımın (genellikle yapısal elamanlar dahil)zemin ve saha koşullarına uyacak şekilde yeniden tasarlanması
- Mevcut zemin iyileştirme teknikleri kullanarak zeminin özelliklerinin ve /veya davranışlarının iyileştirilmesi (Nicholson, 2014).

Zayıf zeminler, özellikle sanayi sektöründeki artış ve hızla çoğalan nüfus artışı nedeniyle günümüzde mühendisler için problem teşkil etmektedir. İnşaat kullanım alanlarının azalmasıyla, taşıma gücü, oturma vb. açısından zayıf zeminlerin bulunduğu alanların değerlendirilmesi elzem bir hal almıştır.

Geçmişten günümüze çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Geçmişte derin ıslah yöntemleri çok popülerken, katkı maddeleri ile zemin ıslahı ekonomik olması nedeniyle modern dünyada araştırılan önemli bir konu başlığı olmuştur.

Katkı malzemeleri kullanılarak zeminlerin iyileştirilmesinde çok ilerleme sağlanmıştır. Sorunlu zeminleri sadece şişen ve çöken zeminler olarak düşünmek doğru değildir. Aynı zamanda değişkenlik gösteren iklim şartlarına maruz kalan zayıf zeminleri ıslah etmek için kullanılacak olan katkı maddelerinin etkileri test edilmektedir.

Zeminin iyileştirilmesinin amacı esasen zayıf zeminin özelliklerini değiştirmek ve/veya bir projenin davranışını ve performansını iyileştirmektir. Genellikle iyileştirme için hedeflenen özellikler arasında:

- Oturmayı önlemek için sıkışabilirliği azaltmak,
- Mukavemet, taşıma kapasitesini artırmak,
- Yeraltı suyu akışını kısıtlamak için geçirimliliği azaltmak,
- Drenaja izin vermek için geçirimliliği artırmak,
- Depreme bağlı sıvılaşma potansiyelini azaltmak sayılabilir.

Nanoteknoloji, nanometre boyutunda parçacıklar yapmaya ve daha sonra bu nanometre boyutundaki parçacık veya nano parçacıkları yeni uygulamalarda kullanmaya odaklanan bilim dalıdır. Nanoteknolojinin hızlı büyümesi nedeniyle, bilim ve mühendislik alanından birçok araştırmacı, bu alandaki araştırmaları genişletmek için yoğun ilgi göstermektedir.

Zemin, ekolojik ve ekolojik olmayan işlevler için kullanılan karmaşık bir malzeme olup, zemine az miktarda nanopartikül eklenmesi, zemin özelliklerinde olağanüstü bir iyileşme sağlaya bilir (Krishnan & Shukla, 2019). İstenmeyen zemin davranışlarını ortadan kaldırmanın ve zemin özelliklerini iyileştirmenin en dikkate değer yöntemleri arasında güçlendirme, katkı maddeleri ile stabilizasyon, sıkıştırma, drenaj ve yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesi sayılabilir (Ghasabkolaei et al., 2016). Zemine kimyasalların, liflerin, jeotekstillerin, nanopartiküllerin eklenmesi, fiziksel veya yapısal özelliklerini değiştirerek zeminin özelliklerini iyileştirir.

Nanomalzeme, atomlar, moleküller ve makroskopik malzemeler arasında en az bir uzaysal boyutu 100 nm'yi aşmayan yeni bir malzeme seviyesidir ve kullanım alanı oldukça geniştir (Ghasabkolaei et al., 2016). Nanomalzeme, nanoteknoloji kaynaklı olup, nano ölçekli (10^{-9}m) parçacık boyutuna sahip ultra ince malzemeleri ifade etmektedir. Nanomateryal çok geniş bir spesifik yüzey alanına ve yüksek yüzey aktivitesine sahiplerdir.

Geleneksel malzemelerden farklı birçok benzersiz mühendislik özelliği ile istenilen amaçlara ulaşılabilir (Küçükyıldırım & Eker, 2012).

Malzemelerin çok daha nitelikli olması adına nanoteknoloji alanındaki çalışmalar oldukça önem taşımaktadır.

Bilim ve teknolojinin sürekli ilerleme göstermesiyle birlikte araştırmacılar, geoteknik malzemeleri daha etkili ve ekonomik hale getirmek için nano ölçekli malzemeler uygulanmaya yöneldiler. Nanoparçacıkların boyutu, sıcaklık, büyüme süresi ve katkı maddeleri dahil olmak üzere reaksiyon koşulları tarafından değişiklik gösterir. Zemin iyileştirilmesinde uygulanan dört tipik nanomalzeme vardır: karbon nanotüp, kolloidal silika, bentonit ve laponit (Huang & Wang, 2016a).

Laponit, bentonitten neredeyse 10 kat daha küçük, 1 nm kalınlığında ve 25 nm çapında, sentetik katmanlı bir silikat nanoparçacıktır. Laponit, iki tetrahedral ve bir oktahedral katmandan oluşan katmanlı yapılara sahip sentetik bir silikat nanoparçacık tabakasından oluşur. Toksik etkisi olmayan laponit zeminin dayanıklılığını artırmak için eklendiği zaman, zemini kirletmezler ve çevre dostudurlar (Huang & Wang, 2016a).

Yeryüzündeki yerleşim alanlarının çoğu soğuk iklime sahip bölgelerde bulunur. Bu durum, yerleşim yerlerinde oluşturulacak yapıların ana taşıyıcı tabakası olan zemin üzerindeki çevresel iklim koşullarının etkisinin araştırılarak gerekli görülen durumlarda çözüm üretilmesini esas alır. Soğuk iklim koşullarında zeminin donması ve zaman sonra çözülmesi durumunda homojenliğin kaybolması zeminin fiziksel ve mekanik parametrelerinden çoğunu etkiler. Sıcak olmayan bölgelerde mevsim şartlarından dolayı tekrarlanan donma-çözülme döngüleri çokça gerçekleşir ve buna bağlı olarak zeminin geoteknik özellikleri olumsuz yönde değişiklik gösterir.

Donma sırasında zeminin bünyesinde bulundurduğu su, kılcal boşluklardan buz olmayan bölgeden buzlu bölgeye hareket ederek, burada gelen su donarak buz kristalleri oluşturur ve hacimde %9 artış elde edilir. Bunun sonucunda zemindeki boşluk miktarı artar ve deformasyon oluşur. Sıcak olmayan iklimlerde tekrarlanan donma-çözülme durumu, zeminin birçok özelliğini olumsuz etkiler. Tekrarlanan donma-çözülme davranışının etkileri göz ardı edilmeksizin, zeminlerin iyileştirilmesi çalışmalarına yoğunlaşılmalıdır.

Amaç ve Kapsam

Zeminler, üzerine yüklenen yükleri güvenli bir şekilde taşımalılardır. Bu sebeple zeminlerin geoteknik özellikleri çok önemlidir. Bazı zeminler, bina inşa etmek için arzu edilen özelliklere sahipken, bazıları ise arzu edilen özelliklere sahip değildir. Sorunlu olan zeminler, başka zemin türleriyle de değiştirilerek iyileştirme yapılabilir. Yalnız bu sunulan iyileştirme oldukça pahalıdır ve çevresel sorunları da beraberinde getirebilir. Dezavantajları da düşünülerek, daha fazla fayda sağlayacak yeni teknikler geliştirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, sorunlu zeminleri iyileştirmeyi hedeflemektedir. Bu yöntemlerinden olan kimyasal iyileştirmeler, farklı katkı maddeleri kullanılarak zeminin iyileştirilmesi adına çözüm bulmayı hedeflemektedir.

Tez kapsamında, rölatif sıkılığı %50 olan bir kötü derecelenmiş kum zemine (SP) farklı yüzdelerde PVCa ve PVCa+Laponit ilave ederek mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca, iyileştirilmiş numuneler 10 çevrim donma-çözülme çevrimine bırakılarak katkıların donma-çözülme sonrası davranışı üzerinde etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

ASTM D422 standartlarında, elek analizi deneylerine istinaden, zeminlerin tane çapı dağılımı eğrisi çizilip, USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) göre zeminin indeks özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla, farklı oranlarda laponit ve polivinil asetat kullanılarak elde edilecek olan katkılı kum zemin numunelerin, zemindeki mukavemet ve donma-çözülme davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

İyileştirme deneylerinde başlamadan önce deneylerde kullanılacak kum zeminin özgül ağırlığı (Gs), tane çapı dağılım eğrisi, maksimum boşluk oranı, minimum boşluk oranı belirlenmiştir. Daha sonra iyileştirme deneylerinde kullanılacak Polivinil Asetat (PVCa) ve Laponit-Rd'nin yüzdeleri ön deneyler yapılarak belirlenmiştir. Ön deneyler sonucunda elde edilen yüzdeler kullanılarak zeminler iyileştirilmiş ve 7-14 günlük kür süreleri sonundaki serbest basınç mukavemetleri (UCS) belirlenmiştir. Ayrıca 14 gün kür edilmiş numuneler 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutularak donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri ve ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Kum

Zeminler, kayaların havaya maruz kalmasıyla oluşur. Bu ayrışma fiziksel (ıslanma/kuruma, termal genleşme, don parçalanması) veya kimyasal (çözelti, oksidasyon, hidroliz) olabilir. Kayaların ve zemin temel bileşenleri kuvars ve montmorillonit gibi minerallerdir. Bazı minerallerin parçalanması (montmorillonite) diğerlerinden (kuvars) daha kolaydır. Sonuç olarak, kaba taneli zeminler (kum, çakıl) kuvars gibi kararlı minerallerden yapılma eğilimindeyken, ince taneli topraklar (silt ve kil) montmorillonit gibi daha az kararlı minerallerden yapılma eğilimindedir (Briaud, 2013).

Kum; parçalanmış kayaların mekanik ayrışması sonucu oluşan çakıldan daha ince siltten daha kaba malzemedir. Kayaların daha küçük parçacıklara mekanik olarak ayrışması, ani sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan veya hareketli su veya buzullar tarafından kayanın aşınmasından kaynaklanan çatlaklardaki suyun donma kuvvetleri gibi ajanların etkisinden kaynaklanmaktadır. Rüzgâr ve yağmurla erozyon çok önemli bir faktördür ve devam eden bir olaydır. Kaya boşluklarında ve yarıklarında büyüyen bitki ve köklerden kaynaklanan çatlama kuvvetleri, parçaları birbirinden ayırmaya zorlayabilir (Murthy, 2002)

Zeminlerin iriliği, kaba taneli zeminleri sınıflandırmanın birincil yolu olan tane boyutlarının dağılımı bilinerek belirlenir. İnce taneli zeminleri karakterize etmek için, mevcut mineral türleri ve içeriklerine ihtiyaç vardır. İnce taneli zeminlerin mekanik davranış olarak bilinen yüklere tepkisi, mevcut olan baskın minerallerin tipine bağlıdır (Budhu, 2010)

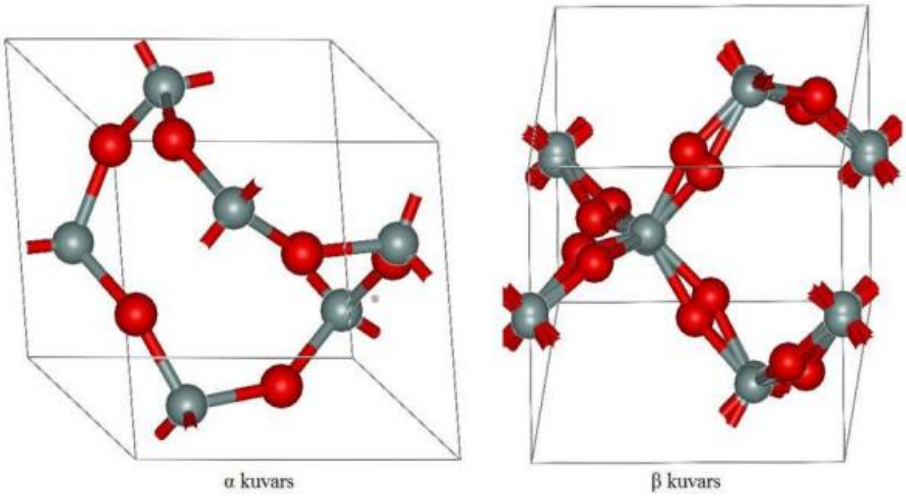
Zemin taneleri birbirinden farklı özelliklerde ve boyutlarda olabileceği gibi, tane boyutları zeminlerin, şişme, sıkışma, konsolidasyon ve mukavemet gibi birçok geoteknik davranışını etkilemektedir.

Zeminler genel olarak farklı boyuttaki tanelerin karışımıdır ve bu karışımdaki zemin tiplerinin oranına bağlı olarak sınıflara ayrılmaktadır. Zemin içindeki taneler farklı boyut ve şekillerdedir ve bu özellikler mühendislik davranışını etkilemektedir.

(Akkaya, 2011) tarafından oksijen, silisyum ve alüminyum yer kabuğunda en bol bulunan elementlerdir ve oksijen ve silisyum atomları yer kabuğundaki atomların %80'den fazlasını oluşturur. Pek çok mineral ve bileşikte bulunan bu elementler endüstriyel açıdan büyük öneme sahiptir. En belirgin element olan silis (SiO_2) , 870 °C'nin altındaki sıcaklıklarda üç kristal yapıda gözlenebilir: 870-1470 °C arasında kuvars, tridimit ve 1470-1710 °C arasında kristobalit. Silis 1710°C'de erir ve erimiş silika yüksek bir viskoziteye sahiptir. Kristalleşmeyi yavaşlatan yüksek viskozitesi sayesinde 1500 °C civarında kristalleşmeden yumuşayan bir cam yapı elde eder. Silisin bir kristal yapıdan diğerine dönüşümü, güçlü Si-O bağının kırılmasından kaynaklandığı için yüksek sıcaklıklarda bile yavaş ve zordur. Silis her üç kristal formu da tetrahedraldir (SiO_4) ve oksijen atomlarını paylaşır ve Si-O-Si bağ açısı 143.6°'dir (Miessler & Tarr, 1999).

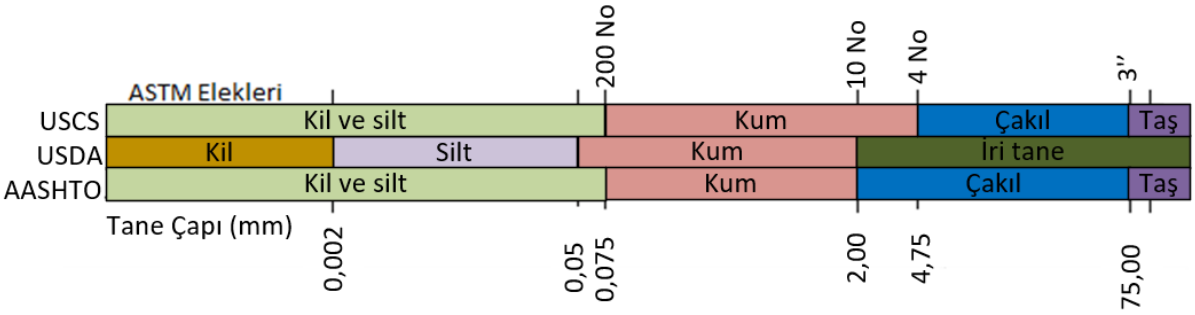
Kuvars, silisin en yaygın kristal formudur. Tetrahedral (SiO_4) yapının saat yönünde veya saat yönünün tersine hizalanmasıyla oluşan zincirlerden oluşur (Akkaya, 2011). 3 “Si” ve 3 “O” atomu, zincirlerin tam dönüş mesafesi içindedir (Miessler & Tarr, 1999). Kuvars, trigonal simetriye sahiptir ve yüksek sıcaklık ve basınç altında kuvars-silikanın kararlı halidir. Kuvars, 1 kilobar basınçta 573°C'ye kadar kararlı kalır (Akkaya, 2011).

Kimyasal yapısı SiO_2 olan mineral, doğada birçok renkte bulunur. Bunlar beyaz, kırmızı, pembe, mavi, mor gibi çeşitli renklerdir. Isıya, radyasyon toplama ve karasal oluşumlara karşı direnç gibi özellikler gösteren dozimetrik bir malzemedir (Akkaya, 2011). Kuvarsın kimyasal yapısı Şekil 1’de verilmektedir.



Şekil 1. Kuvarsın (α ve β) kimyasal yapısı (Akkaya, 2011).

USCS sınıflandırma sistemine göre 0,075 (200 Nolu elek) ile 4,75 mm (4 Nolu elek) arasında çapa sahip taneler kum olarak adlandırılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA) sınıflandırma sistemine göre 2 mm (10 Nolu Elek) ile 0,05 mm arasındaki zeminler kum olarak nitelendirilmektedir. Amerikan Karayolları Sınıflandırma (AASHTO) sistemine göre ise 10 Nolu elek ile 200 Nolu elek arası kum olarak sınıflandırılmaktadır. Zemin sınıflandırma sistemlerinin tane boyut aralıkları Şekil 2'de verilmiştir. Çoğu zaman iri kumlar yuvarlak, ince kumlar köşeli ve az köşeli olurlar. Kumlar oluş yerlerine göre Deniz Kumu, Nehir Kumu, Çöl Kumu, Buzul Kumu gibi isimler alır. Deniz kumları akıntı ve rüzgârlarla deniz kenarlarında, körfezlerde, kuytu yerlerde yığılır. Şekilleri yuvarlak ve üzerleri tuzlarla örtülüdür. Akarsu kumlan köşeli, parlak, değişik çapta ve bileşimdedir. Akarsulardaki kum ve çakılların türleri, yağış alanında bulunan taşların bir koleksiyonudur.



Şekil 2. Zemin sınıflandırma sistemlerinin tane boyut aralıkları

Tablo 1'de zeminlerin karakteristik özgül ağırlıkları yer almaktadır. Buna göre pratikte inorganik zeminlerin özgül ağırlığı 2,65 ile 2,80 arasındadır.

Tablo 1. Zeminlerin Karakteristik Özgül Ağırlıkları (Önalp, 2002).

Zemin Çeşitleri	Özgül Ağırlık
Çakıl ve Kum	2,65-2,68
Silt	2,62-2,68
İnorganik Kil	2,68-2,76
Organik Kil	2,58-2,65

Sıklıkla rastlanan heterojen zeminler olarak ikili taneli zemin karışımları, doğada ve insan yapımı tortularda her yerde gözlenir. İnce tane varlığı ve parçacık boyutu oranı, mekanik özellikler üzerinde potansiyel etkileri olan ikili bir karışımda, iki önemli derecelendirme değişkenlik parametresidir.

