



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



NANO SİLİKA VE ÇİMENTO KATKILI ÇEŞİTLİ ZEMİNLERİN GEOMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Gizem AKSU UYSAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2021

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**NANO SİLİKA VE ÇİMENTO KATKILI ÇEŞİTLİ
ZEMİNLERİN GEOMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Gizem AKSU UYSAL

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFCİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Yüksek Lisans Programı

İzmir
2021

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Nano silika ve çimento katkılı çeşitli zeminlerin geomekanik özelliklerinin incelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

27/08/2021

Gizem AKSU UYSAL

ÖZET

NANOSİLİKA VE ÇİMENTO KATKILI ÇEŞİTLİ ZEMİNLERİN GEOMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AKSU UYSAL, Gizem

Yüksek Lisans Tezi, Geoteknik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFCİ

Ağustos 2021, 60 sayfa

Bu tez, kil, killi kum ve kum zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nano silika katkısının etkisini incelemektedir. Zeminler kendi içlerinde, saf zeminler, nano silika katkılı zeminler ve nano silika – çimento katkılı zeminler olarak gruplara ayrılmıştır. Zeminlerin mühendislik özellikleri Atterberg limitleri deneyleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basınç deneyleri, donma çözülme deneyleri, ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyleri ve kesme kutusu deneyleri ile incelenmiştir. Çalışmada, %0, %0.3, %0.5 ve %0.7 oranlarında nano silika ve %5 ve %10 oranlarında çimento kullanılmıştır. Çimento içeren örneklerde kür süresi 7-150 gün arasında değişmektedir. Zeminin kıvam ve kompaksiyon özelliklerinin öncelikle zemin türüne göre değiştiği sonrada nano silika dışında mevcut ikinci bir bağlayıcının varlığından etkilendiği görülmüştür. Bu sebeple her zemin grubunda optimum olarak tanımlanabilecek nano silika miktarı da farklı olmuştur. %5 ve %10 çimento içeren kil örneklerde sırası ile %0.5 ve %0.7 nano silika, kum örneklerde her iki çimento oranında da %0.7 nano silika, %5 ve %10 çimento içeren killi kum örneklerde sırası ile %0.3 ve %0.7 nano silika katkıları en yüksek mukavemet değerlerini vermiştir. Donma çözülme açısından %0.5 nano silika ve %10 çimento içeren killi kum örnekler, en az mukavemet kaybına uğramıştır. Aynı kür süresine sahip zeminlerde UPV ve serbest basınç mukavemeti arasında üssel bir ilişki vardır. Zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerinin de nano silika ilavesi ile artış eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Nano silika katkısının zeminlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Nano silika, Atterberg limitleri, kompaksiyon, serbest basınç mukavemeti, donma çözülme, kayma mukavemeti.



ABSTRACT**THE INVESTIGATION OF THE GEOMECHANIC PROPERTIES OF
NANOSILICA AND CEMENT ADDED DIFFERENT SOILS**

AKSU UYSAL, Gizem

M.Sc. in Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFCİ

August 2021, 60 pages

This thesis examined the effect of nanosilica additive to improve the mechanical properties of clay, clayey sand and sandy soils. Soils are grouped into pure soils, nanosilica added soils and nanosilica cement added soils. The engineering properties of the soils were investigated through Atterberg limits tests, compaction tests, unconfined compression tests, ultrasonic pulse velocity (UPV) tests, freeze-thaw tests, and the direct shear tests. In the study, 0%, 0.3%, 0.5% and 0.7% nanosilica and 5% and 10% cement were used. The curing period in cement containing samples varied between 7-150 days. It was observed that the consistency and compaction properties of the soil firstly affected from the soil type and then were affected by the presence of a second binder other than nanosilica. For this reason, the amount of nanosilica that can be defined as optimum in each soil group was also different. The optimum nanosilica contents in clay samples with 5% and 10% cement were 0.5% and 0.7%, respectively; the optimum nanosilica content in sand samples was 0.7% in both cement ratios, and the optimum nanosilica contents in clayey sand samples with 5% and 10% cement were 0.3% and 0.7%, respectively. In terms of freeze-thaw, clayey sand samples containing 0.5% nanosilica and 10% cement had the minimum strength loss. There is an exponential relationship between UPV and unconfined compressive strength of soils with the same curing times. It has been determined that the shear strength parameters of the soils also tend to increase with the addition of nanosilica. It was concluded that the nanosilica additive significantly improved the mechanical properties of the soils.

Keywords: Nanosilica, Atterberg limits, compaction, unconfined compressive strength, freeze thaw, shear strength.



ÖNSÖZ

Arazideki zemin şartlarının istenilen özellikleri sağlamadığı koşullarda sıklıkla zemin iyileştirme yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Özellikle katkı maddeleri ile zeminlerin iyileştirilmesi güncelliğini koruyan bir konudur. Birçok yeni katkı malzemesi literatürde araştırma konusu olmaktadır. Bu tez çalışmasında yeni bir katkı malzemesi grubu olan nano partiküllerin ele alınması planlanmıştır. Zemin iyileştirmesinde nano silikanın etkisi ve zemin parametrelerinde sağlanan gelişim ve değişimlerin ortaya konması planlanmıştır. Bu süreci detayları ile ele alabilmek adına İnşaat Mühendisliği Bölümü – Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarlarında mevcut ve tez çalışması kapsamına uygun deney sistemlerinin birçoğu kullanılmıştır. Bu çalışma, gerek konuya ilgi duyan kişilere konuyu daha fazla irdeleme fırsatı verecek, gerekse ileride yapılacak çalışmalara ışık tutarak fayda sağlayacaktır.

İZMİR

27/08/2021

Gizem AKSU UYSAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
TABLolar DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1 Kil Zeminler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	6
2.2 Kum Zeminler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	11
2.3 Silt veya Lös Zeminler Üzerinde Yapılan Çalışmalar	12
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	15
3.1 Malzeme.....	15
3.2 Yöntem.....	18
4. DENEY SONUÇLARI	23
4.1 Atterberg Limitleri	23

4.1.1 Saf zeminler ile çimento katkılı zeminlerin Atterberg limitleri	23
4.1.2 Nano silika-çimento-zemin karışımlarının Atterberg limitleri	24
4.1.3 Nano silika-zemin karışımlarının Atterberg limitleri.....	25
4.2. Kompaksiyon Deneyleri	26
4.3 Serbest Basınç Deneyleri	31
4.3.1 Kil zeminler.....	31
4.3.2 Kum zeminler.....	36
4.3.3 Killi kum zeminler	40
4.3.4 Donma çözülme etkileri	43
4.3.5 Ultrasonik darbe hızı ölçümlerinin (UPV) serbest basınç mukavemeti ile ilişkisi	44
4.4 Kesme Kutusu Deneylerine Ait Sonuçlar	50
KAYNAKLAR DİZİNİ	52
TEŞEKKÜR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Nano teknoloji ve çeşitli killerin boyutları	1
1.2 Montmorillonitin sahip olabileceği doku çeşitleri	2
3.1 Kum ve killi kum zeminin dane boyu dağılımları.....	15
3.2 (a) Nano silikaya ait dane boyu dağılımı, (b) X- ışını difraktamı, (c) SEM ve (d) STEM görüntüleri	17
3.3 Plastik limit deneyi	19
3.4 Serbest basınç deneyi numuneleri kür aşaması	20
3.5 Serbest basınç deneyi numunelerinin kırım aşaması.....	20
4.1 Çimento katkılı kil (C) ve killi kum (CS) zeminlerin Atterberg limitleri	24
4.2 (a) %5 ve (b) %10 çimento katkılı kil (C) ve killi kum (CS) zeminlere NS ilave edilmesi ile Atterberg limitlerinin değişimi	25
4.3 NS katkılı kil (C) ve killi kum (CS) zeminlerin Atterberg limitleri.....	26
4.4 Saf zeminlerin kompaksiyon eğrileri	27
4.5 Çimento katkılı (a) kil, (b) killi kum, (c) kum zeminlerin kompaksiyon eğrileri	28
4.6 NS katkılı (a) kil, (b) killi kum, (c) kum zeminlerin zeminlerin kompaksiyon eğrileri.....	28

4.7	NS-çimento-zemin karışımlarının kompaksiyon deneyi sonuçları (a) kil zemin, (b) killi kum zemin, (c) kum zemin.....	30
4.8	NS katkılı kil zeminlerin gerilme-düşey şekil değiştirme eğrileri	31
4.9	Kil partikülleri arasında nano silika etkisi ile oluşan bağ	32
4.10	NS ve %5 çimento içeren kil örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler.....	34
4.11	NS ve %10 çimento içeren kil örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler	35
4.12	NS içeriğine göre %5 ve %10 çimento içeren 28 günlük örneklerin SBM'lerinin karşılaştırılması	36
4.13	NS ve %5 çimento içeren kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler.....	37
4.14	NS ve %10 çimento içeren kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler	37
4.15	NS ve çimento içeren kum örneklerin NS içeriğine göre SBM'deki değişimleri.....	38
4.16	Farklı boyutlarda NS içeren örneklerin mukavemetleri (a) 7 gün ve (b) 28 gün	39
4.17	NS katkılı killi kum zeminlerin gerilme-düşey şekil değiştirme eğrileri	40
4.18	NS ve %5 çimento içeren killi kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler	41
4.19	NS ve %10 çimento içeren killi kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler	42

4.20	NS ve çimento içeren örneklerin 28 günlük kür süresine göre zemin cinsine bağlı olarak SBM'lerindeki değişimler.....	42
4.21	Seçili örnek gruplarında 12 çevrim donma çözülme sonucu gözlenen SBM değişimleri	44
4.22	Killi kum, kum ve kil zeminlerin UPV-SBM ilişkisi.....	45
4.23	Kum zeminlerin kür süresine göre UPV-SBM ilişkisi.....	46
4.24	Kesme kutusu deneylerinde (a) konsolidasyon aşaması ve (b) kayma gerilmesi – yanal şekil değiştirme ve (c) örnek kalınlığındaki değişim - yanal şekil değiştirme ilişkileri	49