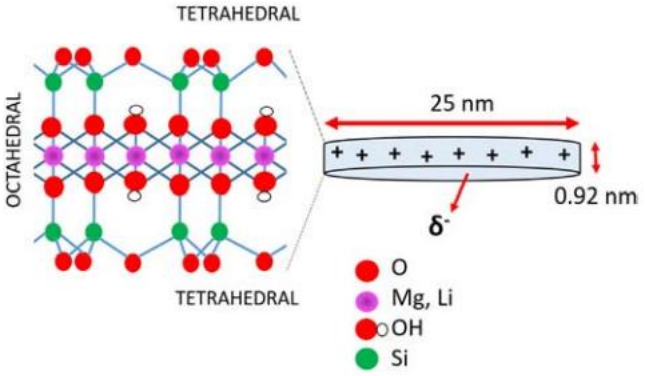
Ayrıca, literatür taramasında ince tane içeriğinin tüm aralığını ve farklı parçacık boyutu oranlarını değerlendiren drenajlı kesme davranışı üzerine yapılan araştırmalar fazla değildir.

Bu amaç doğrultusunda, ince tane içeriğinin ve parçacık boyutu oranının drenajlı kayma davranış etkilerini sistemli olarak araştırmak için dört farklı parçacık boyutu oranına sahip yoğun ikili silika kum karışımları üzerinde bir dizi drenajlı üç eksenli sıkıştırma testleri uygulanmış olup, testler sonucunda, mukavemet-genişleme davranışı ve kritik durum davranışları analiz edilmiştir.

İnce tane içeriğinin ve parçacık boyutu oranının, gerilim-uzama tepkisi, kritik durum boşluk oranı, kritik durum sürtünme açısı, maksimum genişleme açısı, tepe sürtünme açısı ve gerilim-genişleme ilişkisi üzerindeki etkinin büyük olduğu belirlenmiştir. İnce tane içeriği ve parçacık boyutu oranı etkileri altında yatan sebep, parçacık seviyesindeki kinematik hareketlerin olduğu görüşü belirtilmiştir (Deng et al., 2021).

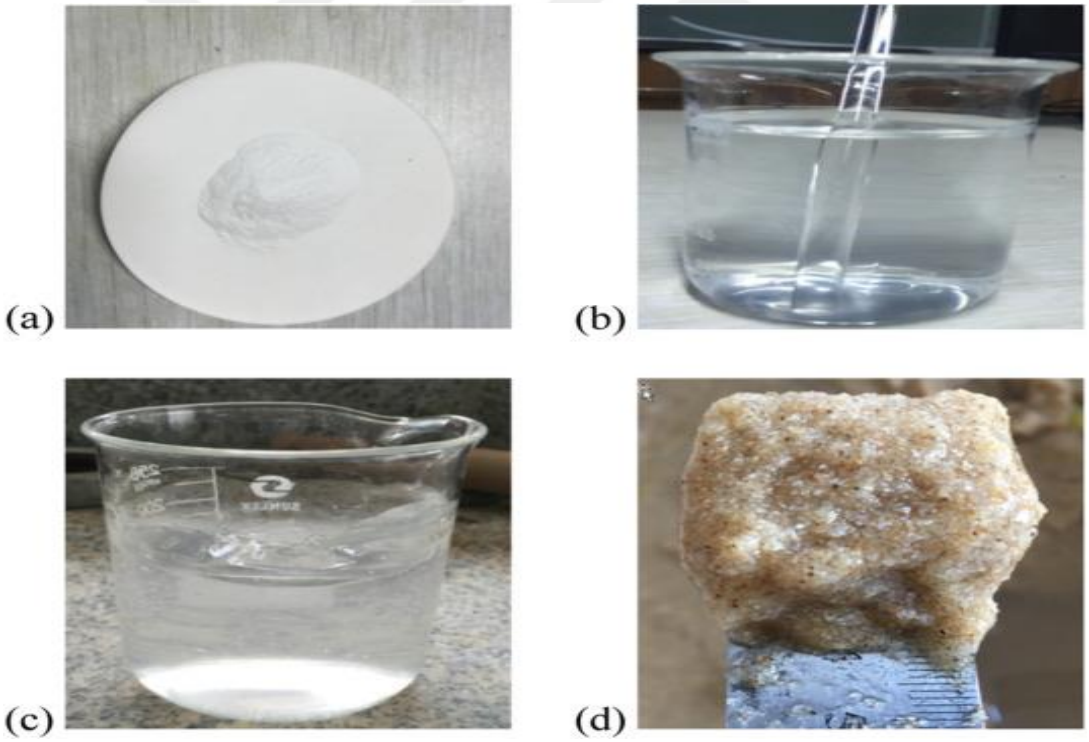
Laponit

Laponit, bentonitten neredeyse 10 kat daha küçük, 1 nm kalınlığında ve 25 nm çapında sentetik katmanlı bir silikat nanoparçacıktır. Laponit, doğal bir montmorillonite yapısına benzer şekilde, iki tetrahedral ve bir oktahedral tabakadan oluşan katmanlı yapılara sahip, sentetik bir silikat nanopartikül tabakasından yapılır (Kroon et al., 1998). Laponit, montmorillonitin oktahedral kristalleri için magnezyum iyonlarının kısmen lityum iyonları ile değiştirildiği sentetik bir yarı montmorillonittir. Suda disk tabakası şeklindeki tanecik yapılarına hızla dağılarak renksiz şeffaf bir süspansiyon oluşturabilir. İki değerlikli magnezyum iyonlarının bir kısmı parçacık yüzeyinde bir lityum iyon değeri ile değiştirildiğinden, yüzeyi çok sayıda negatif yük yayar (Huang & Wang, 2016b).Kenardaki Mg–OH ve S–OH gibi hidroksitler, protonasyon için az miktarda pozitif yük alır. Laponit suda çözünmez ve askıdaki malzemenin bir kısmı bir süre sonra çökerek likiditesini kaybeder (Levitz et al., 2000).İyonik kuvvet düşük olduğunda, parçacıklar arasında elektrostatik itme meydana geldiğini ve sistemin birbirini dışlayan camsı bir durumda olduğu gösterilmiştir. İyonik kuvvet yüksek olduğunda parçacıkların yüzeyindeki elektrikli çift tabaka sıkıştırılır, elektrostatik etkileşim mesafesi azalır ve parçacıklar arasındaki mesafe kısalarak fiziksel çapraz bağlı bir jel oluşur (Tanaka et al., 2004).Şeffaf jelin küçük boyutlu ölçeğinin yanı sıra iyi reolojik özelliği nedeniyle, laponit sıvılaştırılabilir kumun sıvılaşma direncini artırabilir ve nano bentonitten daha iyi malzeme özelliklerine ve iletkenliğe sahiptir (El Mohtar et al., 2013).Laponitin nanokristal geometrisinin şematik gösterimi(disk şekli) ve kimyasal yapısı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Laponitin nanokristal geometrisinin şematik gösterimi(disk şekli) ve kimyasal yapısı (Tomás et al., 2018)

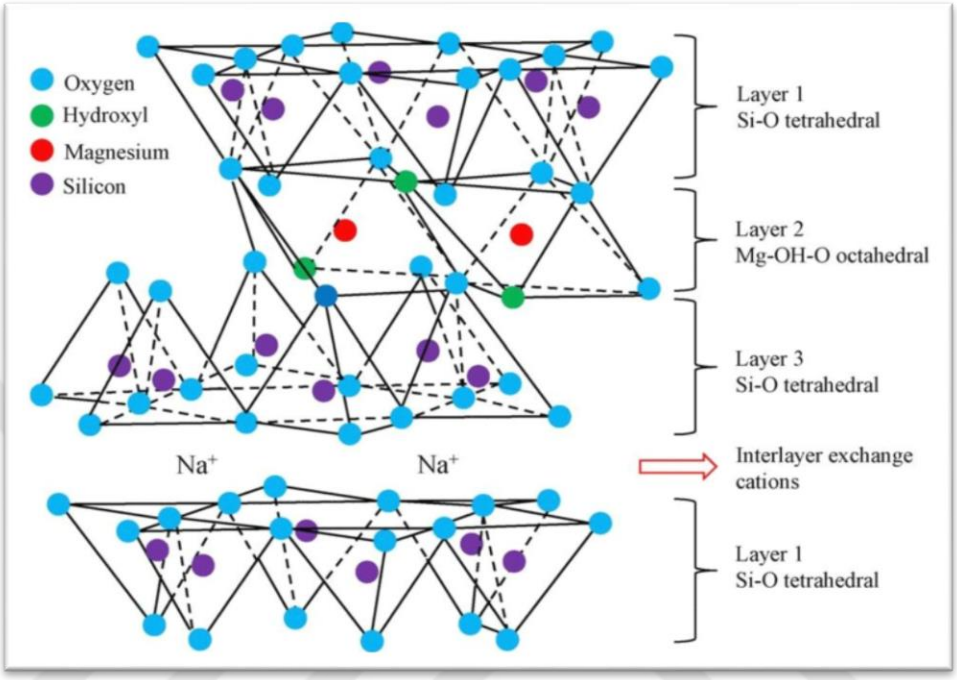
Laponit suda dağıldıktan sonra sıvı-katı geçişine uğrayabilir, ardından şeffaf ve katı benzeri bir jel oluşturur. Katı benzeri jel, bir dış kuvvete maruz kaldığında katı-sıvı geçişinden zarar görebilir, ancak bir dinlenme süresinden sonra sıvı-katı geçişi tekrar gerçekleşir. Laponitin dört ana durumu (partiküller, sol haldeki dispersiyon, jel halindeki dispersiyon ve kum-laponit) Şekil 4'de gösterilmektedir (Huang et al., 2019).



Şekil 4. (a) Laponit parçacıkları, (b) Sol halde laponit dispersiyonu, (c) Jel halinde laponit dispersiyonu, (d) Kum-laponit numunesi.

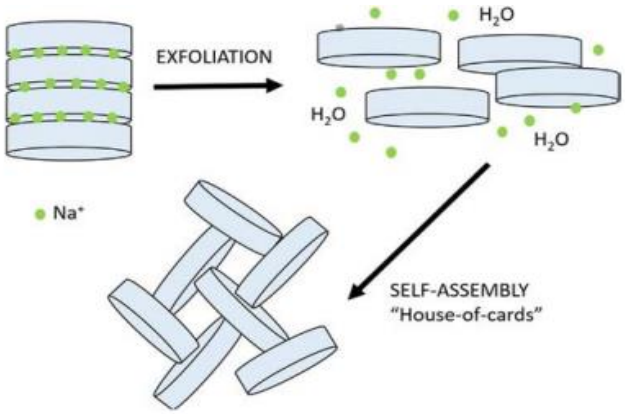
Kum-laponit modelinde dinamik tepkiler, özellikle boşluk basıncı gelişimi açısından önemli ölçüde etkilenir. Boşluk suyu basıncının başlamasında önemli bir gecikme olur ve kum-laponit modelinde bunun yanıtı yapay olarak üç yaklaşık aşamaya ayrılabilir: boşluk suyu basıncının oluşumu, yayılması ve dağılmasıdır (Huang et al., 2019).

Laponitin mikro yapısı Şekil 5'de gösterilmiştir. Laponitin parçacık boyutu, bentonitinkinden belirgin şekilde daha küçüktür. Süspansiyonda laponit konsantrasyonu ağırlıkça yaklaşık %3'e ulaştığında, süspansiyon birkaç saat içinde su benzeri sıvıdan katı jele dönüşecektir. Buda laponitin bir tür derz dolgu malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılar (Liu et al., 2021).



Şekil 5. Laponitin mikro yapısı (Liu et al., 2021)

Laponit, enjeksiyon zemininde dinamik özelliklerini iyileştirmede mükemmel bir performansa sahiptir. Jelleşme özelliğine bağlı olarak, laponit kuma enjekte edilebilir. Şekil 6'da Laponit kristallerinin su ile etkileşime girerek jel oluşumu meydana getirmesini göstermektedir.



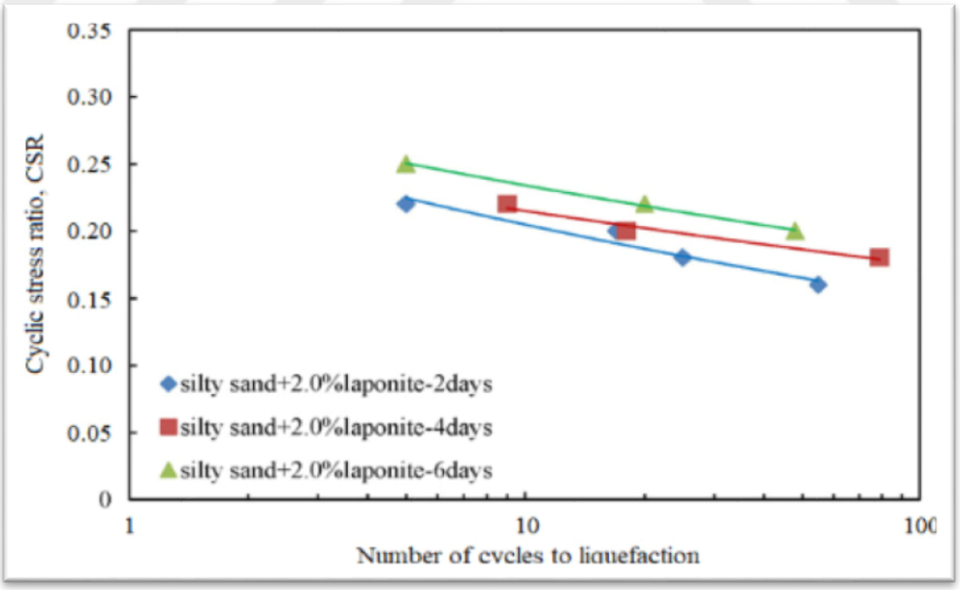
Şekil 6. Laponit kristalleri su ile etkileşime girerek jel oluşumu meydana getirmesi (Tomás et al., 2018)

Kum tanelerinin gözeneklerindeki su akışını engelleyen, dinamik yük altında boşluk suyu basıncının oluşumunu geciktiren ve böylece kumun sıvılaşma direncini artıran kum gözeneklerinde katı bir jel oluşturur (Liu et al., 2021). Aynı CSR altında, laponit ilavesiyle kumun sıvılaşmayı önleme yeteneği önemli ölçüde iyileştirilir.

Laponit aşırı boşluk suyu basıncının oluşumunu ve yayılmasını geciktirdiği için boşluk basıncının tepkisi yapay olarak üretim aşaması, yayılma aşaması ve dağılma aşamasına bölünebilir. Ek olarak, laponitin varlığı kum parçacıklarının hareketini kısıtlar ve işlenmiş zeminin gerginliğini azaltır. Laponit konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa, laponitin iyileştirici etkisi o kadar belirgindir.

Ayrıca, kürleme süresi, Şekil 7'de gösterildiği gibi, laponit ile işlenmiş zemin için güçlendirme etkisi ile de pozitif bir korelasyon sunar. Laponit içeriğinin artması ve kür süresinin uzaması, aynı zamanda, zemin rijitliğini artırmaya yardımcı olan kayma modülü ve sönüm oranının artmasına da yol açar (Liu et al., 2021).

Ancak laponit konsantrasyonunun ve kür süresinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkileri farklılık göstermektedir. İlk birkaç yükleme çevriminde, sıvılaşmanın ilerlemesini kontrol eden baskın faktör laponit konsantrasyonudur. Birkaç yükleme döngüsünden sonra, kürleme süresinin etkisi daha güçlüdür (Şekil 7).



Şekil 7. Farklı kürlenme sürelerine sahip laponit uygulanmış numuneler için CSR ile sıvılaşmaya kadar olan döngü sayısı arasındaki ilişki (Liu et al., 2021)

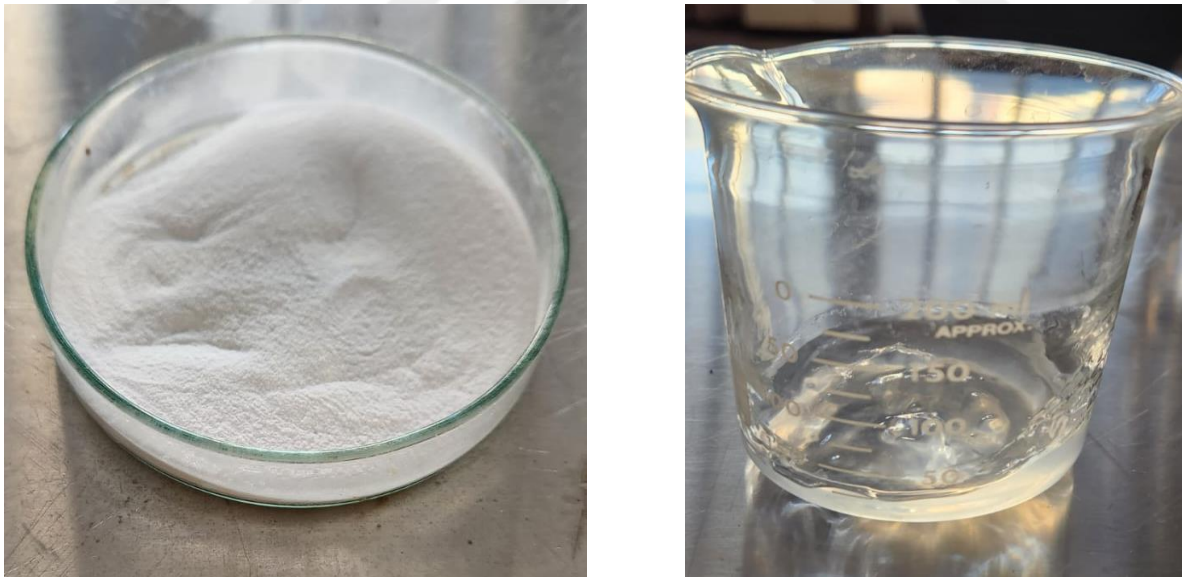
Laponit, araştırılan geleneksel olmayan malzemelerin en pahalısıdır. Ancak özellikleri, sıvılaşmayı azaltmada diğer nanomalzemelerden üstündür. Bununla birlikte, laponit, sıvılaşmayı azaltmada daha iyi bir performansa sahip olduğu için son yıllarda araştırmacıların daha fazla dikkatini çekmiştir.

Laponit iyi reolojik özelliklere sahip olup, su içerisinde dağıldığında şeffaf süspansiyon oluşturduğundan genellikle koloidal bilimde referans bir malzemedir (Levitz et al., 2000).

Laponit kullanımına ait yapılan çalışmalar doğrultusunda sıvılaşmayı azaltmak için, laponitin mikro yapısal özelliklerine yoğunlaşılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde, laponitin bentonitten daha üstün malzeme niteliğinde ve iletkenliğine sahip olduğu gözlenmektedir (El Howayek, 2011).

Laponit- kum numunelerindeki kür süresinin, sıvılaşma direncini etkileyen en önemli parametredir. Bu nedenle % 2,0 Laponit-kum numuneleri ve % 3,0 Laponit-kum numuneleri farklı kürlenme süreleriyle (2, 4 ve 6 gün) hazırlandığında sıvılaşma direnci kür süresi arttıkça iyileştirmiştir. Laponitteki sıvılaşma potansiyelini azalttığı ana mekanizmalar, gözeneklerdeki sıvının katılaşması ve basınç oluşumunun gecikmesidir (Huang & Wang, 2016c).

Çalışmamızda kullandığımız laponitin parçacık hali ve jel hali Şekil 8'de gösterilmektedir.

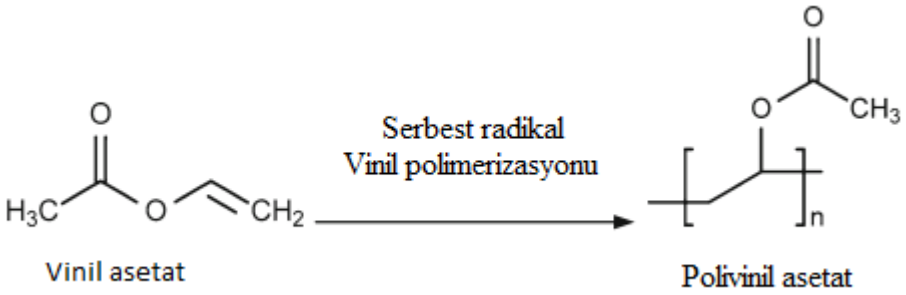


Şekil 8. Deneylerde kullanılan Laponitin parçacıklı hali ve jel hali

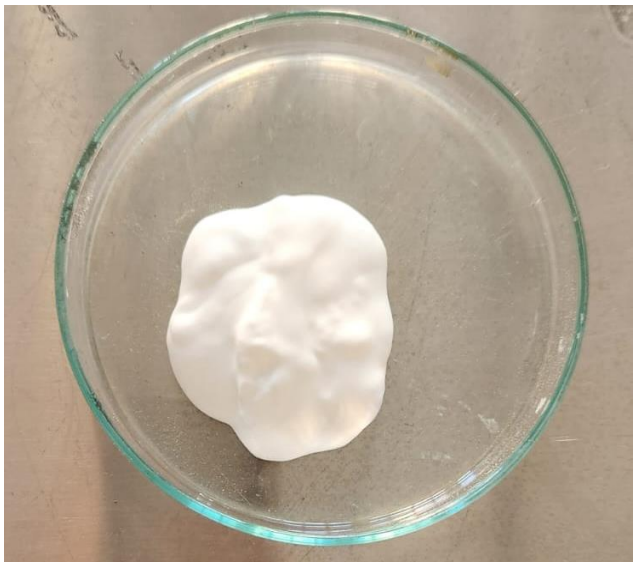
Polivinil Asetat

Polivinil asetat, vinil asetat ve bir katalizörün polimerizasyonu ile elde edilen renksiz bir malzemedir. Polivinil asetat, vinil monomerlerine dayalı serbest vinil radikallerinin polimerizasyonundan elde edilen polimerik bir malzemedir. Bu malzeme 1912 yılında Almanca Fritz Kalath tarafından yapılmış ve piyasada PVAc olarak bilinen keşfedilmiştir (Tolleson et al., 2003).Termoplastik yapı, suda çözünürlük, yüksek reçine içerikli polimerdir. Düşük kaliteli su bazlı kaplamalarda genellikle akrilik bazlı boya için bağlayıcı olarak kullanılır. Yapıştırıcıların özellikleri farklı bileşikler eklenerek değiştirilebilir veya ayarlanabilir. Bu durumda performans değişikliği gözlenebilir. Nanoteknolojiyle beraber, yapıştırıcı endüstrisine yeni nesil yapıştırıcıların geliştirilmesi fırsatı verilmiştir. PVAc'nin kimyasal formülasyonu Şekil 9'da gösterilmektedir.

Ayrıca yapıştırıcı, tekstil ve emprenye alanlarında kullanılan bir reçinedir. Şekil 10. Da deneylerimizde kullanılan polivinil asetat gösterilmiştir.



Şekil 9. Polivinil asetatın kimyasal yapısı



Şekil 10. Deneylerde kullanılan Polivinil Asetat

Zeminlerin İyileştirilmesi ve Uygulanan Teknikler

Uygulama alanlarında zemin koşulları, yapısal tasarımların ve yapım yöntemlerinin seçiminde önemli bir etkiye sahiptir. Zemin yapısı, projenin fizibilitesini belirleyecek kadar sorunlu olabilir. Bu koşullar altında, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekebilir. Zemin iyileştirme, fiziksel, kimyasal veya biyolojik süreçler yoluyla mühendislik uygulamaları için zeminlerin belirli özelliklerinin iyileştirilmesidir. Zemin iyileştirme yerine genellikle ıslah, stabilizasyon ve modifikasyon gibi eşanlamlı terimler kullanılmaktadır (Özaydın, 2012).

Yapım aşamasında ve sonrasında gelen yükler sebebiyle zeminde meydana gelen gerilmeleri, zemin güvenle karşılanmalıdır. Bazı durumlarda zeminler bu gerilmeleri karşılamayabilir. Alınması gereken önlemler şunlardır:

- Mevcuttaki zemine göre proje oluşturmak,
- Zayıf zemin yerine, zemini taşıma gücü yüksek zeminle doldurmak,
- Taşıma gücü yüksek zeminlere inşa etmek,
- Zemin özellikleri arazide uygun şekilde iyileştirmek,

olarak maddelendirilir (Özdemir & Özdemir, 2006).

Zeminin iyileştirilmesindeki hedefler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Mukavemet – taşıma gücü artışı,
- Oturmaların minimuma indirilmesi,
- Gerilme altında şekil değiştirmenin minimumda kalması,
- Şişme – büzülme potansiyelinin azaltılması,
- Çevresel etkilerden (donma – çözülme, ıslanma – kuruma) dolayı oluşabilecek fiziksel ve kimyasal etkilerin önüne geçilmesi,
- Su geçirgenliği ve sızıntı sularının kontrol altında tutulması,
- Erozyona karşı olan dayanımın arttırılması,
- Deprem gibi yükler altında sıvılaşma ve dayanım gibi değişkenlerin iyileştirilmesi,
- Zemin yüzeyindeki deformasyonlara karşı meydana gelen direncin artmasını sağlamak (Özaydın, 2012).

Önceki yıllardan günümüze kadar birçok farklı zemin iyileştirme tekniği geliştirilmiştir. İnsan kullanım alanlarının artırılması ve kullanılması adına birçok teknikler geliştirilmiş ve düzenlemeler yapılmıştı.

Bu yöntemler ISSMGE Zemin İyileştirmesi Teknik Kongresinde (Tablo 2)de verildiği gibi kategorilendirilmiştir (Briaud, 2013)

Tablo 2. Zemin İyileştirme Metotlarının Sınıflandırılması (Chu et al., 2009)

Kategori	Metot	Çalışma Prensibi
Kohezyonsuz zeminlerde ya da dolgularda katkısız zemin iyileştirilmesi	Dinamik kompaksiyon	Granüler zeminlerin sıkılaştırılması işlemi için ağırlığın zemine serbestçe düşürülmesi esas alınmıştır.
	Vibrokompaksiyon	Granüler zemin içerisinde vibrasyon aleti kullanılarak uygulanan zeminin sıkıştırılması işlemi esas alınmıştır.
	Patlatmalı kompaksiyon	Granüler zeminde patlamanın oluşturduğu şok dalgalarının etkisiyle ve titreşimler ile zeminin oturması işlemi esas alınmıştır.
	Elektrik Titreşimli kompaksiyon	Elektrik akımı verilerek üretilen ultra-yüksek voltaj altında oluşan elektrik sinyalleri ve şok dalgaları kullanılarak zeminlerin sıkıştırılması işlemi esas alınmıştır.
	Yüzey kompaksiyonu	Farklı kompaksiyon makineleri kullanılarak, yüzey veya yüzeye yakın zeminler veya dolguların sıkıştırılması işlemi esas alınmıştır.
Kohezyonlu zeminlerde katkısız zemin iyileştirilmesi	Yerinden çıkarıp, yerine koyma	Kazma yöntemiyle kötü zemini çıkarıp yerine iyi zemin veya kaya konulması işlemidir. Zemin basıncı ve yük azaltmak için bazı hafif malzemelerde kullanımında esas alınmıştır.
	Dolgu ile önyükleme (düşey drenler kullanılarak)	Zaman içerisinde zemin üzerine gelecek yüklerden kaynaklı sıkışabilirliği azaltmak için, dolgularla zeminin sıkıştırılması işlemi esas alınmıştır.
	Vakum kullanılarak ön yükleme	Sıkışabilir zeminlerde,90 kPa basınçta uygulanan vakum ile prenkosolide ile sıkışa bilirliğin azaltılması işlemi esas alınmıştır.
	Drenajlı dinamik konsolidasyon (vakum ile)	Dinamik kompaksiyon ile benzer olup, yatay ve düşey direnler (ya da vakum ile) kullanılarak, boşluk basıncı kompaksiyon boyunca oluşturulması işlemi esas alınmıştır.
	Elektro-osmoz veya elektro kinetik konsolidasyon	Zemine yüklenen DC akımı ile, zeminde bulunan sular ya da solüsyonlar akımın etkisiyle anotlardan katotlara doğru su akışının sağlanması esas alınmıştır.
	Dondurma, ısıtma yolu ile termal stabilizasyon	Isıtma veya dondurma yöntemi ile, zeminin fiziksel ya da mekanik özelliklerinin geçici veya kalıcı olarak değiştirilmesi esas alınmıştır.
	Su fışkırtma kompaksiyonu	Çökebilir zeminlerin (lös) sondaj çalışması boyunca ıslatma ve patlatma yöntemiyle sıkıştırılması işlemi esas alınmıştır.

Tablo 2. (devamı)

Katkılar ya da dahil etmeler ile zemin iyileştirilmesi	Titreşimli değiştirme ya da taş kolonlar	Yumuşak veya ince taneli zeminlerde, boşluklara yoğun miktarda çakıl veya boşlukların doldurulması işlemiyle kolon oluşturulması işlemi esas alınmıştır.
	Dinamik yer değiştirme	Yüksek enerji ile ince ve iri taneli zeminlere dinamik etki uygulanarak zemine yerleştirilmesi ve kolon oluşturulması işlemidir. Dolgu malzemesi olarak kum, çakıl, taş ya da enkaz molozları kullanılabilir.
	Kum kompaksiyon kazıkları	Zemin içerisine kumun sondaj borusu ve vibrasyon kullanılarak dinamik etkiler altında yerleştirilmesi ve sıkıştırılmasıyla kolon oluşturulması işlemi esas alınmıştır.
	Geotekstil ile çevrelenmiş kolon	Altı kapalı silindirik geotekstil kullanılarak içerisine kum yerleştirilerek kolon oluşturulması işlemi esas alınmıştır.
	Rijit dahil etme	Yumuşak zeminlere kolonlar, yarı sert ya da sert cisimler ya da kazıklar kullanılarak güçlendirilmesi işlemi esas alınmıştır.
	Geosentetik güçlendirilmiş kolonlar ya da kazık destekli dolgular	Kazıkların, sert veya yarı sert kolonlarla ve geosentetik kuşatmalar kullanılarak stabilitenin artırılarak, dolgulardaki oturmaların azaltılması işlemi esas alınmıştır.
	Mikrobiyal metotlar	Mikrobiyal materyallerle zeminlerin dayanımının arttırılması ve permeabilitesinin azaltılması işlemi esas alınmıştır.
	Diğer metotlar	Alışılmış olmayan yöntemlerdir.
Enjeksiyon katkısı ile zemin iyileştirme	Partikül enjeksiyonu	Çimento ya da diğer partiküllerin granüler zeminlere ya da zeminlerin ve kayaların oyuk ve çatlaklarına enjeksiyonu ile zemin dayanımınının artırılması ya da permeabilitenin azaltılması.
	Kimyasal enjeksiyon	Hazırlanan kimyasalların zemin boşluklarında reaksiyona girerek jel oluşturması sonucunda zemin dayanımının artması ve permeabilitenin azalması işlemidir.
	Karıştırma metodları	Çimento, kireç gibi bağlayıcı maddelerin zayıf zeminlere katılmadan önce ilk olarak zeminle harmanlanarak uygulanması işlemidir.
	Jet enjeksiyon	Uygulanacak zeminlere yüksek hızlı jetler ile enjeksiyonu verilerek kolon veya panellerin uygulanması işlemidir.
	Kompaksiyon enjeksiyonu	Uygulanacak zemine, katı kıvamlı enjeksiyonun zemin boşluklarına enjekte edilmesi ve geriye kalan homojen kütlenin yoğunlaştırılması işlemi ya da oturmuş zeminin toplatılması işlemidir.
	Compensation enjeksiyon	Zemin içerisine yer altı kazısı ile orta-yüksek viskoziteli partikül süspansiyonun enjekte edilmesi birlikte devam etmekte olan kazının yapıda oluşturacağı oturmayı azaltmak veya etkisiz hale getirme çalışmasını esas almaktadır.

Tablo 2. (devamı)

Yeryüzü güçlendirilmesi	Geosentetikler ve mekanik olarak sağlamlaştırılmış yüzey	Gerilme dayanımı kullanılarak farklı geosentetikler veya Çelik materyallerle kesme dayanımı, zemin ve yolların stabilizasyonu, temeller, şevler ve istinat duvarların kapasitesini arttırma işlemi esas alınmıştır.
	Zemin çivileri ile yüzey sabitleme	İstinat duvarlarının veya şevlerin stabilitesini artırmak için ankraj ve gömülü çivilerin çekme gerilmesinin kullanılması işlemidir.
	Bitkiler ile biyolojik metotlar	Şev stabilitesini bitki kökleri kullanılarak artırılması, işlemi esas alınmaktadır.

Zeminlerin iyileştirmeleri beş gruba ayrılır:

- İri taneli zeminlerin katkı malzemesiz iyileştirilmesi,
- İnce taneli zeminlerin katkı malzemesiz iyileştirilmesi
- Yer değiştirme ile zemin iyileştirilmesi
- Enjeksiyon ve katkı malzemeleri ile zemin iyileştirilmesi
- Dahil etme ile zemin iyileştirilmesi (Briaud, 2013).

Mekanik iyileştirme, kısa süreli mekanik kuvvetlerin etkisiyle zemin yoğunluğunu üst seviyelere çıkarmayı amaçlar.

- Sıkıştırma kazıkları,
- Patlatma ile sıkıştırma,
- Titreşimli veya darbeli silindir ile sıkıştırma,
- Titreşimli tablalarla sıkıştırma,
- Derinde titreşimle sıkıştırma

mekanik iyileştirme altında düzenlenebilir (Yıldırım, 2002).

Hidrolik iyileştirme, kanal ve kuyular yardımı ile boşluk suyu basıncının azaltılarak, kayma dayanımını artırmayı amaçlayan iyileştirme şeklidir. İri taneli zeminlerde kuyu veya hendeklerden pompalanarak yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesi, ince taneli zeminlerde düşey drenlerle ön yükleme uygulanması, elektriksel yüklerle boşluk suyunun uzaklaştırılması hidrolik iyileştirme altında sınıflandırılabilir (Yıldırım, 2002).

Fiziksel ve kimyasal iyileştirme yöntemleri; zemindeki yüzey tabakalarında katkı malzemelerinin fiziksel olarak bir araya getirilmesi, katkı malzemelerinin derinlerde kolonlar teşkil edecek şekilde birleştirilmesi yöntemiyle uygulanır. Katkı malzemeleri; doğal zeminler, endüstriyel artık ürünleri veya atıklarla bir araya gelmesi durumunda zeminle tepkimeye giren çimento ve kimyasallardan ortaya çıkabilir.

Enjeksiyon, zemin boşluklarına katkı malzemeleri veya yapı elemanlarının zemine basınçla verilmesidir. Isıtma ve dondurma yöntemiyle tercih edilen iyileştirmeler, ülkemizde geniş kullanım alanı bulan jet grout kolonu uygulaması bu grup içerisinde nitelendirilir (Yıldırım, 2002).

İstenmeyen zemin davranışlarını ortadan kaldırmanın ve zemin özelliklerini iyileştirmenin en dikkate değer yöntemleri arasında güçlendirme, katkı maddeleri ile stabilizasyon, sıkıştırma, drenaj ve yeraltı suyu seviyesinin düşürülmesi sayılabilir (Choobbasti et al., 2019).

Aynı zamanda, kimyasal çözeltiler inşaatın ilerleyen zamanında yeraltı suyunu bozabilir. Bu sebeple, klasik derz dolgu malzemeleri mühendislik verimliliğini ve çevreyi koruma açısından kaygılara sebebiyet verebilir (Liu et al., 2020).

Nanomalzeme, nanoteknolojiden kaynaklanır ve nano ölçekli (10^{-9}m) parçacık boyutuna sahip ultra ince malzemeleri ifade eder. Nanomateryal çok geniş bir spesifik yüzey alanına ve yüksek yüzey aktivitesine sahiptir, bu da geleneksel malzemelerden farklı birçok benzersiz mühendislik özelliği ile sonuçlanır.

Şu anda, zemin iyileştirme için yaygın olarak kullanılan dört tip nanomalzeme vardır: kolloidal silika, bentonit, laponit ve karbon nanotüp.

İri taneli zeminlerin katkı malzemesiz iyileştirilmesi

Kompaksiyon

Zeminin kıvamı dışardan uygulanan kısa süreli mekanik yükler ile artması sağlanabilir. Mekanik iyileştirme, kompaksiyon adıylada tanımlanabilir. Kompaksiyon, ani yüklerin veya dinamik yüklerin etkisi altında zemin partikülleri arasındaki boşluk miktarının azalması olarak tanımlanmaktadır. Bu oranın azaltılmak istenmesindeki amaç, maksimum kayma mukavemetinin oluşturulması, oturmanın minimuma indirilmesi, boşlukların suyla dolarak kayma mukavemetinin düşürülmesi diye maddelendirilebilir (Özcep, 2009). Kompaksiyon, kaplama katmanlarının düzenlenmesinde, istinat duvarlarının arka dolgularında ve diğer dolgu uygulanacak alanlarda tercih edilir (Briaud, 2013).

Dinamik kompaksiyon

Alışılmış kompaksiyon yöntemlerinde, iyileştirme derinliğinin kısıtlı olması ve daha büyük derinliklerde zeminlerin sıkıştırılması ihtiyacına istinaden, zemine yüksekten serbestçe ağırlık bırakılmasıdır. Bu uygulamanın ilk öncüsü Louis Menard ‘dır (Menard and Broise 1975)(Briaud, 2013).

Vibrokompaksiyon

Bu yöntem, içerisinde dış merkezli bir yükün dönerek titreşim uyguladığı hareketli bir sonda-vibroflotun (uzunluk 3-5 m, çap 40-50 cm) kendi ağırlığı ve titreşimin neticesinde zemine penetresi sonucu, zemine yayılan vibrasyon enerjisinin etkisiyle sıkıştırılma işlemidir (Özaydın, 2012).