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	Zeminlerin İndis Özellikleri	15
3.2	Nano Silikanın Fiziksel Özellikleri	17
3.3	Çimentonun Kimyasal Özellikleri.....	18
3.4	Deney Programı.....	18
4.1	Kesme Kutusu Deneyleri ile Ölçülen Zemin Kayma Parametreleri	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
BHA	Birim Hacim Ağırlık
C	Kil
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
CS	Killi Kum
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi
IEP	İzoelektrik Nokta
LL	Likit Limit
N	Nano Silika (Sadece grafik lejantlarında kullanılmıştır.)
NS	Nano Silika
PI	Plastisite İndisi
PL	Plastik Limit
S	Kum
SBM	Serbest Basınç Mukavemeti
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
STEM	Taramalı Geçirmeli Elektron Mikroskobu

UPV Ultrasonik Darbe Hızı

XRD X Işını Difraktometresi

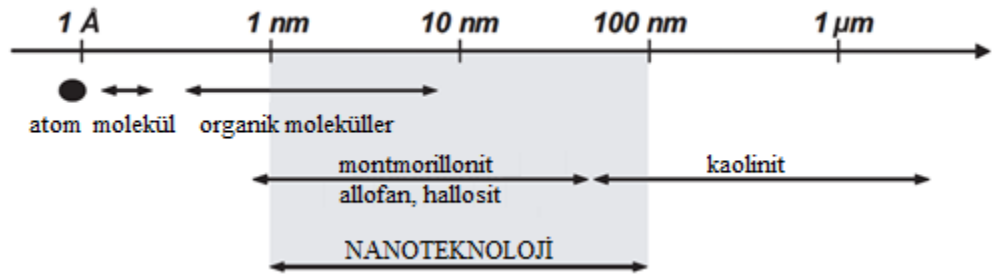


1. GİRİŞ

Nano teknoloji, geniş kapsamlı uygulamalar için nanometre (nm) ölçeğinde gerçekleştirilen çok çeşitli ilerlemeleri içerir. Bir nano malzeme ile daha büyük ölçekli bir malzeme arasındaki temel ayrım daha büyük yüzey alanıdır, malzemenin reaktivitesinde bir artışa ve/veya malzemenin fiziksel özelliklerinde bir değişikliğe izin verir (Firoozi vd., 2014; Alsharef vd., 2016). Bu yeni malzeme sınıfının sergilediği özellikler, çeşitli endüstri alanlarında kullanılmaktadır; nano teknolojinin hızla artan kullanımı, fen bilimleri, malzeme bilimi ve tasarım dallarının bir araya gelmesinden kaynaklanmaktadır (Firoozi vd., 2015; Alsharef vd., 2016). Nano teknoloji, nano ölçekte yeni bir dünya açarken, inşaat mühendisliği genel olarak makro ölçekte çalışmalar yapar (Alsharef vd., 2016).

Zemin, danelerden oluşan bir malzemedir ve zemini oluşturan danelerin büyüklüğü geniş bir aralıkta değişir. Genellikle nano partiküller, zemin ortamlarındaki en küçük partiküllerdir. Nano partikül tanım olarak partikül boyutları iki ya da üç boyutlu olarak 1-100 nm uzunluktaki parçacıklardır (ASTM E2456 – 06, 2020).

Geoteknik mühendisliğinde temel bir zorluk, zemin açısından büyük ölçekten küçüğe hareket ederken zemin özelliklerindeki ve davranışındaki değişiklikleri anlamak iken nano teknolojideki ana tema bu partikül değişiminin avantajından yararlanarak yeni malzemelerin nano yapılandırılması yoluyla malzemeye özgü bir davranış elde etmektir. Malzeme özellikleri partiküllerin boyutları, boyut dağılımı, bileşimi, şekli ve yüzey kimyası değiştirilerek tasarlanabilir (National Research Council, 2006).



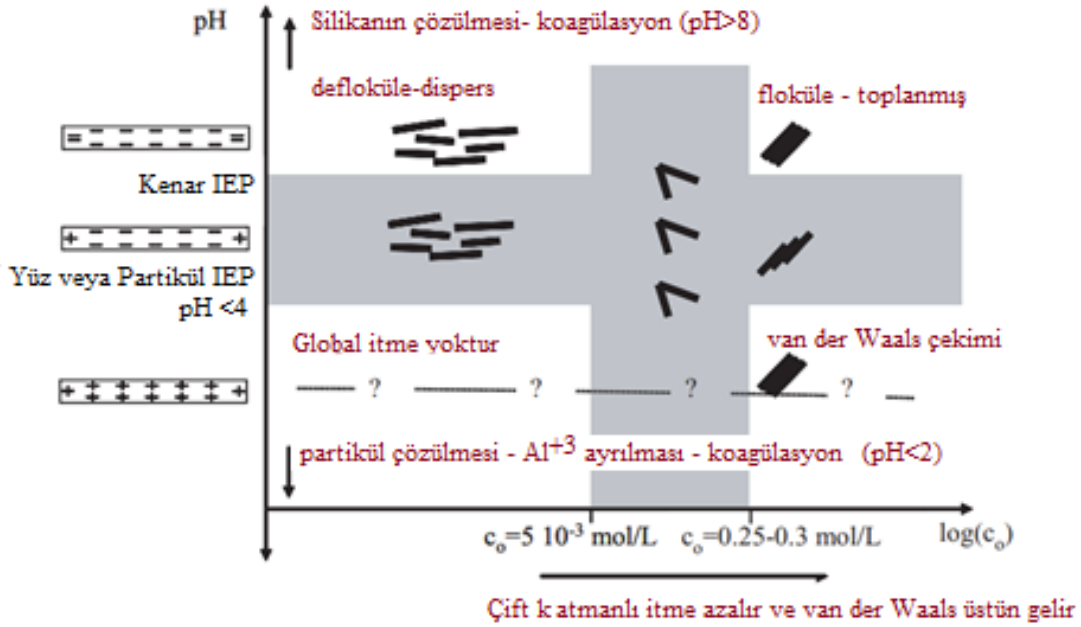
Şekil 1.1 Nano teknoloji ve çeşitli killerin boyutları (National Research Council, 2006)

Nano teknoloji ile zemin mekaniğinde kullanılan ölçeğin bir karşılaştırması Şekil 1.1'de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere killerin temel davranışı aslında bir nano mekanik problemdir; bu, nano teknolojide geliştirilen kavram ve modelleri kil

boyutundaki danelerin davranışı hakkında yeni görüşler sağlanabileceğini ve bu davranışı geliştirebileceğini gösterir.

Zemin ve kaya dünyada bolca bulunan ve en düşük maliyetli inşaat malzemeleridir. Zeminler sıkı, kuru veya kohezyonlu olduklarında oldukça güçlü ve dayanıklıdır. Gevşek, ıslak (su altında) ve yumuşak olduklarında oldukça zayıftır ve çoğunlukla sahadaki uygulamalar için uygun değildir. Nano ölçekte yapılan işlemler ile bu zayıf özellikteki zeminlerin kullanıma daha uygun ve ekonomik hale getirilmesi mümkün olabilir. Nano teknolojideki gelişmeler, ince daneli zeminin partikül seviyesindeki temel davranışını anlamaya yardımcı olabilir ve mühendislik özellikleri geliştirilmiş ince daneli zeminlerin ortaya çıkmasını sağlayabilir.

Günümüzde mevcut olan atomik kuvvet mikroskopları, mineral yüzeylerindeki yüzey yükü ve yüzeylerin hidrofobikliği gibi kilerdeki yerel mineral farklılıklarını araştırmak için kullanılmaktadır. Gelecekte nano miknatıslar kullanılarak çok küçük boyutlu olan diamanyetik kil minerallerini kontrol etmek ve bu mineralleri yüzey reaksiyonlarını incelemek mümkün olacaktır.



Şekil 1.2 Montmorillonitin sahip olabileceği doku çeşitleri (National Research Council, 2006)

Çoğu nano ölçekli olay geo-malzemeler açısından incelenmemiş olsa da nano partiküllerin sulu çözeltilerde kendiliğinden birleşmesi kil boyutundaki danelerin doku

(fabric) oluşturmasına benzer bir durumdur. Kil zeminde dokunun oluşumu ana malzemenin mineraline ve boşluk sıvısı kimyasına bağlıdır.

Şekil 1.2, sulu bir çözeltilinin kimyası (pH ve konsantrasyon) ile bu çözeltili içinde çöken kil partiküllerinin oluşturduğu doku türü arasındaki ilişkiyi gösteren bir faz diyagramıdır. Nano ölçekteki doğal bir malzeme olarak killer konuya iyi birer örnek teşkil etmektedir. Şekil 1.2’de montmorillonite ait dokuların gösterimi, killeri etkileyen kendi kendine birleşmenin doğal çeşitliliğini göstermektedir. Ayrık doku (dispers) itme kuvvetlerinin baskın olduğu, topaklanmış doku ise çekme kuvvetlerinin hakim olduğunu gösterir. Bu durumlar çift tabaka-ozmotik itme kuvvetleri ile van der Waals çekme kuvvetleri arasındaki dengeyi yansıtır. Buna karşılık pH, partikülün yükünü belirler. Yüksek iken negatif, düşük iken pozitif yük görülür. Aradaki geçiş noktasına izoelektrik nokta (isoelectric point (IEP)) denir ve deniz suyunun tuzluluğu etkisi altındaki bir çok kil bu noktada bulunur.

Geoteknik mühendisliğinde nano teknolojinin uygulamaları henüz çoğunlukla araştırma aşamasındadır. Gelecekte nano teknoloji ile geliştirilmiş kil kaplamalar, kil çekirdekler ve nano partiküllerin katıldığı zeminlerin kullanılmaya başlanması ile istenen mekanik özelliklerde uzun dönem mukavemetleri yeterli olan, hidrolik ve kimyasal özellikleri gelişmiş zeminler ile çalışılacaktır.