Diğer metotlar

Bu yöntemlerin haricinde iri taneli zeminlerde hızlı etkili kompaksiyon, patlatmalı kompaksiyon, elektrik darbeli sıkıştırma yöntemleri de kullanılmaktadır.

Zeminlerin İyileştirmesinde Kullanılan Nanomalzemeler

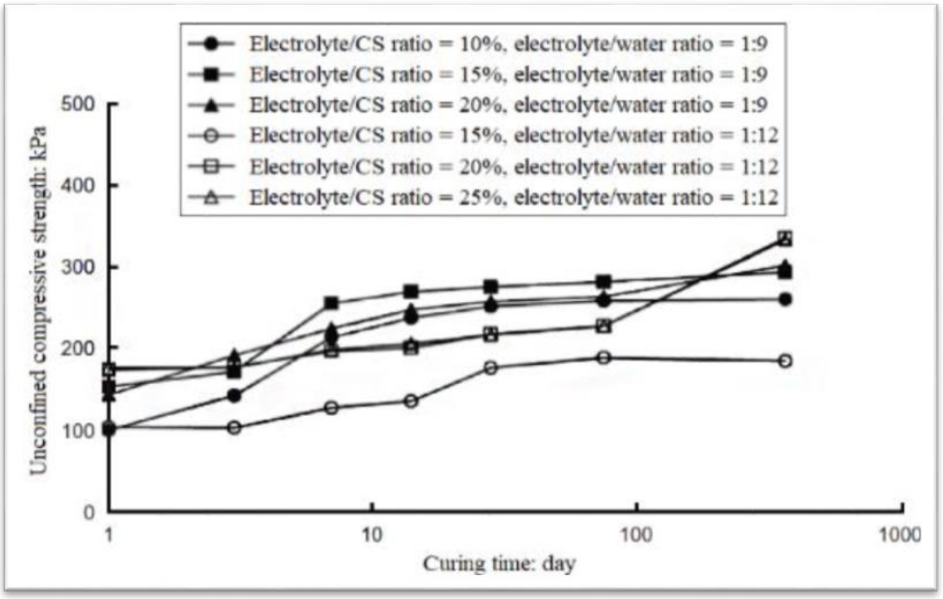
Laponit hakkında bilgi yukarıda verilmiştir. Laponit dışında zemin iyileştirilmesinde kullanılan diğer nanomalzemeler aşağıda açıklanmıştır.

Kolloidal silika

Kolloidal silika (El Mohtar et al.), silikat çözeltisi ile üretilen nano ölçekli silis dioksit parçacıkları içeren sulu bir dispersiyondur. Zeminin iyileştirilmesi için kullanılan yeni bir tür nanomalzemedir.

Elektrolit çözeltisi veya asit eklendiğinde itici kuvvetler giderek azalır ve siloksan bağları gelişmeye başlar. Bu sebeple, jelleşme indüklenebilir. CS'nin jelleşme süreci, zemin parçacıklarını birbirine bağlayacak ve zemin mekanik davranışlarını önemli ölçüde iyileştirir. Araştırmacılar, CS uygulanmış zeminin pik kesme mukavemeti ve sertliğinin, iyileştirilmemiş zemine kıyasla büyük ölçüde iyileştiğini bulmuşlardır. CS ile muamele edilmiş kum, kürlenme süresi ile artan serbest bir basınç dayanımına sahiptir ve bir yıllık kürleme periyodundan sonra değer yaklaşık olarak iki katına çıkar (Şekil 11).

Ek olarak, CS sadece CS uygulanmış zeminlerin statik mukavemetini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda sıvılaşmaya duyarlı kumlu zemin için dinamik direnci de geliştirebilir (Liu et al., 2020).



Şekil 11. Kolloidal-silika uygulanmış zeminin UCS'si ile kür süresi arasındaki ilişki (Liu et al., 2020)

Aslında, enjeksiyonlu kumun hidrolik iletkenliği, saf kumdan milyon kat daha küçük olan sadece 10^{-8} cm/s'dir. Ayrıca, CS içeriğinin ağırlıkça %7,4'ün üzerine çıkması durumunda CS partiküllerinin konsantrasyonunun artmasıyla hidrolik iletkenliğin katlanarak azaldığı araştırılmıştır. Bu nedenle, CS zemine enjekte edildiğinde, iyileştirilmiş zeminin mikro yapısı büyük ölçüde değiştirilir.

Gözenekler, zemin parçacıklarını birbirine daha da bağlayan CS kolloidleri ile doldurulur. Çimentolanma şüphesiz mekanik özellikleri iyileştirilir ve işlenmiş zeminin geçirimliliğini azaltır (Liu et al., 2020).

Kolloidal silika, kapsamlı iyileştirmesi, tatmin edici etkisi ve düşük fiyat/performans oranı nedeniyle şimdiye kadar zemin iyileştirme için en yaygın kullanılan nanomalzemedir.

Bentonit

Bentonit, esas olarak montmorillonitten oluşan oldukça plastik bir kil türüdür. Bentonitin iki temel özelliği su emme ve tiksotropidir.

Tiksotropi, bir tür tersine çevrilebilir sol fenomenidir; bu, bentonitin viskozitesinin durumuna göre değiştiği anlamına gelir. Bu, bentonitin karıştırıldığında veya çalkalandığında bir sıvı gibi davrandığını, ancak beklemesine izin verildiğinde tekrar jel haline geldiğini gösterir.

Tiksotropi, bentonitin enjeksiyon malzemesi olarak kullanılması için kritik bir özelliktir. Bentonit jelleştikten sonra zemin parçacıklarını birbirine bağlar.

Bentonit ile iyileştirilmiş zeminin sıvılaşmaya karşı direnci artar. Bentonit varlığının aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu geciktirebileceği düşünülmektedir. Drenajsız üç eksenli deneyler, aşırı boşluk suyu basıncının büyüklüğünün bentonit ile muamele edilmiş kum için önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu nedenle, bentonit süspansiyonunun enjeksiyonu etkili bir yöntem olarak kabul edilir. Ayrıca, bentonit ile iyileştirilmiş zeminin sıvılaşma direnci, kür süresi ile büyük ölçüde artar (Liu et al., 2020).

Bentonit ile iyileştirilmiş zemin numuneleri için hidrolik iletkenlik de büyük ölçüde azalır. Ağırlıkça %5, %10 ve %12 bentonit süspansiyonları ile işlem görmüş kum numuneleri üzerinde geçirimlilik deneyleri yapılmış ve iyileştirilmiş kumun hidrolik iletkenlikleri sırasıyla 4, 4,5 ve 5 büyüklük mertebesinde azalmıştır (Liu et al., 2020)

Bentonit içeriği ağırlıkça %3'ün üzerine çıktığında, bentonit tüm kum boşluklarını doldurduğu ve hidrolik iletkenliği daha etkili bir şekilde azalttığı belirlenmiştir (Liu et al., 2020). Bentonit, sıvılaşma direncini güçlendirmeye yardımcı olur ve bu nedenle mükemmel bir enjeksiyon malzemesi olarak kabul edilir.

Karbon nanotüp

Karbon nanotüpler (CNT'ler), nanometre cinsinden ölçülen çaplara sahip karbondan yapılmış tüplerdir. Tek boyutlu nanomalzeme olarak CNT, karbon atomlarının altıgen bir yapıda düzenlendiği ve bir tüpe sarıldığı grafenden oluşturulmuştur (J Torkan).

Bu eşsiz yapı, CNT'lerin pek çok sıra dışı mekanik, kimyasal ve elektriksel özelliklerinden sorumludur.

CNT'lerin iki tür formu vardır:

1-Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT)
2-Çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)

Tek duvarlı karbon nanotüp tipik olarak 0,6-2 nm çapa sahiptir ve çok duvarlı karbon nanotüp ’den daha az kusur ve daha yüksek tutarlılık sunar.

Çok duvarlı karbon nanotüp 'ün çapı genellikle 2 nm ila 100 nm arasında değişir, hatta bazen yüzlerce nanometreye ulaşır, bu da tüp duvarında yoğun şekilde dağılmış iğne deliği benzeri kusurlara yol açar (J Torkan).

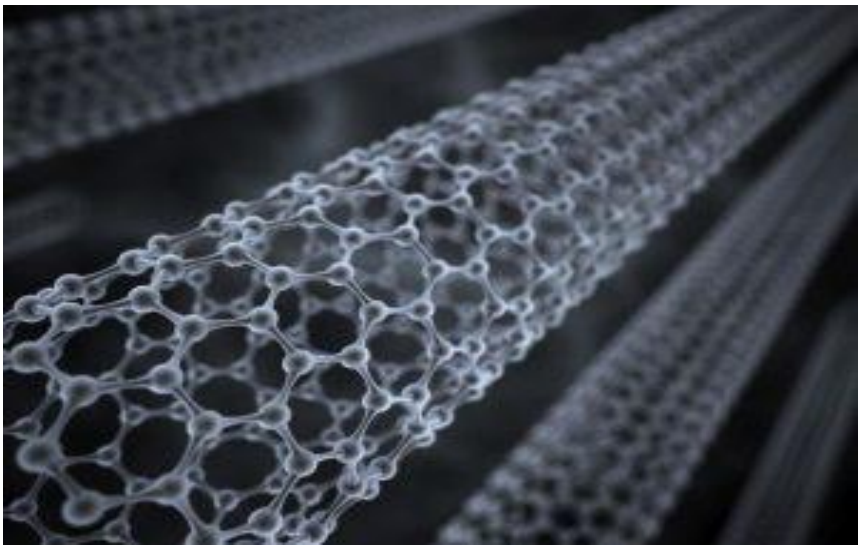
CNT'ler, çimento matrisinde yüksek oranda dağıldıklarında basınç dayanımını, eğilme dayanımını ve kırılma özelliğini iyileştirebildikleri için, karbon nanotüpler inşaat mühendisliği alanında yeni bir çimento katkı maddesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, karbon nanotüplerin zemin iyileştirme için bir katkı maddesi olarak kabul edilmiş, tatmin edici bir performansa sahip olduğu bulunmuştur. Bazı bilim adamları killi zemine CNT'ler eklemişler ve CNT'lerin eklenmesinin içsel sürtünme açısında bir artışa ve kohezyonda bir azalmaya yol açtığını bulmuşlardır. Ayrıca, CNT'lerin eklenmesi, çimento takviyeli zemin için iyileştirme etkisini artırabilir. Bunun nedeni, Karbon Nanotüpler tarafından doldurulan boşlukların en aza indirilmesi ve zemin kütlesinin daha yoğun hale gelmesidir (J Torkan).

Bununla birlikte, daha fazla CNT, çimento ve zemin partikülleri arasındaki potansiyel bağı engelleyecektir ve bu nedenle, aşırı CNT'ler, numunede sünek bir davranışa neden olabilecek, sertliği ve kırılma noktasındaki gerinmeyi azaltacaklardır.

Ayrıca, CNT'ler sadece bir zemin numunesi için mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamakla kalmaz, aynı zamanda yüksek düzeyde emici olduklarından zemindeki bazı organik maddeleri (poliaromatik hidrokarbonlar vb.) emmek için de kullanılabilir (J Torkan).

Enzim aktivitesi ve mikroorganizma miktarı, yüzey alanı veya CNT konsantrasyonu ile negatif bir ilişkiye sahiptir. Yüksek CNT konsantrasyonu, zemin mikrobiyal topluluklarını önemli ölçüde değiştirebilir. Zemini olumsuz etkileyebilirler. CNT'lerin zemin takviyesinde potansiyel uygulaması hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (J Torkan).



Şekil 12. Boru şeklindeki olan CNT materyali

Zeminlerde Donma-Çözülme Olayı

Donma-çözülme döngüsü, zeminlerin yapısını önemli ölçüde değiştiren ve dolayısıyla zeminlerin teknik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen bir ayrışma süreci olarak kabul edilir (Güllü & Khudir, 2014).

Sıcaklığın 0 °C altına düştüğü bölgelerde, zemin boşluklarında bulunan su, donma işleminde buz parçacıklarına dönüşür. Sıcaklık 0 °C'nin üzerinde olduğu durumda ise çözülme olarak adlandırılır. Bu tür alanlarda zeminin kışın donma ve soğuğa, ilkbaharda ise çözülmeye, çökmeye ve bozulmaya maruz kalır. Bu donma-çözülme döngüsü, soğuk ülkelerde her yıl zeminin özelliklerinde büyük değişikliklere neden olabilir. Ayrıca birçok çalışma donma-çözülme döngülerinin ince taneli zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki tehlikeli etkilerini göstermiştir, donma-çözülme döngüsünden kaynaklanan zemin iyileştirme girişimleri uygulamada olumlu etki sağlayacaktır (Güllü & Khudir, 2014).

Soğuk iklim şartlarına sahip zeminler, kısmen donmuş, sürekli donmuş ve mevsimsel olarak donmuş alanlarda bulunabilir. Soğuk iklimin sürekli hakim olduğu bölgelerde zemin tamamen donmuş haldedir. Aralıklı olarak soğuk iklime sahip bölgelerde zeminde kısmi donma meydana gelirken, mevsimsel donmada iklim koşullarına göre donma ve çözülme durumu gerçekleşir (Ladanyi & Andersland, 2004).

Tekrarlanan donma ve çözülmeye bağlı olarak zeminlerin toplam boşluk oranı, hafif aşırı konsolide zeminlerde olduğu gibi artabilir veya aşırı konsolide numunelerde olduğu gibi azalabilir, ancak donma ve çözülme, tüm durumlarda etkin boşluk oranında bir artışa neden olmuştur (Konrad, 1989).

Su donduğunda hacmi %9 genişler ve bu genişleme kayaların kaymasına veya çatlamasına sebebiyet verebilir (Tsytovich, 1975).

Zeminde meydana gelen donma ve çözülme olayından sonrası oluşan boşluk oranı, zeminin mukavemet özelliklerini olumlu olarak etkilememektedir(Güllü & Khudir, 2014).

Donma ve çözülme sonrası zemin mukavemetinin kaybı binalara, yollara, boru hatlarına, kazıklara, sulama kanallarına, otoyollara, demiryollarına ve benzeri sanat yapılarına ciddi zararlar verebilir.

Mukavemette meydana gelen azalma, zeminin donma-çözülme devir sayısına bağlıdır ve devir sayısındaki artış mukavemet kaybını artırır. Donma ve çözülme sonrası zemin mukavemetinin kaybı binalara, yollara, boru hatlarına, kazıklara, sulama kanallarına, otoyollara, demiryollarına ve benzeri sanat yapılarına ciddi zararlar verebilir (Ladanyi & Andersland, 2004).

Literatür Özetleri

(El Howayek, 2011) bu tezde sunulan araştırma, sodyum piro-fosfatla işlenmiş bentonit karışımın bir alternatif olarak, sıvılaşabilen zeminlerin işlenmesi için laponitin kullanımını laboratuvar şartlarında ölçeklendirilerek çalışılmıştır. Çalışmanın hedefleri;

(a) geoteknik için yeni bir malzeme olan laponitin davranışı,

(b) laponit-su karışımının reolojisi üzerine bir çalışma,

(c) kuru karışımlı ve geçirgen numuneler arasında gözlenen davranışları incelenmiştir. Yapılan bu çalışma, laponit süspansiyonlarının mikro yapısı hakkında yeni bakış açıları sağlamıştır. Bu çalışmada test edilen laponit karışımının çoğu, %3 laponit konsantrasyonuna sahip su kütlelerine göre ve kontrollü bir sıcaklıkta (25 °C) test edilmiştir. Bunun tek istisnası kullanılan malzemelerdir. Amacı sıcaklığın veya laponit konsantrasyonunun reolojik davranış üzerindeki etkisini özel olarak araştırmak olan seçim deneyleri için hazırlanan malzemelerdir. %3'lük değer iki nedenden dolayı seçilmiştir. Birincisi, %3'lük laponit karışımının %10 bentonit süspansiyonuna benzer özelliklere sahip olduğu görülmekte olup, gevşek kumun sıvılaşma hassasiyetini azaltmada etkilidir. İkincisi, hazırlanan kum numunelerinde daha yüksek konsantrasyonlarda (yani %3,25) laponit ile yapılan karışımda sıvılaşmaya karşı daha etkin olduğu belirlenmiş olup, ilave olarak zemindeki suyun ve tuzluluğu üzerindeki etkilerine dikkat çekerek sıcaklığında göz ardı edilmemesi vurgulanmıştır.

(Ajalloeian et al., 2013) bu çalışmada, polivinil asetat (PVA) enjeksiyonunun kumlu zeminin iyileştirmesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Polimerik malzemeyi zemin tanelerinden enjekte edilebilir hale getirmek için, yapışkan polimeri su ile belirli ağırlık yüzdelerinde karıştırmışlardır. Gevşek, orta ve sıkı halde farklı kuru yoğunluklara sahip ince taneli kum, silindirik bir kalıpta hazırlanmış ve bu polimerik grout enjeksiyonuna tabi tutmuşlardır. Kürlenme süresi geçtikten sonra enjeksiyonlu numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Sonuçlarda polimer yüzdesinin arttırılmasının önemli basınç dayanımı ve elastik modül artışına yol açtığını göstermişlerdir. Öte yandan, polimer konsantrasyonunun artmasıyla gevşek kumun, orta ve sıkı kuma kıyasla daha yüksek basınç dayanımı ve elastik modül gelişimi gösterdiğini belirtmişlerdir.

(Ochoa-Cornejo et al., 2016) bu makalede, plastisite indeksi %1000'i aşan sentetik bir nanokil olan laponit kumunun kuru kütlesinin küçük yüzdelerinin (%1-5) varlığının, 15-25'te rölatif sıkılığa sahip kumun döngüsel tepkisi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çalışma, kuru koşullar altında kum ve laponitin plüviye edilmesiyle hazırlanan ve daha sonra su geçirimliliği uygulanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen döngüsel üç eksenli deneylere dayanmaktadır. %1 laponit, döngüsel direnci artırarak ilk yükleme döngüsü sırasındaki tepkiden sıvılaşmaya kadar döngüsel deneylerin tüm aşamalarını etkilediği belirtilmiştir. Daha uzun bir kesme öncesi yaşlanma süresi veya daha yüksek dozlarda (%3-5) laponit ile daha fazla fayda gözlendiği ifade edilmiştir.

Sunulan sonuçlar, yüksek plastik ince tanelerin kumların döngüsel tepkisi üzerindeki etkilerine, ince tanelerin plastisitesinin "aşırı" etkilerine dair yeni bilgiler sağladığı ve sıvılaşmayı azaltmak için laponitin olası kullanımının önemli olduğunu ifade etmektedir.

(Mele et al., 2018) bu çalışmada, gevşek doygun kumun geoteknik özellikleri üzerindeki %1 laponit ilavesinin etkisini değerlendirmek için ödometre, drenajsız ve drenajlı deneyler yapılmıştır. Tek boyutlu konsolidasyon testlerinin sonuçları, laponit ilavesinin ana kumun sıkıştırılabilirliğini etkilemediğini göstermişlerdir. Ancak, drenajsız deneyler, laponitin parçacıklar arasındaki sürtünmeyi azaltabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, laponitin geri kazanma yeteneği, iyileştirilmiş numunelerin bir dizi üç döngüsel yükleme aşamasına tabi tutulmasıyla değerlendirilmiştir. Bu numuneler, benzer bağıl yoğunluğa sahip iyileştirilmemiş kum numunelerine kıyasla sıvılaştırmak için 100 kata kadar daha fazla döngü gerektiği belirtilmiştir.

(Pardo Tobar, 2019) çalışmasında, zemin sıvılaşmasının depremler sırasındaki hasarlarda en büyük etken olduğunu ve bu etkilerinin anlaşılması ve hafifletilmesi konusunda ilerleme kaydedilmiş olsa da, zemindeki sıvılaşmanın hala devam etmekte olduğunu belirtmiştir. Ek olarak, atıklar ve karbon emisyonları endişe verici oranlarda artmakla beraber zeminin stabilize etmek için yeni alternatiflere her zaman ihtiyaç duyulacağı belirtilmiştir. Bu çalışmada, sürdürülebilir özelliklere sahip iki malzeme olan laponite ve biochar'ın, kum bir zeminde sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Laponit, gözenek suyunun viskozitesini değiştirerek onu bir jele dönüştürebilen, viskozitesi ve kayma modülü zamanla artan sentetik bir kildir. Bu özelliğinden dolayı esnek bir malzeme olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmanın sonuçları, bu malzemelerin zemindeki sıvılaşmasını azaltmak için sürdürülebilir alternatifler olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğuna dair kanıt sağlamaktadır. Ayrıca, bu çalışma kullanılan bu malzemelerin döngüsel direnci iyileştirebileceği mekanizmayı anlamak için bir başlangıç noktası sunacağını belirtmiştir.

(Huang et al., 2019) çalışmalarında, zemin sıvılaşmasını azaltmak için yönelik araştırmalar, bir element ölçeğinde laponit nanoparçacıkları ile işlenmiş kum zemininin etkinliğini göstermiştir. Bununla birlikte, ilk kez, bu çalışmada bir kum-laponit temeli üzerinde dinamik santrifüj modeli testi incelenmiştir.

Sonuç olarak, kum-laponit temel (%3 konsantrasyon) sıvılaşma direncini artırır ve hafifletme etkileri hem aşırı boşluk basıncının hem de kayma gerilmesinin azalmasıyla karakterize edilir. Ayrıca, laponit dağılımının varlığı, zemin parçacıklarının hareketliliğini kısıtlayarak, yanal yer değiştirme ve zemin oturmasında azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir.

(Fard et al., 2020) Çalışmasının amacı, sürekli donma-çözülme döngüleri altında zeminin direncini ve mukavemetini arttırmaktır. Bunun için ince taneli zemine polivinil asetat (PVAc) ve etilen glikol monobütil eter (EGBE) karışımı ilave edilmiş ve nihai numuneler farklı donma-çözülme döngülerinde test edilmiştir. PVAc, zemin ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranında kullanılmıştır.

Numuneler donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuş ve farklı döngülerde test yapılmıştır. Sonuçlar, PVAc ve EGBE(etilen glikol monobütil eter) karışımının eklenmesinin, numunelerin donma-çözülme döngüsüne karşı dayanıklılığını ve dayanıklılığını iyileştirdiğini gösterdi. Numunelerin davranışı şekilleri, karışımın farklı yüzdeleri için değişkenlik göstermiştir. Sonuçlar, PVAc miktarını %1'den %2'ye çıkarmanın, nihai stres üzerinde %2'den %3'e çıkarmaktan daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade edilmiştir.

(Tobar & Orense, 2021) bu çalışmasında , %1 oranında laponit katılarak, gevşek ve doygun bir kum zemini üzerinde art arda gelen deprem yükleri karşısındaki davranış şekli hakkında fikir vermektedir. Laponit, içinde dağıldığı sıvının davranışını değiştirebilen, başlangıçta düşük viskoziteye sahip ve zamanla sertleşen bir nanomalzemedir. Ek olarak, kayma gerilimi kaldırıldıktan sonra jel geri kazanıldığı için esnek özelliklere sahiptir Laponit, bir dizi depremden sonra sıvılaşmayı azaltmak için bir seçenek olarak sağlayabileceği ve iyileştirme amacıyla kullanılma potansiyeline sahip olduğunu vurgulamıştır.

(Getchell et al., 2022) bu makalede, iki numune hazırlama prosedürü kullanılarak küçük miktarlarda Laponit (kumun kütlesine göre %1) ilave edilerek modifiye edilmiş gevşek (Dr < %30) Ottawa kumu üzerinde bir dizi deneyler yapmışlardır. Rezonant kolon ve monoton drenajsız üç eksenli testlerin sonuçları, iki prosedürün geniş bir gerinim aralığında işlenmiş kumun özellikleri üzerindeki etkilerini göstermişlerdir. İki prosedür tarafından üretilen farklı yapılar, küçük ile orta gerilimlerde farklı davranışlar gösterdiğini belirtmişlerdir.

Daha önce kum-Laponit numuneleri için bildirilen taneden taneye bağlanma, yalnızca kuru karışımlı numunelerde gözlenmiştir. Gözenek sıvısı bir jel yapısı geliştirdikçe ve bu jelin akma gerilmesi arttıkça, azalan aşırı boşluk suyu basıncı ve artan genişleme davranışı gözlendiği ifade edilmiştir.

Numune hazırlama tekniğinden bağımsız olarak, tüm numuneler temiz kumla aynı kritik duruma ulaştığı belirtilmiştir.

(Siddique et al., 2023) bu çalışmada, tam doygun koşullarda boşluk suyu basıncının gelişimini azaltmak için laponitin kumla karıştırılması, kumun dayanım özelliklerinin değerlendirilmesi için incelenmiştir. Çalışmada, bir dizi üç eksenli deneyde laponit konsantrasyonunun ve dinlenme süresinin etkisi araştırılmıştır.

Şeffaf jelin iyi reolojik özelliği nedeniyle az miktarda laponitin bile kum-laponit numunelerinde boşluk suyu basıncı oluşumunu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermişlerdir. Kum-laponit numunelerin elastisite modülünün saf kumun neredeyse iki katı olduğu da bulunmuştur. Ek olarak, kum-laponit numunelerinin sürtünme açısındaki ve kohezyonundaki değişimler, dört laponit konsantrasyonu ile üç farklı sıcaklık için doğrudan kesme kutusu deneyleri ile incelemişlerdir. Düşük laponit içeriklerinde sıcaklığın etkisinin, yüksek laponit içeriklerine göre daha belirgin olduğu bulunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapısal görüntüleme, gözenek basıncı oluşturma mekanizması ile bağlantılı olarak değerlendirilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

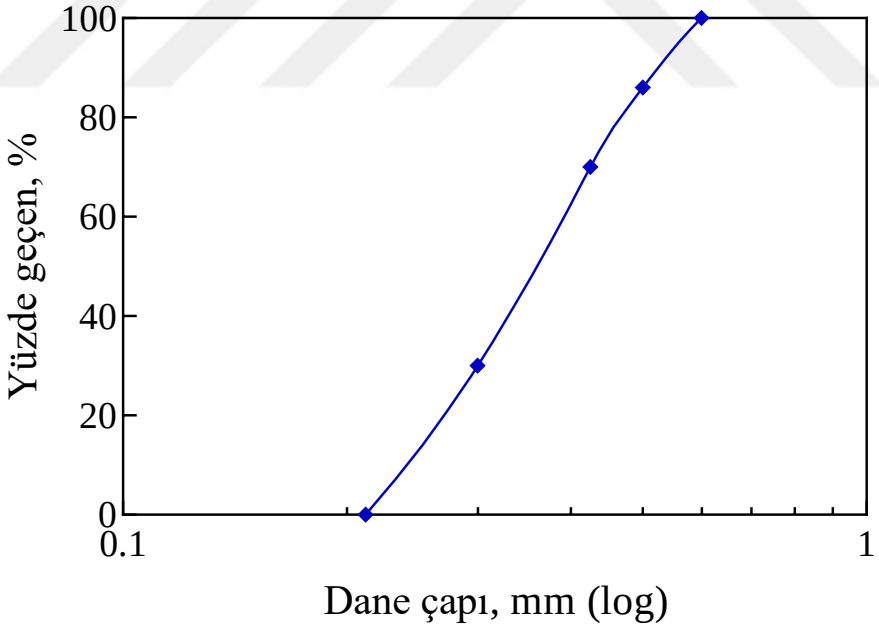
Deneylerde kullanılan kumun özellikleri

Bu araştırma konusu için Erzurum'daki kum ocağından alınan malzeme, Atatürk Üniversitesi Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği laboratuvarına getirilmiştir. Deneylerde kullanılan kum Şekil 13'de gösterilmiştir.

Şekil 13. Deneylerde kullanılan kum

Kum 200 Nolu elek üzerinde yıkanmış daha sonra etüvde 24 saat 105 °C'de kurutulmuştur (Şekil 14). Etüvde kurutulan zemin üzerinde ASTM D22 standardına göre elek analizi yapılmıştır. İyileştirme deneylerinde 0,212 mm çaplı elek ile 0,6 mm çaplı elek arasındaki zemin kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan zeminin dane çapı dağılım eğrisi Şekil 15'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan zeminin indeks özellikleri Tablo 3'de verilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre zemin sınıfı kötü derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenmiştir. İyileştirme deneyleri % 20 doğal su içeriğinde (w_n) gerçekleştirilmiştir.

Şekil 14. Kum zeminin etüvde kurutulması



Şekil 15. Deneylerde kullanılan kum zemininin tane çapı dağılım eğrisi

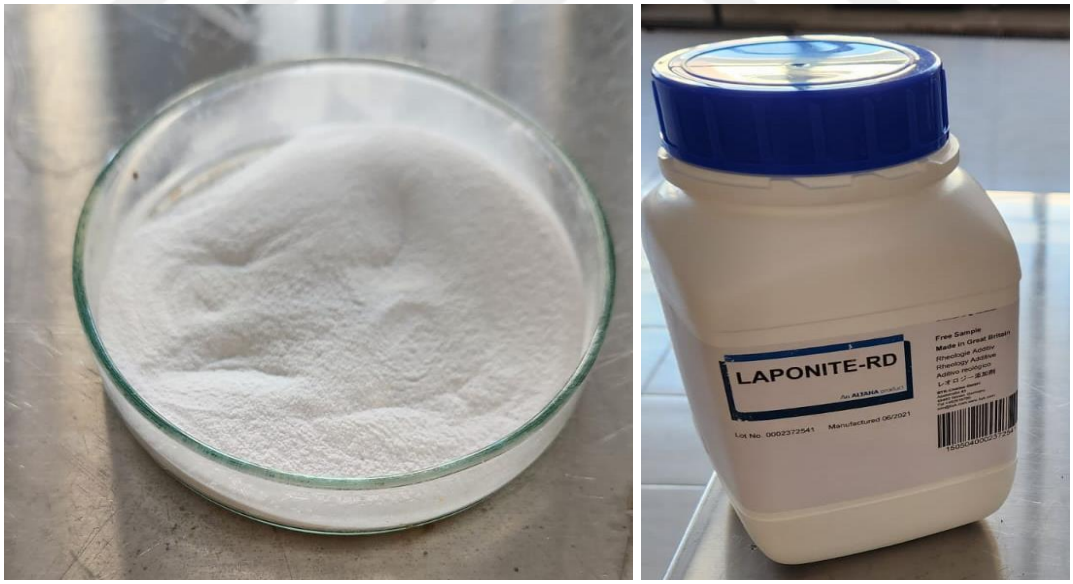
Tablo 3. Deneylerde Kullanılan Kum Zemine Ait İndeks Özellikleri

İndeks Özellikleri	Birim	Değer
Zemin Sınıfı (USCS'ye göre)[a]	-	SP
Özgül ağırlık, Gs[b]	-	2,64
Maksimum boşluk oranı, e_{max}	-	1,10
Minimum boşluk oranı, e_{min}	-	0,70
D_{10}	mm	0,24
D_{30}	mm	0,30
D_{60}	mm	0,39
Uniformluk Katsayısı C_u[a]	-	1,63
Derecelenme Katsayısı C_c[a]	-	0,96
Maksimum Kuru yoğunluk, γ_{kmax}	kN/m^3	15,20
Minimum Kuru yoğunluk, γ_{min}	kN/m^3	12,33
Doğal su muhtevası, w_n[c]	%	20

[a]ASTM D2487, [b]ASTM D854, [c]ASTM D2216

Deneylerde Kullanılan Laponitin Özellikleri

İyileştirme deneylerinde Kent Kimya tarafından tedarik edilen Laponite-Rd malzemesi kullanılmıştır (Şekil 16). Laponit-Rd'in fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.



Şekil 16. Deneylerde kullanılan Laponit-Rd

Tablo 4. Deneylerde Kullanılan Laponit-Rd'nin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

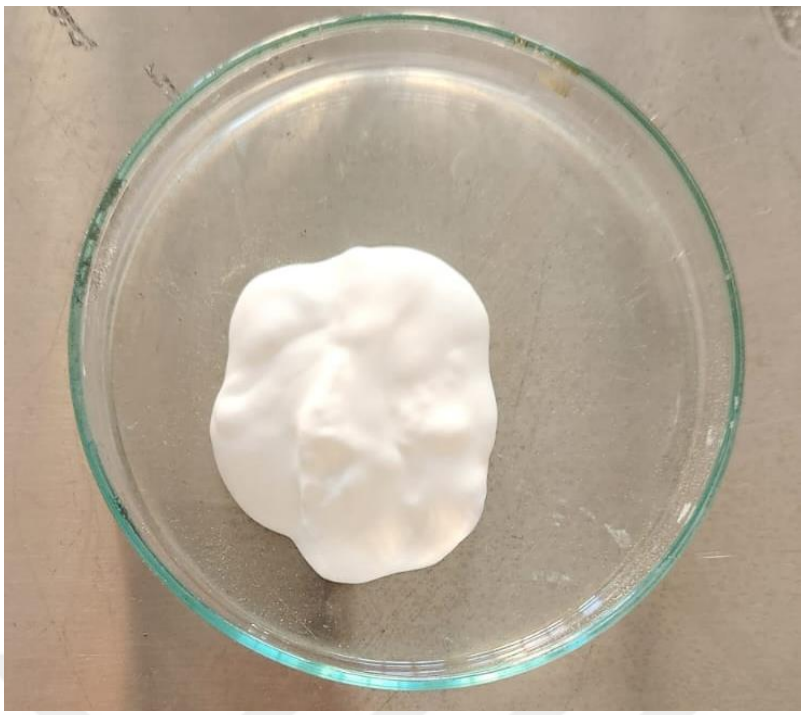
Fiziksel Durum	Toz
Renk	Beyaz
Koku	Kokusuz
Koku Eşiği	Kullanılabilir veri yok.
Ph	9,8
Konsantrasyon	20 g/l (dağılım olarak)
Erime noktası/aralığı	Uygulanamaz
Kaynama noktası/kaynama aralığı	Uygulanamaz
Buhar basıncı	< 0,0001 hPa
Parlama noktası	Uygulanamaz
Alt patlama limiti	Uygulanamaz
Buharlaşma oranı	Uygulanamaz
Üst patlama limiti	Uygulanamaz
Yoğunluk	2,53 g/cm^3 (68 °F (20 °C))
Kimyasal kararlılık	Kararlı
Kimyasal yapısı	Sentetik (modifiye edilmiş) fillosilikat

Deneylerde Kullanılan Polivinil Asetat (PVAc)

Deneylerde kullanılan polivinil asetatın özellikleri Tablo5'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan Polivinil Asetat Şekil 17'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Deneylerde Kullanılan Polivinil Asetatın Özellikleri

Fiziksel Durum	Viskoz Sıvı
Renk	Beyaz
Kimyasal Formülü	(C4H6O2)n
Molar kütle başına	86,09 g/mol
Yoğunluk	1,19 g/cm^3 (25 ^{0}C)
Kaynama noktası	112 ^{0}C
PH	3-5,5



Şekil 17. Deneylerde kullanılan Polivinil Asetat

Yöntem

Bu bölümde deneyler ve analizlerde kullanılacak numunelerin hazırlanışı, deney prosedürü ve analizleri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışma kapsamında, Erzurum'daki kum ocağından getirilen zemin üzerinde elek analizi, özgül ağırlık, maksimum kuru birim ağırlık, minimum kuru birim ağırlık gibi tanımlama deneyleri yapıldıktan sonra kum zemin Laponit-Rd ve Polivinil Asetat (PVAc) katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmiş, 7 ve 14 gün sonundaki serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

Ayrıca, 14 gün kür edilmiş numuneler 10 donma-çözülme çevriminde tabi tutulmuş, donma- çözülme çevriminden sonraki ağırlık kayıpları ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Katkıların serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler Dr=%50 rölatif sıkılıkta gerçekleştirilmiştir. Deneylerde w_n=%20 doğal su içeriği kullanılmıştır. Deney programı Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Deney Programı

NO	Laponit-Rd (%)	Polivinil Asetat (PVAc) (%)
P01	0	10
P02	0	15
P03	0	20
P11	0,5	10
P21	1	10
P31	2	10
P41	3	10
P12	0,5	15
P22	1	15
P32	2	15
P42	3	15
P13	0,5	20
P23	1	20
P33	2	20
P43	3	20

İyileştirme deneylerinde 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde Polivinil Klorür (PVC) kalıplar kullanılmıştır. İyileştirme deneylerinde Laponit- Rd ve Polivinil Asetat (PVCa) yüzdeleri suyun ağırlıkça yüzdesi şeklinde kullanılmıştır. Deneyi prosedürü aşağıda verilmiştir.