Yukarıda açıklanan durumdan başka, farklı nano partiküllerden oluşan maddeler farklı özellikler sergilemektedir. Bu nano malzemelerin zemine katılan çok küçük bir miktarı bile, zeminlerin geoteknik / mühendislik özellikleri üzerinde çeşitli etkilere neden olabilmektedir. Daha önceden açıklandığı üzere, zemin minerallerinin birçoğu nano partikül formundadır ve kimyasal reaksiyonları nano ölçekte gerçekteşir. Zemin mekaniğinde 0.002 mm’den küçük kil boyutunda malzeme ile sıklıkla çalışılmaktadır. Bu gerçeğin bir sonucu olarak, nano teknolojinin geoteknik mühendisliği ve zemin mekaniği alanında uygulanması için büyük bir potansiyel bulunmaktadır. Zeminin bir miktar nano katkı maddesi veya nano malzeme ile karışımı, zemin mukavemet parametrelerini iyileştirebilir. Geoteknik mühendisliğinde nano teknolojinin temel stratejisi, nano malzemelerin uygulanması sayesinde zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmektir (Arya ve Jain, 2017).

Literatürde nano malzemeler iğerisinden nano silikanın çimento ile birlikte zeminlerde katkı olarak kullanımı, diğer geleneksel katkılara kıyasla iyi bir performans göstermiştir. Nano silikanın yüksek aktiviteye sahip olması nedeniyle çimentonun hidrasyonunu hızlandırdığı ve etkin bir katkı malzemesi olabileceği ifade edilmiştir

(Bahmani vd., 2014; Choobbasti vd., 2015; Kutanaei ve Choobbasti 2017). Dolayısıyla, bu tez çalışmasında nano malzeme olarak nano silika seçilmiştir. Nano silikanın çimento ilavesi ile birlikte zemindeki etkileri üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada, nano teknolojinin etkileri ve kullanımı geoteknik mühendisliğince henüz ele alınmaya başlanmış bir konu olması nedeniyle tez konusunun odak noktası olması amaçlanmıştır. Nano silikanın zemine eklenmesi ile kıvam limitlerindeki değişikliklerin belirlenmesi, standart bir enerji altında sıkıştırılması sonucunda meydana gelen değişimlerin gözlemlenmesi, zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin incelenmesi, bulunan sonuçların birbiri ile kıyaslanması ve zemin iyileştirmesinde kullanılacak optimum katkı miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Nano silika katkısı ile zemin özelliklerinde meydana gelen değişimler, kil içeren zeminlerde Atterberg limitlerinin değişimi açısından ele alınmış; tüm zemin gruplarında ise kompaksiyon özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. Kür süresine bağlı olarak gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri ile mukavemet değişimleri takip edilmiştir. Bundan başka nano silika katkılı zeminlerin ultrasonik darbe hızı ölçümleri ile mukavemetleri arasında bir ilişki kurulması ve uzun dönem küre tabi tutulan örneklerin donma çözülme davranışlarının incelenmesi de tezin ikincil amaçlarını oluşturmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

Son yıllarda, nano teknoloji geoteknik mühendisliğinde, özellikle zemin stabilizasyonu uygulamalarında incelenmeye başlamıştır. Nano teknolojinin kullanılması, zeminin başlangıçtaki mevcut parametrelerinin iyileştirilmesini sağlamıştır. Killi zeminler, doğası gereği dünya yüzeyinde geniş bir dağılıma sahiptir. İnşaat sahalarında kil içerikli zeminlerin yaygın olarak bulunması, bu zeminlerin mukavemet özelliklerini iyileştirmek ve değiştirmek için yeni yöntemlerin incelenmesi ve araştırılmasını gerekli kılmaktadır (Javadzadeh, 2019).

Nano silika katkısının ülkemizde de inşaat mühendisliği alanında kullanımı başlamıştır. Bu çalışmalarda nano silika katkısının bir yapı malzemesi olarak ele alındığı görülmektedir. Dündar (2016), nano silika kullanımı ile pomzalı karışımların erken yaş dayanımlarının nano silika kullanılmayanlara göre arttığını bulmuştur. Karışımlarda %3 oranında nano silika eklenmesinin doğal puzolanlı çimentolarda erken yaş dayanımını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise Humur (2018), literatürde ilk defa uçucu kül/silika katkılı geopolimer betonun kimyasal ataklara karşı performansını araştırmayı hedeflemiştir. Bu sebeple araştırma için F sınıfı uçucu kül içeren nano silikalı ve nano silikasız belirli bir geopolimer beton üretilmiştir. Nano silika eklenmesi geopolimer betonda yüksek yoğunluklu bir mikroyapı oluşturduğu için geopolimer betonun dayanıklılık özelliklerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Önder (2019), yaptığı çalışma sonucunda belirli oranlarda ilave edilen cüruf ve nano silikanın çimentonun hidrasyon mekanizmasını hızlandırarak, mikroyapı karakteristiklerini geliştirdiği ve bunun sonucunda yeni meydana gelen betonlarda mekanik ve elastik özelliklerin geliştiğini görmüştür.

Huang ve Wang (2016), geoteknik ve jeoloji mühendisliğinde nano malzemelerle yapılan çalışmaları değerlendirerek, zemin iyileştirme yöntemlerinde yenilikçi çözümler için nano teknolojinin potansiyel faydalarını göz önüne almak gerektiğini vurgulamıştır. Geoteknik mühendisliğinde kullanılan nano malzemeler üzerine yapılan çalışmalar, bu nano partiküllerin zemin iyileştirme çalışmalarında nasıl işlevsellik kazandığını göstermeyi hedeflemektedir. Örnek olarak, karbon nano tüpler, zemini donatılarak serbest basınç mukavemetini arttırmaktadır. Nano bentonit, bir sondaj sıvısı katkı maddesi olarak kullanılmaktadır ve zeminin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Kolloidal silika ve laponit¹, bazı reolojik özelliklerine bağlı olarak zeminlerin sıvılaşmasını azaltmak veya önlemek için kullanılmaktadır. Karbon nano tüpler, kolloidal silika, bentonit ve laponit zemin iyileştirmesinde sıklıkla kullanılan katkıları

¹ Suda çözüldüğünde berrak, tiksotropik bir jel oluşturan sentetik bir smektit kili.

olarak tanımlanmıştır. Boyut, mikro yapı, süspansiyon özellikleri, yüzey etkisi ve nano partikül süspansiyonunun reolojisi dahil nano malzemelerin mikroskobik özellikleri, zemin bileşimini, yapısını ve daneler arasındaki etkileşimi değiştirir; bu, zemin mukavemetini iyileştirmek üzere plastisiteyi, zemin matrisindeki bağlantıları ve boşluk sıvısının özelliklerini etkiler. Nano malzemelere dayalı zemin iyileştirme, zeminde düşük seviyede örselenmeye sebep olur, nano malzemeler çevre dostudur ve fiyat/performans oranı açısından diğer kimyasal enjeksiyon malzemelerine göre daha ekonomiktir. Nano malzemeleri zemin iyileştirme için uygulayan yöntemler üzerine araştırmalar çok umut vericidir ve yenilikçi yaklaşımlarla nano teknoloji ve geoteknik mühendisliği arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamamızı sağlar (Huang ve Wang, 2016).

2.1 Kil Zeminler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Bahmani vd. (2014), nano silika ve çimento ile işlenmiş kil zeminin kıvamını, kompaksiyon özelliklerini, hidrolik iletkenliğini ve serbest basınç mukavemetini belirlemek için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca SEM, XRD ve FTIR deneyleri de yapılmıştır. Nano partiküllerin eklenmesinin kompaksiyonu, hidrolik iletkenliği avantajlı bir şekilde etkilediği bulunmuştur. Ayrıca, çimento katkılı zemine %0.4 nano silika ilavesi, serbest basınç mukavemetini %80'e kadar arttırmıştır. Mikro yapısal inceleme sonuçlarında da, silika nano partiküllerinin Portlanditi kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline dönüştürerek puzzolanik reaksiyonu desteklediğini göstermiştir.

Ren ve Hu (2014), nano silikanın siltli kilin Atterberg limitlerini, serbest basınç mukavemetini ve don kabarmasını araştırılmıştır. %5 nano silika içeriğinde zeminin plastik limiti %50 artarken likit limiti %90 artmıştır. Artan nano silika miktarı, kilin plastik ve likit limitlerinin yanı sıra serbest basınç mukavemetini arttırmış, don kabarması miktarını azaltmıştır. %2 nano silika içeriğinde don kabarma miktarı %26 azalırken zeminin serbest basınç mukavemeti bu durumda 8 kat artmıştır. Bununla birlikte, nano silika katkısı ile siltli kilin özgül ağırlığında herhangi bir değişiklik olmamıştır.

Rikhtehgar (2016), yeni nano teknolojik malzemelerin ve nano teknolojik özellikteki polimer katkıların killi zeminlerin stabilizasyonundaki performans ve etkileri araştırmıştır. Nano malzemelerin yolların alt temel tabakalarında kullanımının uygunluğu irdelenmiştir. Numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulduktan sonra sonuçlara bakılarak daha iyi sonuçlar veren karışım numuneleri belirlenmiştir. Bu numuneler üzerinde CBR, konsolidasyon, permeabilite ve üç eksenli deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre içsel sürtünme açısında artış gözlenmezken, kohezyonun arttığı belirlenmiştir. Katkılı kil malzemelerin kayma mukavemeti ve

kohezyon gibi dayanım parametreleri açısından daha hassas olduğu ve stabil davranışlar göstermeyebileceği anlaşılmıştır.

Nano malzemelerin çökebilir zemin davranışı üzerindeki etkilerini anlamayı amaçlayan deneysel bir çalışma da yapılmıştır. Çökebilir zeminlerin sabit gerilme altında daneleri arasındaki bağlar zayıflamakta ve su içeriğindeki artışa bağlı olarak hacimleri azalma eğilimindedir. Iranpour ve Haddad (2016), bu tür zeminlerin çökebilir potansiyellerinin dört tür nano malzeme (nano kil, nano bakır, nano alümina ve nano silika) katkısı ile nasıl bir değişim gösterdiğini araştırmışlardır. 0, %0.1, %0.2, %0.4 ve %0.6 oranında nano malzeme kullanılmıştır. Sonuçlar, çeşitli nano malzemelerin kullanılmasının çökebilir zeminlerin davranışı üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermiştir. Zemin davranışı, zemine eklenen nano malzeme miktarına ve çeşidine çok duyarlıdır. Katkı türü ve miktarının hedeflenen özellikler üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkisi olabilir. Uygun bir nano malzeme yüzdesinin kullanılması, zemin özelliklerinin iyileştirilmesi sağlar. Kuru birim hacim ağırlık ve su içeriği zeminin çökme potansiyelini etkileyen faktörler arasındadır. Iranpour ve Haddad (2016), nispeten yüksek çökme potansiyeline sahip zeminlerde su içeriğinin %5'in altında ve kuru birim hacim ağırlığının 14 kN/m^3 olduğunu belirtmişlerdir. Nano kil, nano silikaya oranla daha geniş bir özgül yüzeye olduğu için çökme potansiyelinde daha fazla azalmaya neden olmuştur. Nano malzemelerin zemin içerisinde kullanımında en uygun yüzdesinin seçimine dikkat çekmişlerdir. Nano malzemelerin optimum değerden daha fazla eklenmesi danelerin aglomerasyonuna neden olarak zeminin mekanik özelliklerini üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceğini belirtmişlerdir. Bu olumsuz etkiyi azaltmak için nano partikülleri zeminle kolloid çözeltiler şeklinde birleştirmeyi tavsiye etmişlerdir.

Ghasabkolaei vd. (2016), çimentoyla işlenmiş killi zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için nano silikanın kullanımını araştırmıştır. Zeminin indeks ve mukavemet parametrelerini incelemek için Atterberg limitleri, serbest basınç mukavemeti ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri yapılmıştır. Örnekler zeminin %9 çimento ve çeşitli nano silika içeriklerinde karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Nano silikayı suda dağıtmak için ultrasonik bir banyo teçhizatı kullanılmıştır. Nano silikanın eklenmesi, killi zeminin mukavemet parametrelerini arttırmış olup ayrıca, çimento ağırlığının %1.5'u kadar nano silika, 28 günlük kür sonunda işlem gören kilin serbest basınç mukavemetini %38'e kadar artırmıştır. Numune morfolojisini değerlendirmek için bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bir atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılmıştır. SEM ve AFM sonuçları nano silikanın mikro yapıyı geliştirdiğini, daha sıkı bir yapı oluşturarak mikro boşlukları azalttığını göstermiştir. Nano silikanın

geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirmesi için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Bahmani vd. (2016) ise, 15 ve 80 nm boyutlarındaki nano silikanın boyut farkı ve katkı miktarının çimento katkılı zeminin fiziksel, kimyasal ve mikro yapısal özellikleri üzerindeki etkileri araştırmıştır. 7, 14 ve 28. günlerde serbest basınç deneyleri ve elektriksel direnç deneyleri, %0.2–%1 nano silika içeriğine sahip olan çimentolu kil örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 15 nm boyutlu nano silikanın numuneler üzerinde hızlandırılmış bir etkiye sahip olduğunu, 80 nm boyutlu nano silikanın ise 14 günlük kürden sonra daha etkili olduğunu göstermiştir.

Changizi ve Haddad (2017), düşük ve yüksek likit limitli kil zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nano silika partiküllerinin kullanımı etkisini araştırmıştır. Zeminlerin Atterberg limitleri, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları, optimum su içerikleri, CBR değerleri, konsolidasyon parametreleri ve serbest basınç mukavemetleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan nano silika oranları %0.5, %07 ve %1.0 olarak belirlenmiştir. Hem Atterberg limitleri hem de CBR değerleri, artan nano silika içeriği ile iyileşmiştir; plastisite indisinde bir azalma ve rötre limitinde bir artış gözlenmiştir. Stabilize edilmiş zeminin doğal zeminin yaptığı oturma miktarına kıyasla oturma miktarının azalması, zeminin ön konsolidasyon basıncında bir artışa neden olan zemin- katkı maddesi etkileşimi sonucu zemin yapısında bir viskoz jelin oluşmasına bağlanmıştır. Bu viskoz jelin oluşması, iyileştirilmemiş yumuşak killi zeminin 70 kN/m² olan ön konsolidasyon basıncını, %0.7 nano silika ile stabilize edildiğinde 300 kN/m²'ye çıkarmıştır. Serbest basınç mukavemeti de %56'ya kadar artmıştır. Nano silika içeriğinin artmasıyla göçme anında ölçülen deformasyonlar küçülmüş ve elastik modül değerleri büyümüştür. Nano silika ilavesinin kilin mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

García vd. (2017) Meksika'da bulunan yumuşak bir göl tabanı kilinin stabilizasyonunu, %0.5, %0.7, %1 ve %3 oranlarında nano silika ilavesi yaparak araştırmıştır. Nano silika eklenmesinin zemin numunelerinin mukavemetini artırdığını ve ayrıca kilin hassasiyet derecesini de azalttığını göstermiştir. Su içeriği %200 olan bir kilde %3 nano silika ilavesi ile mukavemetin 2 kat artabileceğini ifade etmişlerdir.

Zomorodian vd. (2017), kumlu kil (CL) zeminlerde gerçekleştirilen nano kil ve nano silika malzemeleri kullanarak temiz zemin ve kerosenle kirletilmiş zeminin belirli kür süreleri sonunda mukavemet ve rijitlik özelliklerini incelemiştir. Ağırlıkça %8'den fazla kerosen içeriği nano malzeme ilavesi yapılmış olsa dahi mukavemette azalmaya

sebepler olmaktadır. Ağırlıkça %0.5-2.5 nano partikül ilavesi zeminin mukavemetinde önemli kazanımlar sağlamaktadır. Temiz kil zemin için, ağırlıkça %1 nano kil veya ağırlıkça %1.5 nano silika ilavesi mukavemetinde en büyük gelişmeyi sağlamıştır.

Ghavami vd. (2018) endüstriyel bir atık olan silis dumanını ve nano silikayı, ayrı ayrı kaolinit kiline ekleyerek ortaya çıkan geoteknik özelliklere ve mikro yapısal özelliklere odaklanmıştır. Kaolinite %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı veya %1, %2 ve %3 nano silika ekleyerek iki stabilizasyon malzemesini kıyaslamıştır. Silis dumanı veya nano silikanın kaolinitin optimum su içeriğini artırdığını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalttığını göstermiştir. 28 günlük kür süresi sonunda %15 silika dumanı %70; %3 nano silika ilavesi ise %55 kadar serbest basınç mukavemetini iyileştirmiştir. SEM incelemesi ile nano silikanın daha sıkı bir zemin matrisi oluşturduğu ve daneler arası boşlukların çoğunun nano silika partikülleri ile dolduğu görülmüştür. Nano silika ilavesi silis dumanı ilavesine kıyasla, dane ara yüzündeki topaklanma ürünlerinin boyutunu daha fazla küçültebilme yeteneğine sahip bulunmuştur. Bu doku bazlı olay, stabilize zeminlerin serbest basınç mukavemetini arttıran bir etkidir.

Hu vd. (2018), nano silikanın, siltli kilin serbest basınç mukavemeti ve donma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için, farklı nano silika içeriğine sahip siltli kil üzerinde bir dizi don kabarması ve serbest basınç mukavemeti deneyleri yapmıştır. %0.75 nano silika içeriğine kadar zemin daha gevrek davranırken %0.75 nano silika içeriğinden sonra nano silika miktarının artmasıyla zemin daha sünek davranış göstermiştir. Serbest basınç mukavemetinin artış oranı %1 nano silika içeriğine kadar oldukça yavaş iken %1 nano silika içeriğinden sonra zeminin serbest basınç mukavemeti hızla artmıştır. Siltli kilin serbest basınç mukavemeti, nano silika içeriğinin artması ile orantılı olarak yükselmiş ve nano silika içeriği %5 olduğunda 6.65 kat artmıştır. Bununla birlikte, nano silika içeriğindeki artışlarla don kabarmasına bağlı gelişen şekil değiştirmeler azalmıştır. Siltli kile nano silika ilavesiyle viskoz jel oluşumu, bağlanmayı arttırmış ve siltli kil partikülleri arasındaki boşlukları doldurmuştur, bununla birlikte zemindeki suyun geçişini engellemiştir. Numune artan nano silika içeriği ile genel olarak olumlu sonuç vermekte olup bu, serbest basınç mukavemetinde bir artışa ve don kabarmasına bağlı şekil değiştirmelerde bir azalmaya neden olmuştur.

Kalhor vd. (2019), donma çözülme çevrimlerinin nano partiküller ile stabilize edilen numuneler üzerindeki etkileri araştırmış olup bu amaçla, nano silika, en fazla dokuz çevrim donma çözülme tabii tutulan ince daneli zeminlerde katkı maddesi

olarak kullanılmıştır. Standart Proktor, Atterberg limitleri ve serbest basınç deneyleri dâhil olmak üzere çeşitli laboratuvar deneyleri, nano silika ile ilave edilmiş kil zeminler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Zeminler 42 güne kadar küre tabi tutulmuş olup sonuçlar, killi zeminin nano silika katkısı ile optimum su içeriği, likit limit ve plastik limit değerlerinin artarken maksimum kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisinin azaldığını göstermektedir. 42 günlük kür süresi sonunda %2'ye kadar nano silika ilavesi ile serbest basınç mukavemetini yaklaşık %63 oranında yükselmiş, buna ek olarak nano silika içeriğindeki artış, numunelerin gevrek davranışına yol açmıştır. Donma çözülme çevrim sayılarının artması ile hem nano silika katkılı zeminlerin hem de katkısız zeminlerin serbest basınç mukavemetleri azalmıştır. Farklı boyutlarda aynı örnekleri hazırlayarak örnek boyutunun serbest basınç mukavemetine olan etkisi incelenmiştir. Numune boyutlarının arttırılması gerek işlem görmemiş gerekse işlem görmüş zeminin serbest basınç mukavemetini önemli ölçüde değiştirmemiştir.

Nezhad vd. (2021), katkı maddesi olarak kireç ve nano silika kullanarak, gaz yağı ile kirletilmiş bir kilin iyileştirilmesi amaçlamıştır. Örnekler, zemine kuru ağırlığınca %3, %6 ve %9 miktarlarında gaz yağı karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Kirletici maddenin eklenmesi, likit limit ve plastik limitini arttırmış ve zeminin maksimum kuru yoğunluğunu ve optimum nem içeriğini düşürmüştür. Zeminin serbest basınç mukavemeti, %3 kirletici madde eklendiğinde önce artmış, kirletici madde miktarı arttırıldıkça serbest basınç mukavemeti azalmıştır. Ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 kireç ve nano silika eklenmesiyle zeminlerin likit limit, plastik limit, optimum nem içeriği ve serbest basınç mukavemeti artmış, işlem gören zeminlerin maksimum kuru yoğunluğu azalmıştır. Sadece kireç veya sadece nano silika kullanılması yerine bu malzemelerin karışım halinde zemine eklenmesi serbest basınç mukavemetini arttırmıştır. Nano silika-kireç karışımı %3 olduğunda, serbest basınç mukavemeti önemli bir miktarda artış göstermektedir.