- Ağırlıkları hesaplanan su ve PVCa yüksek hızlı karıştırıcıda iki dakika sureyle karıştırılmış,
- Başka bir kapta ağırlıkları belli olan kum ve laponit-Rd kuru halde homojen hale gelinceye kadar karıştırılmış,
- Sıvı halde bulunan su ve PVCa karışımı kuru haldeki kum laponit karışımına ilave edilmiş ve homojen hale gelinceye kadar karıştırılmış,
- Homojen hale gelen kum, PVCa ve laponit karışımı 5 cm iç çapa ve 10 cm yüksekliğe sahip PVC kalıplara 3 tabaka halinde istenilen rölatif sıkılıkta yerleştirilmiş ve kür olması için 40 ^{0}C sıcaklığındaki etüve yerleştirilmiş,
- 3 gün kalıpla birlikte kürde bekletilen numuneler kalıplardan çıkarılmış ve tekrar 7 ve 14 kür süresi sonundaki deneylere tabi tutulmak için etüve konulmuş,
- 7 ve 14 gün kür süresi sonunda etüvden çıkarılan numunelere üzerinde, serbest basınç deneyi yapılmış ve 14 gün küresi sonundaki numunelerin donma-çözülme çevriminden sonra ağırlık kaybı ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

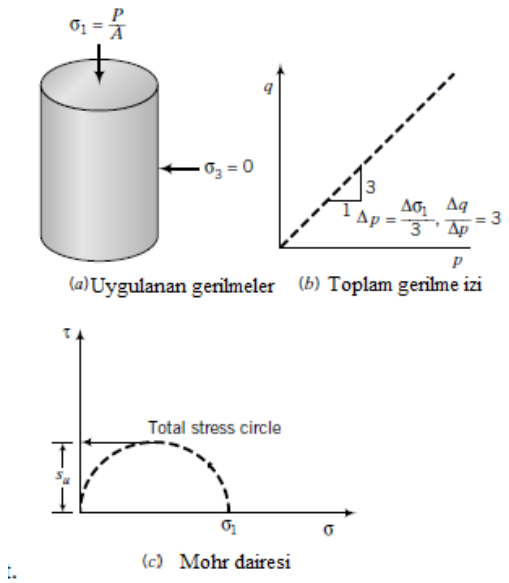
Her bir deney 3 kez tekrar edilmiş ve ortalamaları alınmıştır. Hazırlan numunelerinden örnekler Şekil 20'de gösterilmiştir.

Şekil 20. Hazırlanan deney numuneleri

Serbest basınç deneyi

Bu deney, eksenel yükün deformasyon kontrollü uygulaması ile örselenmemiş veya sıkıştırılmış durumda kohezyonlu zeminin serbest basınç dayanımının belirlenmesini kapsar. Kayma dayanımın en kolay ölçümü, silindirik şeklindeki zemin numunesine yalnızca eksenel yönde bir yük altında kırılmasıdır. Bu deneyde, silindirik zemin numunesi sadece eksenel yönde yüklenir. Serbest basınç deneyinde, yükün artışı ile numunedeki boyda azalma ölçülür ve gerilme şekil değiştirme eğrileri oluşturulur (Tumluer 2006). Serbest basınç deneyinde numuneye radyal gerilim uygulanmaz (σ_3=0). Eksenel (piston) yük zemin numunesi kırılıncaya kadar hızla arttırılır. Numune sabit hacimde kesilir. Kırılmaya sebep olan yükün numunenin en kesit alanına bölünmesiyle serbest basınç mukavemeti (σ_1=q_u) belirlenmiştir. Serbest basınç deneyi için gerilmeler, gerilme izi ve Mohr dairesi Şekil 21'de gösterilmiştir.

Deney cihazında, biri sabit diğeri düşey yönde hareketli iki plaka, yük hücresi ve 2 adet lineer potansiyometrik cetvelden (LVDT) oluşmaktadır.



Şekil 21. Serbest basınç deneyinde gerilmeler, gerilme izi ve Mohr dairesi (Budhu 2010)

Bu deney ASTM D 2166 standartlarına göre yapılmıştır. Numunenin alt ve üst yüzeyleri, test cihazının alt ve üst başlarının ortasına yerleştirilmiştir. Yük hücresi ve LVDT'ler ayarlanır. Yükleme hızı, numunenin kısalması (%0,5-2) numune uzunluğu olacak şekilde ayarlanır. Numuneye düşey yönde yük verilir ve belli aralıklarla numunedeki boy kısalması ve düşey yükler kayıt edilir. Numune kırılıncaya kadar hızlı bir şekilde yüklenir. Serbest basınç deney aleti Şekil 22'de gösterilmiştir.

Hazırlanan numunelerin 7 ve 14 günlük kür süresi sonunda serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca, 10 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış 14 günlük numunelerin de serbest basınç mukavemetleri de belirlenmiştir.

(a) (b) (c)

Şekil 22. (a)Serbest basınç deney aleti, (b)Yükleme yapılmadan önce, (c)Yükleme yapıldıktan sonra

Donma-çözülme deneyi

Hazırlanan polivinil astetat ve laponit + polivinil asetat katkılı zemin numuneler üzerinde 10 donma-çözülme çevriminden sonra serbest basınç deneyleri yapılarak serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca, donma-çözülme öncesi ve sonrası oluşan ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler kür süreleri sonunda alüminyum folyo ile sarılarak 10 çevrim için donma-çözülme cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 23).

(a)

(b)

(c)

Şekil 23. (a)Donma-çözülme cihazı, (b)cihaza konulmak üzere hazırlanan numuneler ve (c) cihaza konulan numuneler

Donma -çözülme çevrimine tabi tutulmuş numunelerin ağırlık kayıpları belirlenmiş ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Donma-çözülme işlemi için hazır hale getirilmiş numuneler cihaza yerleştirildikten sonra, ilk sıcaklığı -20°C'ye ayarlanmış ve 6 saat numuneler bekletilmiştir. Diğer işlem için ise, sıcaklık +25°C'ye kadar ayarlanarak 6 saat hazırlanan numuneler bekletilmiştir. Gerçekleştirilen bu işlem 1 çevrimdir (Zaimoğlu, *et al.* 2013).

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, kötü derecelenmiş bir kum zemin (SP) doğal su ağırlığının %10, %15 ve %20 oranlarında polivinil asetat (PVAc) ve %0,5, %1, %2 ve %3 oranlarında laponit katılarak karıştırılmış ve Dr=%50 rölatif sıkılıkta kalıplara yerleştirilmiştir.7 ve 14 gün kür süresi sonunda numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca, hazırlanan 14 günlük numunelerin 10 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş daha sonra ağırlık kayıpları ve serbest basınç mukavemetleri (UCS) belirlenmiştir.

Aşağıda her bir deneye ait sonuçlar başlıklar halinde sunulmuştur.

Serbest Basınç Deneyi Sonuçları

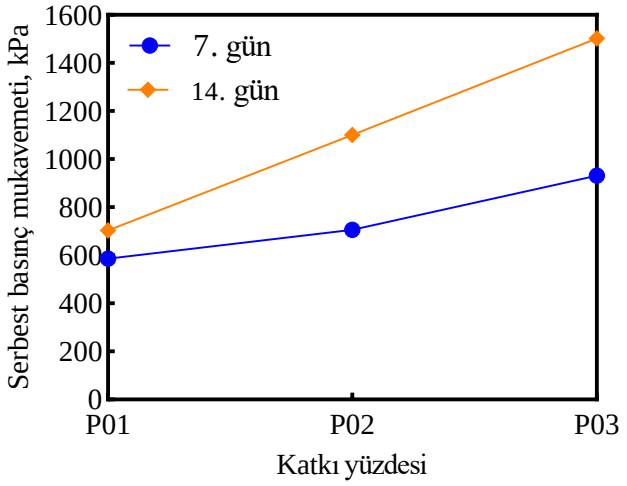
SP kum zemini %50 rölatif sıkılıkta, %20 su muhtevasına sahip ve sadece PVAc katkılı ve laponit+PVAc katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılarak serbest basınç mukavemetleri (UCS) belirlenmiştir. Laponit ve PVAc suyun ağırlıkça yüzdesinde katılmıştır.

Polivinil asetat katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Sadece PVAc katılarak hazırlanmış numunelerin 7 ve 14 günlük UCS değerleri Tablo 7'de ve PVAc katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki serbest basınç mukavemetlerinin PVAc yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 24'de verilmiştir.

Tablo 7. Polivinil Asetat Katkılı Numunelerin UCS değerleri

NO	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
	7.Gün	14.Gün
P01	585,9	702,8
P02	705,4	1100,7
P03	931,8	1502,6



Şekil 24. PVAc katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki UCS değerlerinin PVAc yüzdesine bağlı olarak değişimi

Tablo 7 ve Şekil 24 incelendiğinde, en yüksek UCS değeri %20 PVAc katkılı numunenin 14 gün kür edilmesi ile elde edilmiştir (1502,6 kPa). En düşük serbest basınç mukavemeti ise %10 PVAc katkılı numunenin 7 gün kür edilmesi ile elde edilmiştir (585,9 kPa). Aynı kür süresinde PVAc yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetleri artmıştır. Aynı katkı yüzdesinde, kür süresi arttıkça serbest basınç mukavemetleri de artmıştır. 7 günlük kür süresi sonunda %20 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti, %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden %59 daha yüksek çıkmıştır.

Aynı şekilde, 14 günlük kür süresi sonunda %20 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti, %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık %113 daha yüksek çıkmıştır. %10 PVAc katkılı numunenin 14 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemeti 7 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetinden yaklaşık %20 daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde, %20 PVAc katkılı numunenin 14 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemeti 7 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetinden yaklaşık %61 daha yüksek çıkmıştır. Katkı yüzdesi arttıkça 14 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetinin 7 günlük kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetine göre artış yüzdesi artmıştır.

Tablo 7 ve Şekil 24 incelendiğinde, 7 günlük kür süresi sonunda %15 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti, %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden %20 daha yüksek çıkmıştır.

Aynı şekilde, 14 günlük kür süresi sonunda %15 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti, %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık %69 daha yüksek çıkmıştır. %15 PVAc katkılı numunenin 14 gün kür süresi sonundaki serbest basınç

mukavemeti 7 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetinden yaklaşık %69 daha yüksek çıkmıştır. Katkı yüzdesi arttıkça 14 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetinin 7 günlük kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetine göre artış yüzdesi artmıştır.

Polimer, zemin tanelerini birbirine bağlayarak kumun fiziksel stabilizasyonuna neden olmaktadır. Zeminde herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmemektedir.

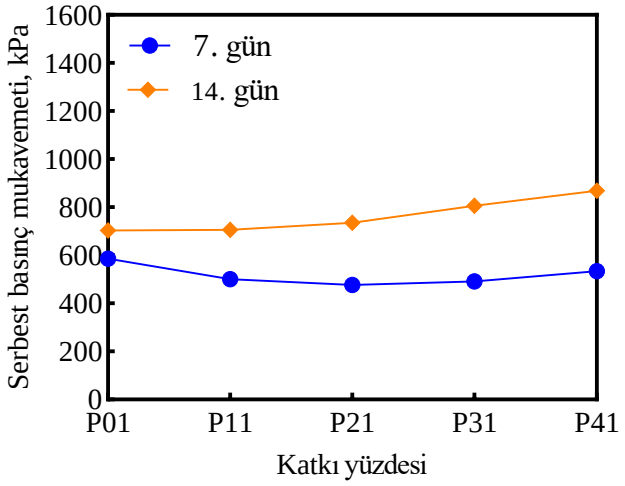
Polivinil asetat ve laponit katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetleri

Polivinil asetat ve laponit katılarak hazırlanmış numunelerin 7 ve 14 günlük UCS değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Laponit ve Polivinil Asetat Katkılı Numunelerin UCS değerleri

NO	Polivinil Asetat (%)	Laponit (%)	Serbest basınç mukavemeti (kPa)	
			7.Gün	**14.Gün**
P01	10	0	585,9	702,8
P02	15	0	705,4	1100,7
P03	20	0	931,8	1502,6
P11	10	0,5	500,1	705,6
P21	10	1	476,4	735,2
P31	10	2	490,9	806,2
P41	10	3	533,4	868,6
P12	15	0,5	699,5	1140,5
P22	15	1	634,1	1170,3
P32	15	2	610,3	1205,3
P42	15	3	684,6	1282,5
P13	20	0,5	836,1	1505,5
P23	20	1	779,8	1526,1
P33	20	2	850,1	1566,5
P43	20	3	880,9	1573,7

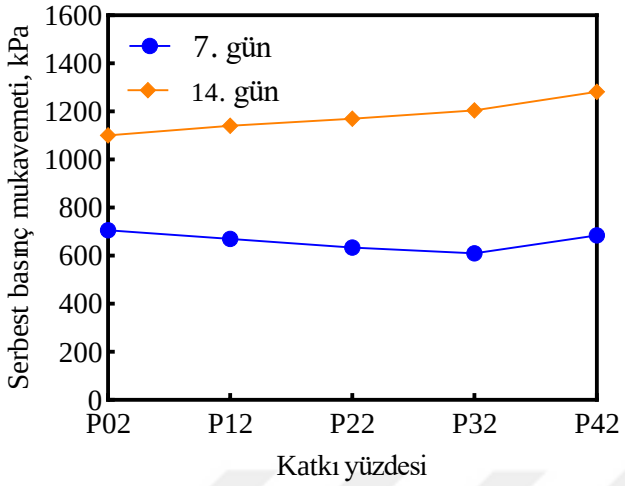
%10 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki serbest basınç mukavemetlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 25'de verilmiştir.



Şekil 25. %10 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki UCS değerlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişim

Tablo 8 ve Şekil 25 incelendiğinde, 14 kür süresi sonunda laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri de artmıştır. Fakat, 7 gün kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri sadece PVAc katkılı numueden elde edilmiştir (585,9 kPa). %10 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde laponitin olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. 14 gün kür süresi sonunda, %10 PVAc ve %3 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 24 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, 14 gün kür süresi sonunda, %10 PVAc ve %2 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 15 daha yüksek çıkmıştır. 14 gün kür süresi sonunda, %10 PVAc ve %1 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %10 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 5 daha yüksek çıkmıştır. 14 günlük kür süresi sonunda, laponit yüzdesi arttıkça sadece PVAc katkılı numuneye göre UCS artış yüzdeleri de artmıştır. 7 gün kür süresi sonunda, laponit'in UCS değerleri üzerinde olmulu bir katkısı görülmemiştir. 7 gün kür süresi sonunda, %3 laponit katklı numunenin UCS değeri sadece PVAc katkılı numuneye göre yaklaşık %10 azalmıştır. Laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki olumlu etkisinin kür süresi arttıkça görülmeye başlandığı söylenebililir. Başka bir ifade ile, laponit katkılı numunelerde kür (sertleşme) süresinin uzadığı söylenebilir. Uzun dönemde nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını doldurarak mukavemet üzerinde olumlu katkısı olduğu düşünülmektedir.

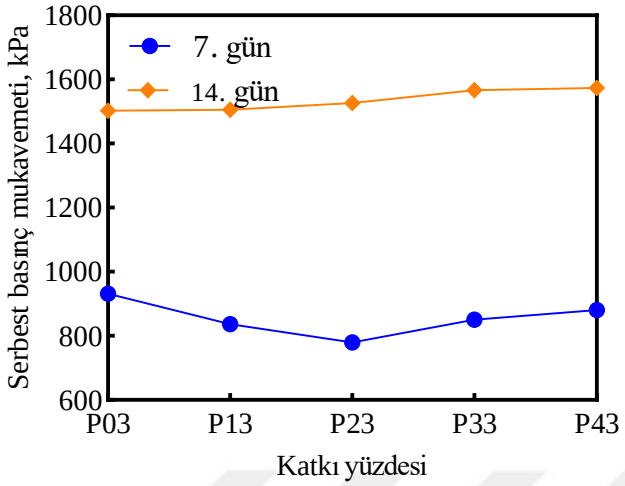
%15 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki serbest basınç mukavemetlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. %15 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki UCS değerlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi

Tablo 8 ve Şekil 26 incelendiğinde, 14 kür süresi sonunda laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri de artmıştır. Fakat, 7 gün kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri sadece PVAc katkılı numueden elde edilmiştir (705,4 kPa). %15 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde laponitin olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. 14 gün kür süresi sonunda, %15 PVAc ve %3 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %15 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 17 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, 14 gün kür süresi sonunda, %15 PVAc ve %2 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %15 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 10 daha yüksek çıkmıştır. 14 gün kür süresi sonunda, %15 PVAc ve %1 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %15 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 6 daha yüksek çıkmıştır. 14 günlük kür süresi sonunda, laponit yüzdesi arttıkça sadece PVAc katkılı numuneye göre UCS artış yüzdeleri de artmıştır. 7 gün kür süresi sonunda, laponit'in UCS değerleri üzerinde olmulu bir katkısı görülmemiştir. 7 gün kür süresi sonunda, %3 laponit katklı numunenin UCS değeri sadece PVAc katkılı numuneye göre yaklaşık %3 azalmıştır. Laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki olumlu etkisinin kür süresi arttıkça görülmeye başlandığı söylenebililir. Başka bir ifade ile, laponit katkılı numunelerde kür (sertleşme) süresinin uzadığı söylenebilir. Uzun dönemde nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını doldurarak mukavemet üzerinde olumlu katkısı olduğu düşünülmektedir.

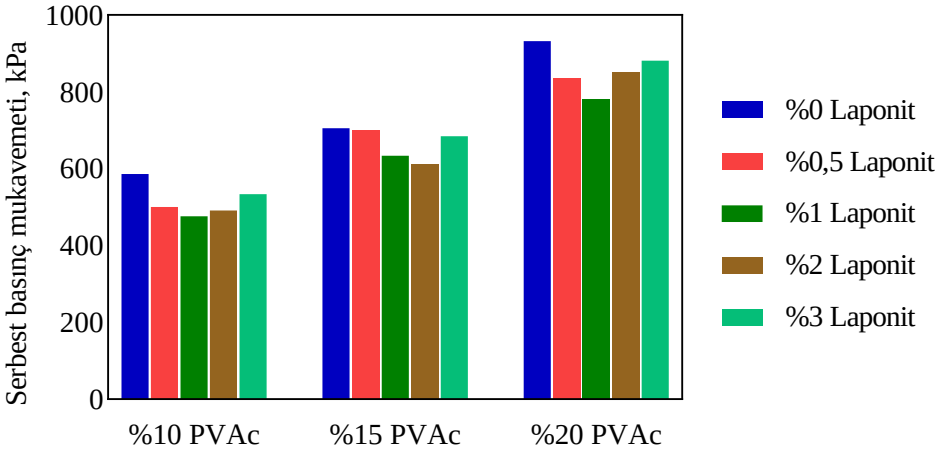
%20 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. gündeki serbest basınç mukavemetlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi Şekil 27'de verilmiştir.