Thomas ve Rangaswamy (2020), nano silika partikülleri ve çimento ile karıştırılan yumuşak bir kilin Atterberg limitlerini ve serbest basınç mukavemetini incelemiştir. Yüksek derecede sıkışabilir olan yumuşak kilin orta-sert kıvama az bir miktar çimento ve nano silika kullanılarak erişebileceği gösterilmiştir. Nano silikanın (17 nm) boyutu ve nano silika partiküllerinin yüksek reaktivitesi 28 günlük kür süresi boyunca zemin mukavemetinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. %1 çimento içeriğinde optimum nano silika miktarının yumuşak kili, sert ve orta sert bir zemine dönüştürmede etkili bir formül olduğu bulunmuştur. Bu iyileştirme yönteminin ekonomik olduğu ve çevreye daha az zarar verdiği kanıtlanmıştır.

Tomar vd. (2020), nano silikaya ek olarak geri dönüştürülmüş polipropilen lifin etkisini kil zeminin mekanik özelliklerini geliştirmek için yeni bir teknik olarak incelemiştir. Nano silika ve polipropilen lifin kil zemin ile optimum kombinasyonunu sunmuşlardır. Doğal zemin, nano silika - zemin ve nano silika - polipropilen lif - zemin karışımları incelenerek serbest basınç deneyleri yapılmıştır. %1, %3, %5 ve %7 oranlarında nano silika ve %0.1, %0.4, %0.7, %1, %1.3 oranlarında polipropilen lif zemine katılmıştır. Sonuçlara bakıldığında nano silikaya ilave olarak polipropilen lif katılması ile zeminin serbest basınç mukavemetinin arttığı ve bunun sebebinin nano silikanın polipropilen lifin dış yüzeyini sararak zemin partikülleri ile polipropilen lif yüzeyi arasında daha iyi bir bağ oluşmasını sağlamasıdır. Nano silika için %7 ve polipropilen lif için %0.7 oranlarının optimum değerler olup bu değerlerle zeminin maksimum serbest basınç mukavemetine ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Barbhuiya ve Hasan (2020), nano silikanın kil ve silt zeminlerde (CL/CH/ML ve çimento eklenmiş CL) serbest basınç mukavemeti ve kayma mukavemetini üzerindeki etkisini araştırmıştır. Zemine karıştığında dolgu malzemesi gibi davranan nano silika, zeminin kompaksiyon özelliklerini değiştirmiş; CBR ve elastisite modülünü arttırmıştır. Ancak geniş yüzey alanı ile daha çok su absorbe edebilmesi sebebiyle plastisitenin azalmasına sebep olmuş ve zemindeki boşlukları doldurmasına bağlı olarak zeminin hidrolik iletkenliğini azaltmıştır. Nano silika ilavesi ile zeminlerin serbest basınç mukavemeti artmış ancak optimum miktara ulaşan nano silika partiküllerinin zeminde homojen olarak dağılamaması zeminin serbest basınç mukavemetini azaltmıştır. Zemine nano silikanın dâhil edilmesi işlem görmüş zeminin kohezyonunu iyileştirmiş ancak içsel sürtünme açısını azaltmıştır. Ancak, kohezyonun artış hızı, içsel sürtünme açısının azalma oranından daha fazla olduğu için toplam kayma mukavemeti önemli ölçüde artmıştır.

2.2 Kum Zeminler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Choobbasti vd. (2015), nano silika partiküllerinin ve puzolanların çimento esaslı malzemelerin yapısal özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir. Çimento ve nano silika, kumun mühendislik özelliklerini geliştirmek üzere kullanılmıştır. Kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Üç farklı çimento oranı (kuru kum ağırlığının %5, %9 ve %14'ü), dört farklı nano silika oranıyla (çimento ağırlığının %0, %5, %10 ve %15'i) karıştırılmış ve silindirik bir numune oluşturacak şekilde sıkıştırılmıştır. Çimento içeriğindeki artışla birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlıkta artış kaydedilmiştir. Optimal yüzdelerde nano silika kullanımı, çimentolu kumun mekanik

özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir; %5 çimento ile birlikte nano silika ilavesi sonucunda en yüksek iyileştirme oranını göstermiştir.

Kutanaei ve Choobbasti (2016), %2, %4 ve %8 nano silika içeriğine sahip çimento katkılı kum zeminin kür süresine bağlı olarak ultrasonik darbe hızını ve serbest basınç mukavemetini araştırmıştır. Nano silika miktarının artması ile zemindeki boşlukların azalmasına bağlı olarak zeminin ultrasonik darbe hızı artmıştır. Özellikle %8 nano silika içeriğinde ultrasonik darbe hızı önemli ölçüde artmıştır. Kür süresinin artmasına bağlı olarak da zeminin hem serbest basınç mukavemeti hem de ultrasonik darbe hızı artmıştır. Bu durum kür süresi daha uzun olan zeminlerde meydana gelen hidrasyon gelişimi ve zemin matrisindeki mikro çatlakların azalması ile açıklanmıştır.

Choobbasti ve Kutanaei (2017), nano silikanın çimentolu kumlu zeminin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir program yürütmüştür. Çimento içeriği, kumlu zeminin ağırlığına göre %6 oranında olup nano silika, çimento ağırlığına göre 0, %4, %8 ve %12 oranında eklenmiştir. %80 bağıl yoğunlukta ve optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler 7, 28, ve 90 gün süre ile küre tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi (tüm kür süreleri için) ve kompaksiyon deneyi de gerçekleştirilmiştir. Çimento katkılı zemine nano silika ilave edilmesi ile zeminin optimum su içeriği artmıştır. Bu davranış nano silikanın hidrasyon için daha uygun bir ortam sağlaması ve bu hidrasyon için daha fazla suya gerek duyulması ile açıklanabilir. Nano silika katkısı ile zeminlerin serbest basınç mukavemetleri incelendiğinde zeminin optimum nano silika (%8 nano silika içeriği) içeriğinde iken serbest basınç mukavemetinin arttığı ancak nano silika miktarının %12'ye kadar artırılması ile serbest basınç mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Nano silika, çimentolu kumlu zeminin daha yoğun, daha düzgün bir yapı kazanmasına katkıda bulunmuştur. Nano silikanın çimentolu zemine eklenmesinin, kalsiyum silikat hidrat pikinin yoğunluğunu ve kalsiyum hidroksit piklerinin yoğunluğunu arttırdığı gözlenmiştir. Çimento ile stabilize edilmiş kumlu zemine optimum miktarda nano silika eklenmesinin, mekanik özellikleri ve mikro yapı özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

2.3 Silt veya Lös Zeminler Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Haeri vd. (2015), nano silika, kireç ve Portland çimentosu ile iyileştirilmiş lös zeminlerin deformasyon ve mukavemet özelliklerini değerlendirmek amacıyla laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Bu araştırmada, farklı zamansal koşullar ile birlikte her bir katkının farklı yüzdeleri incelenmiştir. Sonuçlar, zemin mukavemetinin ve çökmeye karşı direncin artma oranının, kür süresine ve kullanılan katkı miktarına

önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Serbest basınç deneyi sonuçlarına bakılarak her bir katkı malzemesi için optimum miktar ve kür süresi belirlenmiştir. Kür süreleri 3, 14, 28 gün olarak seçilmiştir. Zeminlere ağırlıkça %2, %3, %5 ve %7 nano silika katkısı ile bir iyileştirme uygulaması yapılması amaçlanmıştır. Nano silika eklenmiş olan lös zeminlerin serbest basınç mukavemeti %3 oranında artış göstermiştir. %3 ve %5 nano silika içeriğine oranla %7 nano silika içeriğindeki artış oranı daha fazladır. Sonuç olarak %3 ile %7 aralığında nano silika içeriği lös zeminin serbest basınç mukavemetinde belirgin bir artış göstermemiştir. Nano silika katkı maddesi ile zemin iyileştirme yapılacak lös zeminlerde minimum %3 nano silika içeriği ile zemin iyileştirmeye başlanabilir.

Cui vd. (2018), karbon fiber ve nano silikanın, siltli zeminin fiziksel, mikro yapısal özellikleri ile kayma direnci üzerine etkilerini araştırılmıştır. Farklı karbon fiber ve nano silika içeriklerinde zemin örnekleri hazırlamıştır. İşlem görmüş zemin numunelerinin kayma mukavemetinin, işlem görmemiş zemin numunelerine kıyasla önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermiştir. Karbon fiber, fiber ve zemin arasındaki ara yüzey sürtünmesi sayesinde içsel sürtünme açısını ve kohezyonu iyileştirmede etkili olup nano silika, zemin daneleri arasındaki gözeneklerin tamamen dolması nedeniyle kohezyonu arttırmıştır. Sonuçlar ayrıca ağırlıkça %2 karbon fiber ve ağırlıkça %3 nano silika kombinasyonunun kayma rijitliğini geliştirdiğini ve özellikle 100 kPa'lık normal gerilme altında yapılan direkt kesme kutusu deneyi ile işlem görmemiş zemin numunesine kıyasla mukavemetin %128.3 oranında arttığını göstermiştir. Cui vd. (2018), geleneksel çimento enjeksiyonu yerine karbon fiberlerin ve nano silikanın kullanımının siltli zemini iyileştirmek için etkili bir yöntem olabileceğini söylemiştir.

Sarli vd. (2020), geri dönüştürülmüş polyester lif ile nano silika kullanarak yeni bir katkı karışımı tanımlamış ve lös zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirmeye çalışmıştır. Özellikle de düşük likit limitli siltli lös kullanılarak geri dönüştürülmüş polyester lif ve nano silikanın maksimum kuru birim hacim ağırlık ve kayma mukavemetine olan etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Zeminin kuru ağırlığının %0.5, %1, ve %1.5 arasında değişen üç farklı lif-zemin oranı kombinasyonu ve %2, %4 ve %6 arasında değişen üç farklı nano silika oranı kombinasyonu kullanılmıştır. Kompaksiyon deneyleri sonuçları geri dönüştürülmüş polyester lif ve nano silika eklenen zeminin optimum su içeriği artarken stabilize lősün maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığını göstermiştir. Direkt kesme deneyinin sonuçlarına göre, zemin karışımındaki geri dönüştürülmüş polyester lif ve nano silika içerikleri artırılarak kesme mukavemeti iyileştirilmiştir. Böylece, geri dönüştürülmüş polyester lif ve nano silikanın eklenmesi, lös zeminin mukavemet özelliklerini geliştirmiştir. Kayma

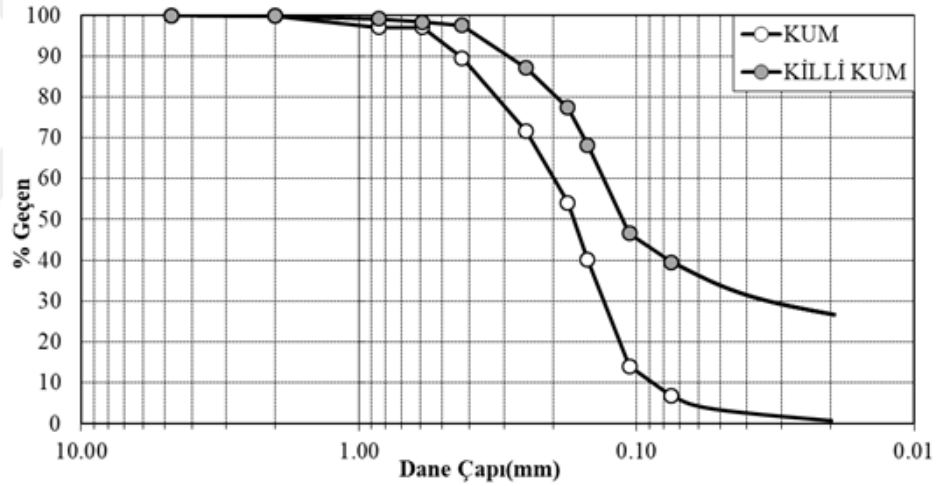
mukavemetinde maksimum artışı elde etmek için, geri dönüştürülmüş polyester lif ve nano silikanın optimum miktarı, lös zeminin kuru ağırlığının %4'ü kadardır.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Malzeme

Bu tez çalışmasında 3 farklı zemin ile çalışılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla kil zemin, Çanakkale'deki bir kaolin yatağından malzeme temin eden bir firmadan toz formda elde edilmiştir. Kum zemin ise İzmir'de bir temel kazısı sırasında tespit edilerek laboratuvarımıza getirilmiştir. Killi kum zemin ise laboratuvarında ağırlıkça %30 kaolin ve %70 kumun karıştırılması ile hazırlanmıştır. Kullanılan zeminlerin zemin sınıfları Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre belirlenmiştir (ASTM D2487, 2017). Kil zemin “düşük plastisiteli silt”, killi kum zemin “siltli, killi kum” kum zemin ise “kötü derecelenmiş siltli kum” olarak tanımlanmıştır. Zeminlerin ASTM D6913 (2017) ve ASTM D4318 (2017) standartlarına uygun olarak belirlenen dane boyu dağılımı eğrileri Şekil 3.1'de, indis özellikleri ise Tablo 3.1'de verilmiştir.



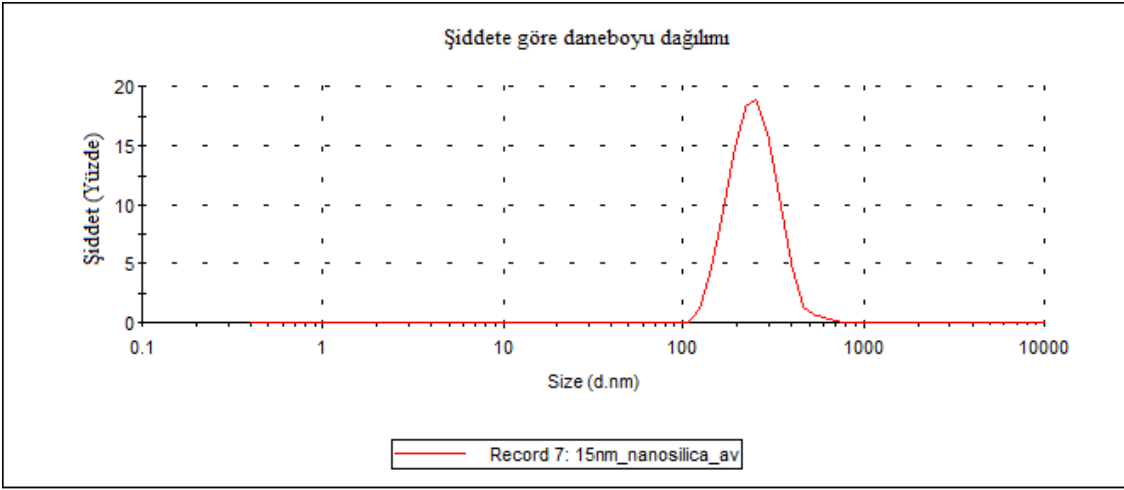
Şekil 3.1. Kum ve killi kum zeminin dane boyu dağılımları

Tablo 3.1. Zeminlerin İndis Özellikleri

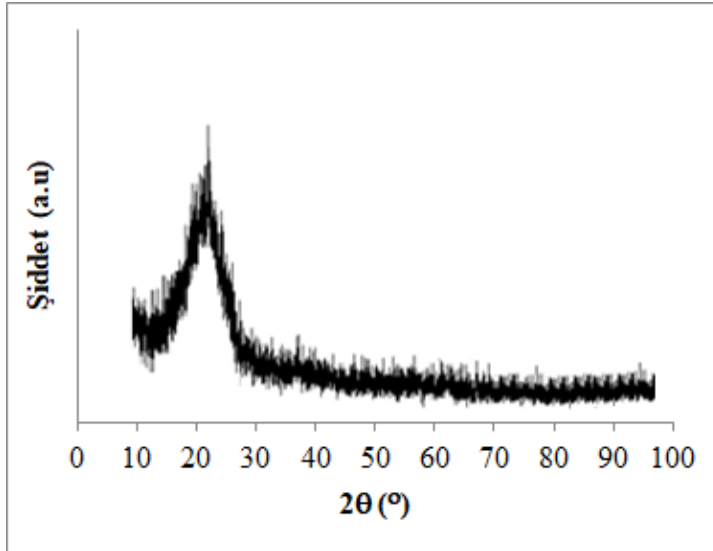
Geoteknik Özellik	Kum	Killi Kum	Kil
Zemin Sembolü	SP-SM	SC-SM	ML
Likit Limit (%)	-	-	49
Plastik Limit (%)	-	-	31
Plastisite İndisi	-	-	18
İnce Dane Miktarı (%)	7	40	100
Optimum Su İçeriği (%)	17.5	16	32

Çalışmada 15 nm boyutunda ve %99.5 saflıkta nano silika partikülleri kullanılmıştır. Teknik özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir. Nano silikanın dane büyüklüğü ölçümü temel

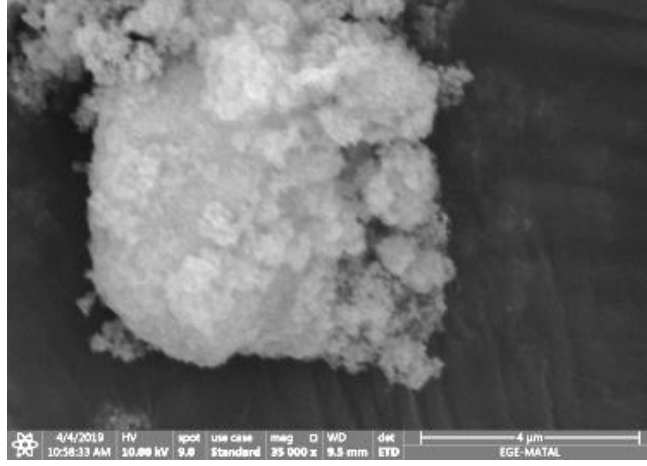
olarak dinamik ışık saçılımı (DLS) prensibine dayanan Zetasizer (Malvern) ile 25°C sıcaklık ve çözücü olarak su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şiddete göre dane dağılımı grafiği elde edilmiş, malzemenin kalitesi “iyi” olarak nitelendirilmiştir (Şekil 3.2(a)). X ışını difraktometresi (XRD) ile a Cu-K α monokromatik radyasyon kaynağı kullanılarak nano silikanın kristal yapısı ve morfolojisi belirlenmiştir. 23° (2 θ) üzerinde ortalanmış karakteristik kırınım pikinin genişliği nano silikanın amorf yapıda olduğunu göstermiştir (Şekil 3.2(b)). Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve taramalı geçirmeli elektron mikroskobu (STEM) yardımıyla da nano silikanın topaklı bir yapıdaki küresel şekli (Şekil 3.2(c)) ve mikroskop üzerinden ölçülen nano silikanın boyutları (Şekil 3.2.(d)) gösterilmiştir. Böylece nano silikanın çalışmada kullanılması için gerekli tüm şartları sağladığı ve kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir.