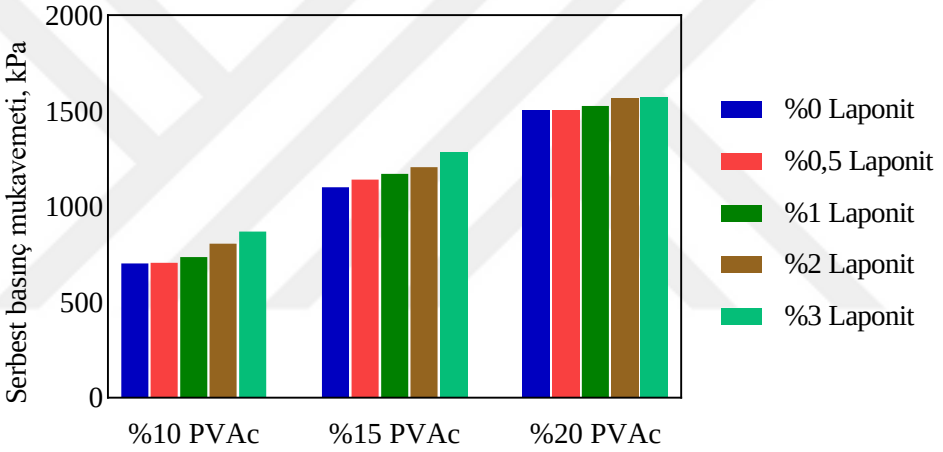
Şekil 27. %20 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7. ve 14. UCS değerlerinin laponit yüzdesine bağlı olarak değişimi

Tablo 8 ve Şekil 27 incelendiğinde, 14 kür süresi sonunda laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri de artmıştır. Fakat, 7 gün kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri sadece PVAc katkılı numueden elde edilmiştir (931,8 kPa). %20 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde laponitin olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. 14 gün kür süresi sonunda, %20 PVAc ve %3 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %20 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 5 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, 14 gün kür süresi sonunda, %20 PVAc ve %2 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %20 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 4 daha yüksek çıkmıştır. 14 gün kür süresi sonunda, %20 PVAc ve %1 laponit katkılı numunenin serbest basınç mukavemeti sadece %20 PVAc katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinden yaklaşık % 2 daha yüksek çıkmıştır. 14 günlük kür süresi sonunda, laponit yüzdesi arttıkça sadece PVAc katkılı numuneye göre UCS artış yüzdeleri de artmıştır. 7 gün kür süresi sonunda, laponit'in UCS değerleri üzerinde olmulu bir katkısı görülmemiştir. 7 gün kür süresi sonunda, %3 laponit katklı numunenin UCS değeri sadece PVAc katkılı numuneye göre yaklaşık %9 azalmıştır. Laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki olumlu etkisinin kür süresi arttıkça görülmeye başlandığı söylenebililir. Başka bir ifade ile, laponit katkılı numunelerde kür (sertleşme) süresinin uzadığı söylenebilir. Uzun dönemde nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını doldurarak mukavemet üzerinde olumlu katkısı olduğu düşünülmektedir. PVCa katkısı arttıkça loponitin UCS üzerindeki olumlu etkisininin azaldığı görülmüştür.

PVCa ve laponit ile muamele edilmiş numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemetleri Şekil 28'de 14 günlük mukavemetleri ise Şekil 29'da gösterilmiştir.



Şekil 28. PVAc ve laponit ile muamale edilmiş numunelerin 7 günlük UCS değerleri



Şekil 29. PVAc ve laponit ile muamale edilmiş numunelerin 14 günlük UCS değerleri

Tablo 8 ve Şekil 28 incelendiğinde, 7 günlük kür süresinde laponit yüzdesinin UCS değerleri üzerinde olumlu bir etkisi olmadığı görülmüştür. 7 günlük kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri sadece %20 PVAc katkılı numuneden elde edilmiştir (931,8 kPa). 7 günlük kür süresi sonunda, en düşük UCS değeri %10 PVAc ve %1 laponit katkılı numuneden elde edilmiştir (476,4 kPa). Sabit PVAc değerinde laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri azalmış sonra bir miktar artmıştır.

Tablo 8 ve Şekil 29 incelendiğinde, 14 günlük kür süresinde laponit yüzdesinin UCS değerleri üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. 14 günlük kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri %20 PVAc ve %3 laponit katkılı numuneden elde edilmiştir (1573,7 kPa). 14 günlük kür süresi sonunda, en düşük UCS değeri sadece %10 PVAc katkılı numuneden elde edilmiştir (702,8 kPa). Sabit PVAc değerinde laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri artmıştır. PVAc yüzdesi arttıkça laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki artış yüzdesi azalmıştır.

Tablo 8, Şekil 28 ve 29 incelendiğinde, 14 gün kür süresi sonunda laponit'in serbest basınç mukavemeti arttırdığı ama 7 günlük kür süresi sonunda da serbest basınç mukavemetini düşürdüğü görülmüştür. Bu sonuçla, laponitin PVAc ile kullanılması durumunda kür süresini uzattığı görülmüştür. Uzun dönemde nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını doldurarak mukavemet üzerinde olumlu katkısı olduğu düşünülmektedir.

PVAc ve laponit, zemin tanelerini birbirine bağlayarak kumun fiziksel stabilizasyonuna neden olmaktadır. Zeminde herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmemektedir.

Donma-Çözülme Deney Sonuçları

Tez çalışması kapsamında SP kum zeminine %10, %15 ve %20 oranlarında PVAc ve %0,5, %1, %2 ve %3 oranlarında laponit karıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler 14 günlük kür süresine maruz bırakılmıştır. Kür tamamlandıktan sonra numuneler 10 çevrimlik donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmış numuneler üzerinde serbest basınç deneyi yapılmış ve ağılık kayıpları belirlenmiştir.

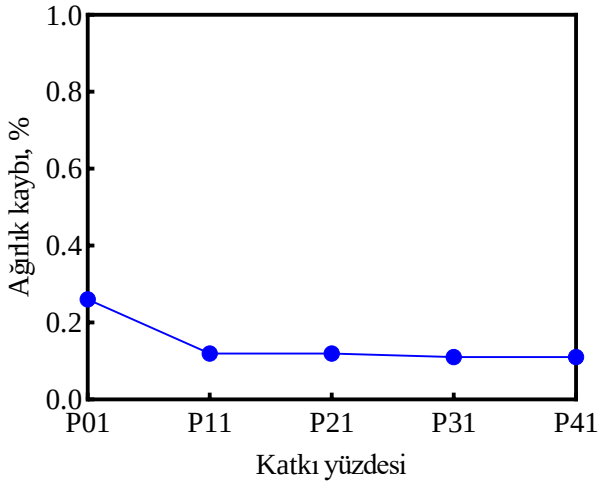
Donma-çözülme döngüleri sonunda elde edilen UCS değerleri ve ayrıca numunelerin donma-çözülme sonucunda ağırlık kayıpları da hesaplanmıştır.

%10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme deney sonuçları

%10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 çevrimlik donma-çözülme döngüleri sonunda elde edilen ağırlık kayıpları Tablo 9 ve Şekil 30'da sunulmuştur.

Tablo 9. %10 PVAc ve %10 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin 10 Donma-Çözülme Çevrimi Sonucu Oluşan Ağırlık Kayıpları

Deney Grubu	Ağırlık Kaybı (%)
	14.gün
P01	0,26
P11	0,12
P21	0,12
P31	0,11
P41	0,11



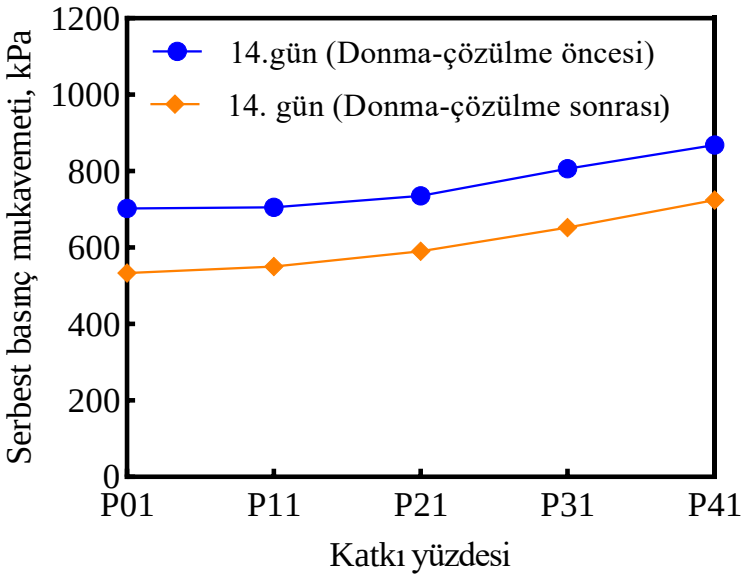
Şekil 30. %10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 donma-çözülme çevrimi sonu oluşan ağırlık kayıpları

%10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 çevrim donma-çözülme sonrasında oluşan ağırlık kayıpları genellikle azalmıştır. En yüksek ağırlık kaybı sadece PVAc katkılı numunelerden %0,26 olarak elde edilmiştir. %10 PVAc katkılı numunelerde laponitin ağırlık kaybı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. En düşük ağırlık kaybı %10 PVAc +%2 ve %3 laponit katkılı numunelerden %0,11 olarak belirlenmiştir.

%10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve sonrası elde edilen UCS değerleri Tablo 10 ve Şekil 31'de verilmiştir.

Tablo 10. %10 PVAc ve %10 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri

Deney Grubu	POLİVİNİL ASETAT (%)	LAPONİT (%)	UCS (kPa)	
			14.Gün(Donma-Çözünme Öncesi)	14.Gün14.Gün(Donma-Çözünme Sonrası)
P01	10	0	702,8	533,2
P11	10	0,5	705,6	550,4
P21	10	1	735,2	590,1
P31	10	2	806,2	652,6
P41	10	3	868,6	724,8



Şekil 31. %10 PVAc ve %10 PVAc+ Laponit katkılı numunelerin 14.gün donma-çözülme öncesi ve sonrası UCS değerleri

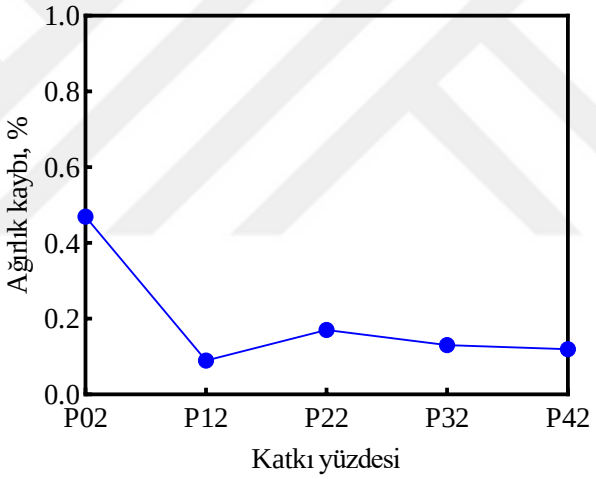
Tablo 10 ve Şekil 31 incelendiğinde, 10 çevrim donma-çözülme çevriminde maruz kalan numunelerin UCS değerleri azalmıştır. %10 PVAc katkılı ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en fazla düşüş sadece %10 PVCa katkılı numuneden yaklaşık %32 olarak en az düşüş ise %10 PVCa ve %3 laponit katkılı numuneden yaklaşık %20 olarak elde edilmiştir. %10 PVAc' de laponit yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetlerindeki düşüş yüzdeleri azalmıştır. Laponitin donma-çözülme davranışı üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Bunun sebebinin nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını daha iyi doldurarak kararlı bir yapı oluşturduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

%15 PVAc katkılı ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme deney sonuçları

%15 PVAc ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 çevrimlik donma-çözülme döngüleri sonunda elde edilen ağırlık kayıpları Tablo 11 ve Şekil 32'de sunulmuştur.

Tablo 11. %15 PVAc ve %15 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin 10 Donma-Çözülme Çevrimi Sonucu Oluşan Ağırlık Kayıpları

Deney Grubu	Ağırlık Kaybı (%)
	14.gün
P02	0,47
P12	0,09
P22	0,17
P32	0,13
P42	0,12



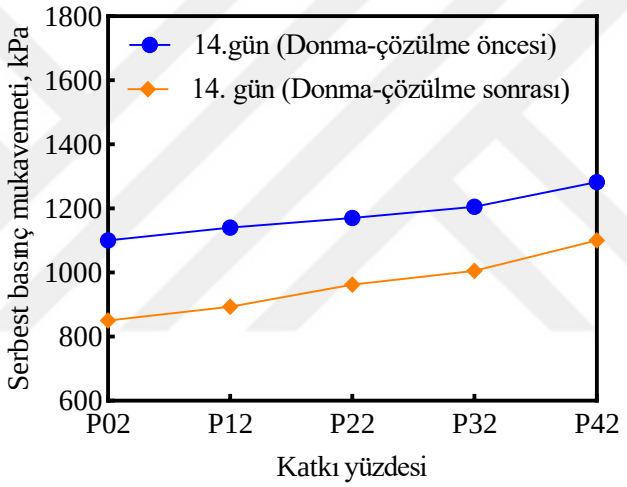
Şekil 32. %15 PVAc katkılı ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 donma-çözülme çevrimi sonu oluşan ağırlık kayıpları

%15 PVAc ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 çevrim donma-çözülme sonrasında oluşan ağırlık kayıpları genellikle azalmıştır. En yüksek ağırlık kaybı sadece PVAc katkılı numunelerden %0,47 olarak elde edilmiştir. %15 PVAc katkılı numunelerde laponitin donma-çözülme çevrimi sonucu oluşan ağırlık kaybı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. En düşük ağırlık kaybı %15 PVAc ve %1 laponit katkılı numunelerden %0,09 olarak belirlenmiştir.

%15 PVAc ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve 10 donma-çözülme çevrimi sonrası elde edilen UCS değerleri Tablo 12 ve Şekil 33'de verilmiştir.

Tablo 12. %15 PVAc Katkılı ve %15 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri

Deney Grubu	POLİVİNİL ASETAT (%)	LAPONİT (%)	UCS (kPa)	
			14.Gün(Donma-Çözünme Öncesi)	14.Gün(Donma-Çözünme Sonrası)
P02	15	0	1100,7	850,8
P12	15	0,5	1140,5	893,2
P22	15	1	1170,3	962,3
P32	15	2	1205,3	1005,7
P42	15	3	1282,5	1100,1



Şekil 33. %15 PVAc ve %15 PVAc+ Laponit katkılı numunelerin 14.gün donma-çözülme öncesi ve sonrası UCS değerleri

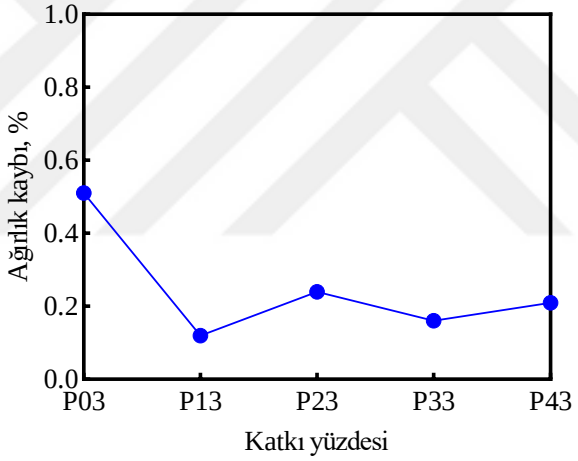
Tablo 12 ve Şekil 33 incelendiğinde, 10 çevrim donma-çözülme çevriminde maruz kalan numunelerin UCS değerleri azalmıştır. %15 PVAc ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en fazla düşüş sadece %15 PVCa katkılı numuneden yaklaşık %29 olarak en az düşüş ise %15 PVCa ve %3 laponit katkılı numuneden yaklaşık %17 olarak elde edilmiştir. %15 PVAc'de laponit yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetlerindeki düşüş yüzdeleri azalmıştır. Laponitin donma-çözülme sonra ağırlık kaybı üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını daha iyi doldurarak PVAc ile daha sağlam ve kararlı bir yapı oluşturduğu, bunun sonucunda donma-çözülme sonrası mukavemet kaybının sadece PVAc katkılı numuneye göre daha az olduğu söylenebilir.

%20 PVAc katkılı ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme deney sonuçları

%20 PVAc katkılı ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 çevrimlik donma-çözülme döngüleri sonunda elde edilen ağırlık kayıpları Tablo13 ve Şekil 34'de sunulmuştur.

Tablo 13. %20 PVAc ve %20 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin 10 Donma-Çözülme Çevrimi Sonucu Oluşan Ağırlık Kayıpları

Deney Grubu	Ağırlık Kaybı (%)
	14.gün
P03	0,51
P13	0,12
P23	0,24
P33	0,16
P43	0,21



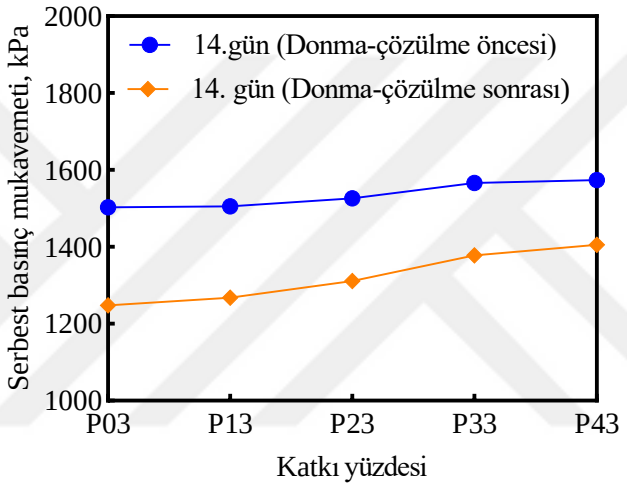
Şekil 34. %20 PVAc ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 donma-çözülme çevrimi sonu oluşan ağırlık kayıpları

%20 PVAc katkılı ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin 10 çevrim donma-çözülme sonrasında oluşan ağırlık kayıpları genellikle azalmıştır. En yüksek ağırlık kaybı sadece PVAc katkılı numunelerden %0,51 olarak elde edilmiştir. %20 PVAc katkılı numunelerde laponitin ağırlık kaybı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. En düşük ağırlık kaybı %20 PVAc ve % 0,5 laponit katkılı numunelerden %0,12 olarak belirlenmiştir.

%20 PVAc ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve 10 donma-çözülme çevrimi sonrası elde edilen UCS değerleri Tablo 14 ve Şekil 35'de verilmiştir.