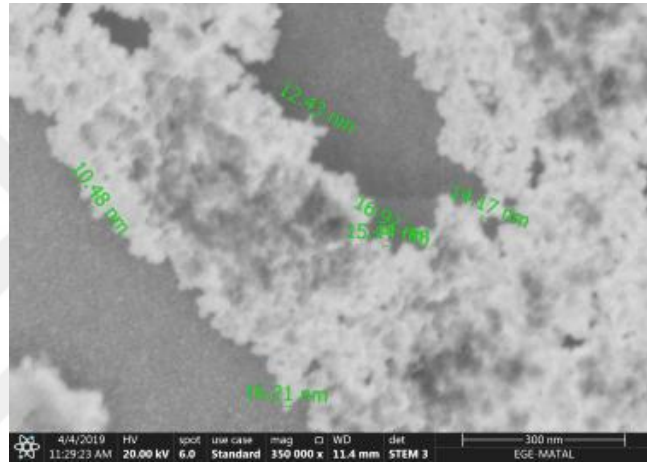
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.2. (a) Nano silikaya ait dane boyu dağılımı, (b) X- ışını difragtamı, (c) SEM ve (d) STEM görüntüleri

Tablo 3.2. Nano Silikanın Fiziksel Özellikleri

Safılık (%)	99.5			
Renk	Beyaz			
Ortalama Parça Boyutu (nm)	15 veya 60			
Spesifik Yüzey Alanı (m²/g)	150-550			
Toplu Yoğunluk (g/cm³)	<0.1			
Gerçek Yoğunluk (g/cm³)	2.2			
Element Analizi (%)	Fe	Ca	Ti	Na
	0.002	0.007	0.012	0.003

Çimento, Bolu Çimento'dan temin edilmiştir. Örnekleri işlemek için bir stabilize edici ajan olarak sıradan Portland çimentosu (OPC) tercih edilmiştir. Kullanılan çimento sınıfı CEM I 42.5 R'dir (Tablo 3.3). Çimento yüksek oranda klinker içermesi nedeniyle hızlı mukavemet kazanım özelliğine sahiptir.

Tablo 3.3. Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Özellik	Miktar	Özellik	Miktar
CaO (%)	64.06	S.Kireç (%)	2.21
SiO ₂ (%)	17.74	Ölçülmeyen (%)	0.64
Al ₂ O ₃ (%)	4.76	K.Kayı (%)	1.95
Fe ₂ O ₃ (%)	3.17	Ö.Ağırlık (%)	3.13
K ₂ O (%)	0.80	Blaine(m ² /kg) (%)	331
MgO (%)	1.28	45 µm Üstü (%)	4.2
Na ₂ O (%)	0.45		
SO ₃ (%)	2.94		

3.2 Yöntem

Tez çalışmasında nano silika katkısının zeminlerin geoteknik özelliklerinde oluşturduğu etkileri incelemek üzere kapsamlı bir deney programı oluşturulmuştur (Tablo 3.4). Deney programında belirtilen çimento ve nano silika içerikleri kuru zemin ağırlığının üzerine bu zemin ağırlığına ilave olarak eklenen yüzde cinsinden katkı oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 3.4. Deney Programı

Deney Adı	Zemin Türü	Çimento İçeriği (%)	Nano Silika İçeriği	Kür Süresi (gün)
Atterberg Limitleri	Kil, killi kum	0/5/10	0/0.3/0.5/0.7	-
Kompaksiyon	Kil, killi kum, kum	0/5/10	0/0.3/0.5/0.7	-
Serbest Basınç Mukavemeti	Kil, killi kum, kum	0/5/10	0/0.3/0.5/0.7	7, 28, 90, 150
Ultrasonik Darbe Hızı	Kil, killi kum, kum	5/10	0/0.3/0.5/0.7	28/90
Donma Çözülme (12 çevrim)	Kil, killi kum, kum	5/10	0/0.3/0.5/0.7	150
Kesme Kutusu	Kil, killi kum, kum		0/0.5	

Atterberg limitleri belirlenirken likit limit deneyleri ve plastik limit deneyleri ASTM D4318 (2017) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle zemin ile çimento kuru olarak karıştırılmıştır. Bu karışıma ardından nano silikanın su içerisinde 5

dk boyunca yüksek devirli bir (120 rpm) karıştırıcıyla çözülmesi gerçekleştirildikten sonra kuru karışıma eklenmiştir. Deney boyunca zeminin su içeriği artırılarak likit limit belirlenmeye çalışılmıştır. Casagrande yöntemi uygulanarak en az 5 noktada su içeriği-darbe sayıları ölçümleri alınmıştır. Bu 5 nokta ile elde edilen akış eğrisinden 25 darbeye karşılık gelen değer likit limit değeri olarak belirlenmiştir. Plastik limitin tayininde ise nano silika mümkün olan en az su miktarı ile karıştırıcı yardımıyla çözülmüş ve kuru karışıma eklendikten sonra deney yapılmıştır. Zemin örneklerinin çimento içermesi nedeniyle gerek likit limit gerekse plastik limit, çimento hidrasyonunun kısa sürede başlayacağı dikkate alınarak hızlı bir şekilde tamamlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Plastik limit deneyi

Kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesinde standart Proktor enerjisi ile çalışılmıştır (ASTM D698, 2012). Her zemin karışımı için zemin örneği kalıba 3 kademedede 25 darbe ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Su içeriği her kademedede artırılmış, zemin ağırlığı azalmaya başladığı tespit edildikten sonra en az 1 kez daha deneye devam edilmiştir. Her örneğe ait kompaksiyon eğrileri hazırlanmıştır. Böylece, örneklerin optimum su içerikleri ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur.

Nano silikanın, çimento katkılı/katkısız zemin numunelerinin mukavemet davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Optimum su içeriğinde 5 cm yarıçapında ve 10 cm yüksekliğinde hazırlanan zemin örnekleri 7, 28, 90 ve 150 gün küre tabi tutulmuştur (Şekil 3.4). Serbest basınç mukavemeti deneyleri ASTM D2166 (2016) standardına göre yapılmıştır. Kür süresi sona eren numuneler deney aletine alt ve üst başlıklar ortalanarak ve numunede deneyden önce yükleme oluşmasına izin vermeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Ardından bilgisayarda DS7 programı açılıp ardından UCST seçeneği seçilmiştir. Her bir birim

şekil değiştirmesinin değer okuma ağırlığı numunenin s¼neklięine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çalışmada okuma değeri 0.05-0.09 mm seçilmiştir. Ardından birim şekil değiştirme ve y¼kleme kuvveti değerleri sıfırlanarak DS7 programının okuma almaya başlamasıyla eş zamanlı olarak y¼kleme de manuel başlatılmıştır. Örnekler 1.42 mm/dk hızla y¼klemeye tabi tutulmuştur (şekil 3.5). En y¼ksek kuvvet değeri okunarak g¼çme g¼zlemlendikten sonra deney %10 deformasyon seviyesine kadar g¼zlemlenmiřtir ve l¼mler bilgisayara kaydedilmiştir.



şekil 3.4. Serbest basınç deneyi numuneleri k¼r aşaması



şekil 3.5. Serbest basınç deneyi numunelerinin kırım aşaması

Kesme kutusu deneylerinde ASTM D3080 (2011) standardına uygun olarak zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri incelenmiştir. ASTM D3080 standardı, drenajlı kesme mukavemeti parametrelerini elde etmek için drenajlı yükleme koşulları altında kohezyonlu zeminleri test etmek için de uygulanabilir. Deneyde, örnek alt-üst filtre kâğıtları ve poroz taşlar arasına yerleştirilmiştir. Tokmakla hedef yoğunluğa ulaşmak için sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Kesme kuvveti yükleme sistemi, yük ölçüm cihazına hiçbir kuvvet aktarmayacak şekilde ayarlanmıştır. Kesme hücresi deney aleti içerisine yerleştirilmiştir. Kesme kutusunun alt ve üst parçalarının birbirinden ayrılmasını engelleyen vidalar sıkıştırılmıştır. Kayma yer değiştirmesini ölçmek için kullanılan yatay yer değiştirme ölçüm cihazı uygun şekilde ayarlanmıştır. Başlangıç okuması sıfır olacak şekilde ayarlanmıştır. Kalibrasyonun amacı, örnek konsolidasyon yüklemesine maruz kaldığında cihazın deformasyonundan bağımsız olarak örneğin düşey deformasyonunu belirlemektir. Kesme kutusu su ile doldurulmuş ve deney boyunca dolu bırakılmıştır. Kaldıraç kolu askısına uygun yük eklenerek normal gerilmeler uygulanmıştır. Deneyler drenajlı koşullarda 54.5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa normal gerilme değerleri altında yapılmıştır. Kum zeminlerde ani oturma gelişmesi nedeniyle konsolidasyon aşaması oldukça kısa sürmüştür. Kesme işlemi bu nedenle kısa süre sonra uygulanmış iken killi kum ve kil zeminlere 24 saat sonra uygulanmıştır. Konsolidasyon aşaması tamamlandığında kesme işleminden önce alt ve üst kısmı birlikte tutan vidalar çıkarılmıştır. Tüm deneyler sabit bir kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Kesme hızı 1 mm/dk olarak uygulanmıştır. Kırılma anına ulaşana değin oluşan gerilmeler ile yatay ve düşey deformasyonlar kayıt altına alınmıştır. Üç yükleme seviyesine ait deneyler tamamlanınca örnek grubunun temsil ettiği kayma mukavemeti açısı ile kohezyon bulunmuştur. Her örnek grubu için 3 adet örnek hazırlanmıştır ve deney verilerinin ortalamaları alınmıştır.

150 günlük örnekler üzerinde donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Deney öncesinde örnek ağırlıkları hassas terazi ile tartılıp kaydedilmiştir. Donma çözülme deneyi, Örnekler 12 adet donma çözülme evresine maruz bırakılmıştır. Deneyde donma sıcaklığı -18 ± 2 °C aralığında ve çözülme sıcaklığı ise $+20\pm 2$ °C aralığındadır. Maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa varma süresi 24 saat, minimum sıcaklıktan maksimum sıcaklığa varma süresi 24 saat olarak uygulanmıştır. Donma çözülme çevrimlerini tamamlayan örnekler, kür odasına alınmış ve normal şartlar altındaki sıcaklığa gelmesi için en az 3-4 saat bekletilmiştir. Bunun yapılma sebebi ise örneğin iç kısmında olası çözülme kısımlarının çözülmesini ve örneğin donma çözülmeden önceki haliyle aynı şartlarda değerlendirmesini sağlamaktır. Donma çözülmeye tabi tutulan örneklerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülerek kaydedilmiş ve ardından serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.