Tablo 14. %20 PVAc ve %20 PVAc+ Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri

Deney Grubu	POLİVİNİL ASETAT (%)	LAPONİT (%)	UCS (kPa)	
			14.Gün(Donma-Çözünme Öncesi)	14.Gün(Donma-Çözünme Sonrası)
P03	20	0	1502,6	1247,6
P13	20	0,5	1505,5	1267,6
P23	20	1	1526,1	1310,9
P33	20	2	1566,5	1378,2
P43	20	3	1573,7	1405,2



Şekil 35. %20 PVAc ve %20 PVAc+ Laponit katkılı numunelerin 14.gün donma-çözülme öncesi ve sonrası UCS değerleri

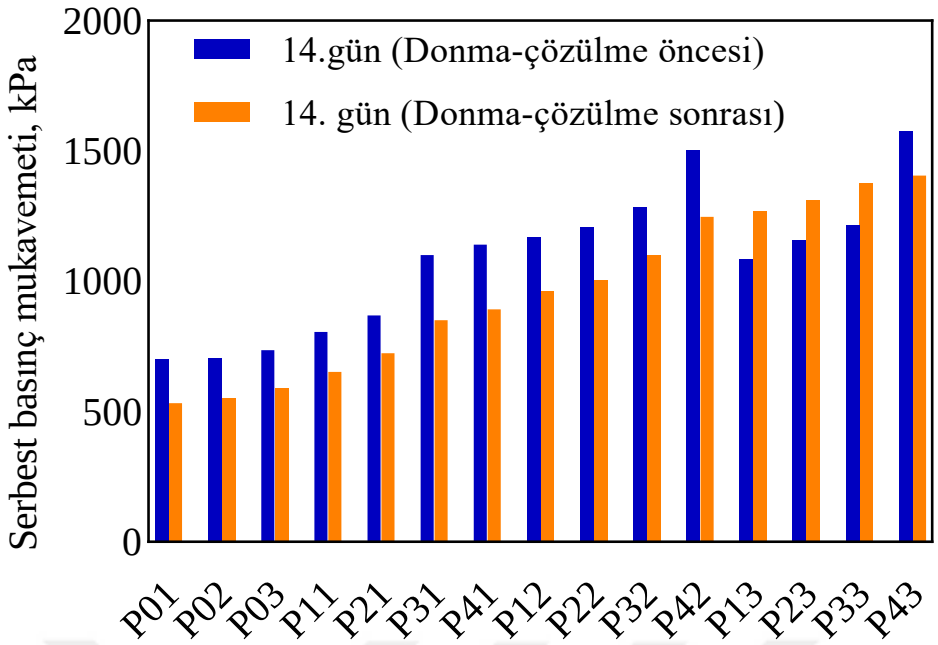
Tablo 14 ve Şekil 35 incelendiğinde, 10 çevrim donma-çözülme çevriminde maruz kalan numunelerin UCS değerleri azalmıştır. %20 PVAc katkılı ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en fazla düşüş sadece %20 PVCa katkılı numuneden yaklaşık %20 olarak en az düşüş ise %20 PVCa ve %3 laponit katkılı numuneden yaklaşık %11 olarak elde edilmiştir. %20 PVAc 'de laponit yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetlerindeki düşüş yüzdeleri azalmıştır. Laponitin donma-çözülme davranışı üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını daha iyi doldurarak PVAc ile daha sağlam ve kararlı bir yapı oluşturduğu, bunun sonucunda donma-çözülme sonrası mukavemet kaybının sadece PVAc katkılı numuneye göre daha az olduğu söylenebilir.

%10 PAVc ,%15 PAVc ve %20 PVAc ve PVAc (%10, %15 ve %20)+Laponit (%0,5, %1, %2 ve %3) katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve sonrası serbest basınç mukavemetlerinin değerlendirilmesi

%10 PAVc ,%15 PAVc ve %20 PVAc ve PVAc (%10, %15 ve %20)+Laponit (%0,5, %1, %2 ve %3) katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme çevrimi sonucunda serbest basınç mukavemetleri Tablo 15 ve Şekil 36'da gösterilmiştir.

Tablo 15. %10 PAVc, %15PAVc ve %20 PAVc ve Laponit Katkılı Numunelerin Donma-Çözülme Öncesi ve Sonrası UCS Değerleri

Deney Grubu	POLİVİNİL ASETAT (%)	LAPONİT (%)	UCS (kPa)	
			14.Gün(Donma-Çözünme Öncesi)	14.Gün(Donma-Çözünme Sonrası)
P01	10	0	702,8	533,2
P11	10	0,5	705,6	550,4
P21	10	1	735,2	590,1
P31	10	2	806,2	652,6
P41	10	3	868,6	724,8
P02	15	0	1100,7	850,8
P12	15	0,5	1140,5	893,2
P22	15	1	1170,3	962,3
P32	15	2	1205,3	1005,7
P42	15	3	1282,5	1100,1
P03	20	0	1502,6	1247,6
P13	20	0,5	1505,5	1267,6
P23	20	1	1526,1	1310,9
P33	20	2	1566,5	1378,2
P43	20	3	1573,7	1405,2



Şekil 36. PVAc ve PVAc+Laponit katkılı numunelerin donma-çözülme öncesi ve donma-çözülme sonrası UCS değerleri (14.gün)

Şekil 36 incelendiğinde,14 günlük kür süresi sonunda 10 çevrim donma-çözülmeye maruz numunelerin serbest basınç mukavemetleri azalmıştır. 10 donma-çözülme çevrimi sonrasında en yüksek UCS değeri %20 PVAc+ %3 laponit katkılı numuneden 1573,7 kPa olarak elde edilmiştir. 10 donma-çözülme çevrimi sonrasında en düşük UCS değeri %10 PVAc katkılı numuneden 533,2 kPa olarak elde edilmiştir.

10 donma-çözülme öncesi ve sonrası mukavemet değerleri karşılaştırıldığında, mukavemetteki azalış yüzdesi en az %20 PVAc ve %3 laponit katkılı numuneden %12 olarak elde edilmiştir. 10 donma-çözülme öncesi ve sonrası mukavemet değerleri karşılaştırıldığında, mukavemetteki azalış yüzdesi en fazla %10 PVAc katkılı numuneden %32 olarak elde edilmiştir. Laponitin donma-çözülme davranışı üzerinde olumlu katkısı olduğu söylenebilir. Nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını daha iyi doldurarak PVAc ile daha sağlam ve kararlı bir yapı oluşturduğu, bunun sonucunda donma-çözülme sonrası mukavemet kaybının sadece PVAc katkılı numuneye göre daha az olduğu söylenebilir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, Erzurum il sınırları içerisinden temin edilen kötü derecelenmiş kum (SP) zemine, %10, %20 ve %30 oranlarında Polivinil Asetat (PVAc) ve %0, %0,5 , %1, %2 ve %3 oranlarında laponit katılarak doğal su muhtevasında ve Dr=%50 rölatif sıkılıkta sıkıştırılmıştır. Elde edilen numuneler küre tabi tutulmuş ve kür süresi sonunda Serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca, numunelerin 10 donma-çözülme döngüleri soncunda ağırlık kayıpları ve serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- Sadece PVAc katkılı numunelerde en yüksek UCS değeri %20 PVAc katkılı numunenin 14 gün kür edilmesi ile elde edilmiştir (1502,6 kPa). En düşük serbest basınç mukavemeti ise %10 PVAc katkılı numunenin 7 gün kür edilmesi ile elde edilmiştir (585,9 kPa). Katkı yüzdesi arttıkça 14 gün kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetinin 7 günlük kür süresi sonundaki serbest basınç mukavemetine göre artış yüzdesi artmıştır. Polimer, zemin tanelerini birbirine bağlayarak kumun fiziksel stabilizasyonuna neden olmaktadır. Zeminde herhangi bir kimyasal reaksiyon meydana gelmemektedir.
- %10 PVAc ve %10 PVAc + laponit katkılı numunelerde en yüksek UCS değeri14 gün kür edilmiş %10 PVAc ve %3 laponit katkılı numuneden 868,6 kPa, en düşük UCS değeri 7 gün kür edilmiş %10 PVAc ve %1 laponit katkılı numuneden 476,4 kPa olarak elde edilmiştir. 14 kür süresi sonunda laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri de artmıştır. Fakat 7 gün kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri sadece PVAc katkılı numuneden elde edilmiştir (585,9 kPa). %10 PVAc ve laponit katkılı numunelerin 7 günlük serbest basınç mukavemeti üzerinde laponitin olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. Laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki olumlu etkisinin kür süresi arttıkça görülmeye başlandığı söylenebililir. Başka bir ifade ile, laponit katkılı numunelerde kür (sertleşme) süresinin uzadığı söylenebilir. Uzun dönemde nanomalzeme olan laponitin zemin boşluklarını doldurarak mukavemet üzerinde olumlu katkısı olduğu düşünülmektedir.

- %15 PVAc ve %15 PVAc + laponit katkılı numunelerde en yüksek UCS değeri 14 gün kür edilmiş %15 PVAc ve %3 katkılı numuneden 1282,5 kPa, en düşük UCS değeri 7 gün kür edilmiş %15 PVAc ve %2 610,3 kPa olarak elde edilmiştir. 14 kür süresi sonunda laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri de artmıştır. Fakat, 7 gün kür süresi sonunda, en yüksek UCS değeri sadece PVAc katkılı numuneden elde edilmiştir (705,4 kPa). Laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki olumlu etkisinin kür süresi arttıkça görülmeye başlandığı söylenebililir. Başka bir ifade ile, laponit katkılı numunelerde kür (sertleşme) süresinin uzadığı söylenebilir.
- %20 PVAc ve %20 PVAc + laponit katkılı numunelerde en yüksek UCS değeri14 gün kür edilmiş %20 PVAc ve %3 laponit katkılı numuneden 1573,7 kPa, en düşük UCS değeri 7 gün kür edilmiş %20 PVAc ve %1 laponit katkılı numuneden 779,8 kPa olarak elde edilmiştir. 14 kür süresi sonunda laponit yüzdesi arttıkça UCS değerleri de artmıştır. Laponitin serbest basınç mukavemeti üzerindeki olumlu etkisinin kür süresi arttıkça görülmeye başlandığı söylenebilir.
- 14 gün kür edilmiş, %10 PVAc ve %10 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en fazla düşüş sadece %10 PVCa katkılı numuneden yaklaşık %32 olarak en az düşüş ise %10 PVCa ve %3 laponit katkılı numuneden yaklaşık %20 olarak elde edilmiştir. %10 PVAc'de laponit yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetlerindeki düşüş yüzdeleri azalmıştır.
- 14 gün kür edilmiş, %15 PVAc ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, donma-çözülme çevriminde maruz kalan numunelerin UCS değerleri azalmıştır. %15 PVAc katkılı ve %15 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en fazla düşüş sadece %15 PVCa katkılı numuneden yaklaşık %29 olarak en az düşüş ise %15 PVCa ve %3 laponit katkılı numuneden yaklaşık %17 olarak elde edilmiştir.

- 14 gün kür edilmiş, %20 PVAc ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, donma-çözülme çevriminde maruz kalan numunelerin UCS değerleri azalmıştır. %20 PVAc katkılı ve %20 PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve 10 çevrim donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en fazla düşüş sadece %20 PVCa katkılı numuneden yaklaşık %20 olarak en az düşüş ise %20 PVCa ve %3 laponit katkılı numuneden yaklaşık %11 olarak elde edilmiştir. Laponitin donma-çözülme davranışı üzerinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir.
- 14 gün kür edilmiş, PVAc ve PVAc+ laponit katkılı numunelerin donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kayıpları belirlenmiş ve genel olarak sabit PVCa yüzdesinde laponit yüzdesi arttıkça ağırlık kayıplarının azaldığı belirlenmiştir.

PVAc ve PVCa+Laponit katkılı numunelerde en yüksek UCS değeri 14 gün kür edilmiş %20 PVAc ve %3 laponit katkılı numuneden 1573,7 kPa olarak belirlenmiştir. 14 gün kür edilmiş ve 10 çevrim donma-çözülmeye maruz bırakılmış numunelerin donma-çözülme çevrimi öncesi ve donma-çözülme sonrasında serbest basınç mukavemetleri karşılaştırıldığında, yüzde cinsinden en az düşüş yine aynı %20 PVCa ve %3 laponit yüzdesinde yaklaşık %11 olarak elde edilmiştir. Kum zemin üzerinde yapılacak iyileştirmelerde %20 PVAc ve %3 laponit kullanılmasının uygun olduğu düşünülmektedir. Farklı zeminler üzerinde, farklı polimerler ve laponit kullanılarak daha detaylı çalışmanın yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Akkaya, R. (2011). *Doğal kuvars mineralinin termolüminesans özellikleri ve kinetik parametrelerinin belirlenmesi* Adıyaman Üniversitesi].

Aytekin, M., & Mekaniği, D. Z. (2004). Teknik Yayınevi. In: Ankara.

Briaud, J.-L. (2013). *Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils*. John Wiley & Sons.

Budhu, M. (2010). *Soil mechanics and foundations*. John Wiley & Sons.

Choobbasti, A. J., Samakoosh, M. A., & Kutanaei, S. S. (2019). Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers. *Construction and Building Materials*, *211*, 1094-1104.

Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U., & Mengé, P. (2009). Construction processes. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4),

Deng, Y., Yilmaz, Y., Chang, C., & Gokce, A. (2021). Strength-dilatancy and critical state behaviours of binary mixtures of graded sands influenced by particle size ratio and fines content. *Géotechnique*. https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.320

El Howayek, A. (2011). Characterization, rheology and microstructure of laponite suspensions.

El Mohtar, C., Bobet, A., Santagata, M., Drnevich, V., & Johnston, C. (2013). Liquefaction mitigation using bentonite suspensions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *139*(8), 1369-1380.

Fard, A. R., Moradi, G., Ghalehjough, B. K., & Abbasnejad, A. (2020). Freezing-thawing resistance evaluation of sandy soil, improved by polyvinyl acetate and ethylene glycol monobutyl ether mixture. *Geomechanics and Engineering*, *23*(2), 179-187.

Getchell, A., Ochoa-Cornejo, F., & Santagata, M. (2022). Behavior of dry-mixed and permeated laponite-treated sand: from small strains to critical state. *Geotechnical and Geological Engineering*, *40*(11), 5307-5331.

Ghasabkolaei, N., Janalizadeh, A., Jahanshahi, M., Roshan, N., & Ghasemi, S. E. (2016). Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study. *The European Physical Journal Plus*, *131*(5), 1-11.

Güllü, H., & Khudir, A. (2014). Effect of freeze–thaw cycles on unconfined compressive strength of fine-grained soil treated with jute fiber, steel fiber and lime. *Cold Regions Science and Technology*, *106*, 55-65.

Huang, Y., & Wang, L. (2016a). Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review. *Environmental Earth Sciences*, *75*(6), 1-10.

Huang, Y., & Wang, L. (2016b). Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review. *Environmental Earth Sciences*, *75*, 1-10.

Huang, Y., & Wang, L. (2016c). Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles. *Engineering Geology*, *204*, 23-32.

Huang, Y., Wen, Z., Wang, L., & Zhu, C. (2019). Centrifuge testing of liquefaction mitigation effectiveness on sand foundations treated with nanoparticles. *Engineering Geology*, *249*, 249-256.

J Torkan, R. *Çift Duvarlı Tüplerde Burkulmanın Başlangıç Değerleri Yöntemiyle İncelenmesi* Fen Bilimleri Enstitüsü].

Konrad, J.-M. (1989). Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology*, *16*(3), 291-303.

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*(14), 1-25.

Kroon, M., Vos, W. L., & Wegdam, G. H. (1998). Structure and formation of a gel of colloidal disks. *Physical Review E*, *57*(2), 1962.

Küçükyıldırım, B. O., & Eker, A. A. (2012). Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri Ve Kullanım Alanları. *Engineer & the Machinery Magazine*(630).

Ladanyi, B., & Andersland, O. (2004). *Frozen ground engineering*. Wiley.

Levitz, P., Lecolier, E., Mourchid, A., Delville, A., & Lyonnard, S. (2000). Liquid-solid transition of Laponite suspensions at very low ionic strength: Long-range electrostatic stabilisation of anisotropic colloids. *EPL (Europhysics Letters)*, *49*(5), 672.

Liu, G., Zhang, C., Zhao, M., Guo, W., & Luo, Q. (2020). Comparison of nanomaterials with other unconventional materials used as additives for soil improvement in the context of sustainable development: a review. *Nanomaterials*, *11*(1), 15.

Liu, G., Zhang, C., Zhao, M., Guo, W., & Luo, Q. (2021). Comparison of Nanomaterials with Other Unconventional Materials Used as Additives for Soil Improvement in the Context of Sustainable Development: A Review. *Nanomaterials*, *11*(1), 15.

Miessler, G. L., & Tarr, D. A. (1999). Coordination compounds. *Inorganic chemistry*, *642*, 315-316.

Murthy, V. (2002). *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press.

Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann.

Önalp, A. (2002). *Geoteknik bilgisi I: çözümlü problemlerle zeminler ve mekaniği*. Birsen Yayınevi.

Özaydın, K. (2012). Zeminlerin iyileştirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi*.

Özcep, F. (2009). *Zeminlerin geoteknik ve jeofizik analizi (İnşaatların tasarım sürecinde)*. Nobel.

Özdemir, A., & Özdemir, M. (2006). Zayıf zeminlerin iyileştirilmesi ve son yıllarda yaygın olarak uygulanan bazı zemin iyileştirme yöntemleri. *Sondaj Dünyası Dergisi*, *3*, 34-38.

Pardo Tobar, G. (2019). *Mitigation of Soil Liquefaction with two Sustainable Materials: Biochar and Laponite* ResearchSpace@ Auckland].

Siddique, S. N., Deng, J., & Mohamedelhassan, E. (2023). Improving the Strength Properties of Sand Using Laponite, a Promising Nanoparticle. *International Journal of Civil Engineering*, *21*(4), 679-693.

Tanaka, H., Meunier, J., & Bonn, D. (2004). Nonergodic states of charged colloidal suspensions: Repulsive and attractive glasses and gels. *Physical Review E, 69*(3), 031404.

Tolleson, R., Shatnswi, M., Harman, E., & Mahdavian, E. (2003). An evaluation of strength change on subgrade soils stabilized with an enzyme catalyst solution using CBR and SSG comparisons. *Final Report to University Transportation Center Grant R-02-UTC-ULTERPAVB–GEO-01*.

Tomás, H., Alves, C. S., & Rodrigues, J. (2018). Laponite®: A key nanoplatform for biomedical applications? *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, 14*(7), 2407-2420.

Tsytovich, N. (1975). The Mechanics of Frozen Ground, Scripta. In: McGraw-Hill, New York.

Tumluer, G. (2006). Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*(s 161).

Uzuner, B. A. (2007). Temel zemin mekaniği. *Derya Kitabevi, Trabzon*.

Yıldırım, S. (2002). Zemin incelemesi ve temel tasarımı. *Birsen Yayınevi, İstanbul*.

Zaimoğlu, A. Ş., Hattatoğlu, F., & Akbulut, R. K. (2013). Yüke maruz ince daneli zeminlerin donma-çözülme davranışı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19*(3), 117-120.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı: **Doğum tarihi:** **Doğum Yeri:** **Uyruğu:** **Adres:** **Tel:** **E-mail:**	Gökçe ERKMEN
Eğitim	
Lise: **Ön Lisans:** **Lisans:** **Yüksek lisans:**	Erzurum Mehmet Akif Ersoy Lisesi Atatürk Üniversitesi, MYO, İnşaat Bölümü Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	-
Çalışma Bilgisi	
2010-2021	Yakutiye Belediyesi-İmar Ve Şehircilik Müdürlüğü
2021-DEVAM	Erzurum Afad İl Müdürlüğü-İyileştirme Şube