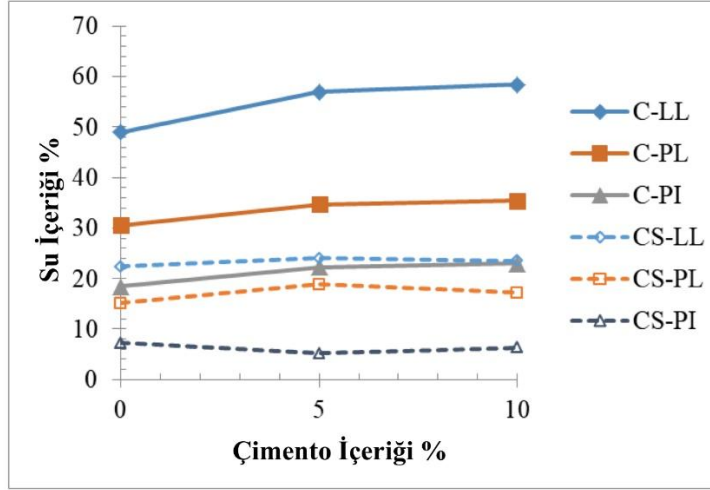
Ultrasonik darbe hızı ölçüm cihazları, yoğunluk, porozite, mukavemet gibi zeminin özelliklerinin incelenmesi amacıyla kullanılabilir. Stabilize zemin örneklerinin akustik dalga hızı, dalganın örnek boyunca hareket ettiği süre ve örnek boyutu ile belirlenebilir. Ultrasonik darbe hızı ölçüm cihazları ses üstü dalga jeneratörü, transdüserler ve osiloskop ünitesi olmak üzere üç elemandan oluşmaktadır. Ultrasonik cihaza kablolarla bağlı olan transdüserlerden birisi dalga gönderici diğeri ise dalga kaydedici olarak kullanılmaktadır. Kür odasında alınan örneklerin ultrasonik darbe hızı ölçümleri yapılmadan önce cihaz kalibre edilmiştir. Ultrasonik dalgaların örneğin yüzeyinden içeri girebilmesi amacıyla başlıklara birleştirici madde sürülmüştür. Kalibrasyon amacı ile kullanılan çelik silindir malzemenin yüzeylerine başlıklar temas ettirilmiş ve malzemenin bilinen değeri elde edilinceye kadar cihaz ayarlanmıştır. Daha sonra cihaz çalışır durumda iken, dalga gönderici başlık, ölçüm yapılmak istenen örneğin üzerine tamamen temas edecek şekilde elle bastırılarak ölçüm alınmıştır. Transdüserler hizalanmış ve numune içinden dalgaların en kısa seyahat yolu ile geçmeleri sağlanmıştır. Numunelerin yüksekliğinin ultrasonik titreşimlerin dalga boyunu aşmasına dikkat edilmiştir. Ultrasonik test cihazının dalga gönderici ve alıcı transdüserlerini farklı şekillerde konumlandırarak da ölçüm yapmak mümkündür ancak doğrudan iletim tekniği, diğer iletim teknikleri arasında en hassas olanı olduğu için numunelerin boylamasına uzunluğu boyunca uygulanmıştır (Panzer vd., 2011). Gönderici transdüser ile örneğin yüzeyinden içeriye gönderilen dalgalar, örneğin diğer yüzeyindeki alıcı transdüser ile kaydedilmiştir. Cihaz, ultrasonik dalgaların dalga gönderici ve alıcı transdüserler arasındaki mesafeyi ne kadar sürede geçtiğini mikrosaniye birimiyle otomatik olarak belirlemektedir. Dalga hızını elde etmek için transdüserler arasındaki mesafe geçiş süresine bölünmüştür (ASTM C597, 2016).

4. DENEY SONUÇLARI

4.1 Atterberg Limitleri

4.1.1 Saf zeminler ile çimento katkılı zeminlerin Atterberg limitleri

Öncelikle kil ve killi kum zemin örneklerinin Atterberg limitleri belirlenmiştir. Likit limit ve plastik limit deneyleri ASTM D4318'e (2017) uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Plastisite indisi (PI), likit limit (LL) ile plastik limit (PL) değerlerinin farkı olarak hesaplanmıştır. Atterberg limitleri deneyleri öncelikle ayrı ayrı nano silika-zemin karışımları ve çimento-zemin karışımları üzerinde gerçekleştirilmiş daha sonra nano silika-çimento-zemin karışımları üzerinde deneyler tamamlanmıştır. Bu sayede nano silikanın yarattığı değişimler, saf zemin ile nano silika-zemin karışımları ve nano silika-çimento-zemin karışımları ile çimento-zemin karışımlarının farkı olarak gösterilmiştir. Saf zeminler (çimento yüzdesi %0 olan duruma karşılık gelmektedir) ile %5 ve %10 çimento içeriğine sahip zeminlere ait LL, PL ve PI değerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Kil zemin için (C), killi kum zemin için ise (CS) kısaltmaları kullanılmıştır. Kil zeminde, %10 çimento miktarı ile LL %18 (49→58) ve PL %13 (31→35) artmıştır. Locat vd. (1990) ve Chew vd. (2004) bu durumu şu şekilde açıklamaktadır: Kil zeminlere çimento ilavesi ile agregasyon (topaklanma) artmakta ve meydana gelen partiküller kil zemin matrisi içerisinde büyük kümeler oluşturmaktadırlar. Locat vd. (1996) agrega arası boşluklarda sıkışan suyun görünür su miktarını agregalar arası reaksiyonları fazlaca etkilemeden arttırdığını söylemiştir. Killi kum zemin örneklerinde çimento içeriğinin artmasıyla LL belirgin bir şekilde değişmemiştir. PI ise %5 çimento içeriğinde artmış %10 çimento içeriğinde ise hafifçe azalmıştır. %10 çimento oranında çimentolanma ürünleri floküle kil kümelerinin yüzeylerine toplanmış durumdadır ve daha düşük plastisiteye sahip kum partiküllerini barındıran kil kum matrisinde daha büyük boşluklar bulunmaktadır. Zeminin PI'nin azalmasında çimento ilavesinin yarattığı iyonik değişimlere bağlı kimyasal reaksiyonlar sebep olarak gösterilmektedir (Bagherpour ve Choobbasti, 2003).



Şekil 4.1. Çimento katkılı kil (C) ve killi kum (CS) zeminlerin Atterberg limitleri

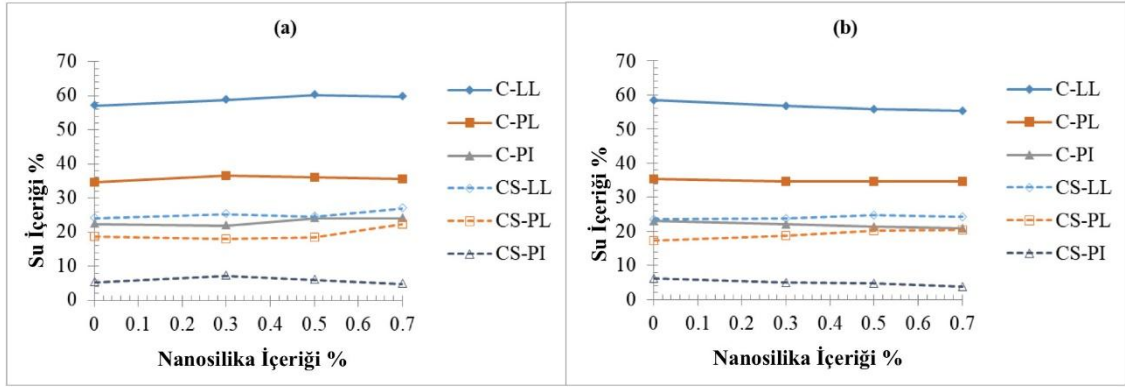
4.1.2 Nano silika-çimento-zemin karışımlarının Atterberg limitleri

%0, %0.3, %0.5 ve %0.7 oranlarında nano silikanın (NS) dâhil edilmesi ile çimento katkılı zeminlerin Atterberg limitlerinde gözlenen değişimler Şekil 4.2’de sunulmaktadır. NS içeren ve içermeyen çimento katkılı kil ve killi kum zeminlerin Atterberg limitlerinde minör düzeyde bir farklılık vardır.

Kil örneklerin PL’leri %35 ve %37 arasında değişmektedir. Bu durumun sebebi NS partiküllerinin plastik olmayan doğasının kil zeminin plastisitesini değiştirememesine bağlanabilir. %5 çimento katkılı kil zeminin %0.3 NS ilavesine kadar PI azalma eğiliminde olup daha sonra artmıştır. Bahmani vd. (2016) kil zemine %6 çimento ilavesi ile gerçekleştirdiği çalışmada PI’inin %0.4 NS içeriğinde arttığını bildirmiştir. PI’ndeki artışın yüksek miktardaki nano partiküllerin aglomerasyonundan (toplanmasından) ileri geldiğini belirtmiştir. Örneklerle eklenen NS oranı ile %5 çimentolu kil zeminlerin LL’i artarken, %10 çimentolu kil örneklerin LL’i azalmıştır. PL’ler oldukça stabil kalmış, PL değerleri LL’lerin değişimine paralel bir şekilde hareket etmiştir. NS ile işleme tabi tutulmuş çimento katkılı killi kum örnekleri LL’leri %24 ile %25 arasındadır. Sadece %0.7 NS içeren %5 çimentolu killi kumun LL’i %27’dir (Şekil 4.2(a)).

NS içeriği artışı ile birlikte killi kum zeminlerin PL’leri de bir miktar artmıştır. %0.3 NS’nın %5 çimento katkılı killi kuma eklenmesi ile deney grubu içerisindeki en yüksek PI’ne (PI=%7) ulaşılmıştır. Ghasabkolaei vd. (2016) %10 çimento katkılı kil zeminlere %1 oranında NS eklediğinde LL ve PL değerlerinin çok fazla değişmediğini

göstermiştir. NS içeriğinin artması, %10 çimento katkıli killi kum örneklerinin PI'ni önemli ölçüde azaltmıştır. En düşük plastisite indisi %0.7 NS ile işlenmiş %10 çimento katkıli numunelerde %4 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.2(b)). PI'ndeki azalma zemin ortamındaki nano partiküllerin desteği ile partiküllerin daha iyi paketlenmesinin (packing) bir sonucu olabilir. Qing vd. (2007) ve Bahmani vd. (2014) nano partiküllerin çok ince su molekülleri ile kaplanabileceğini ve bu nedenle zemin matrisinin daha az miktarda su ile plastikleşebileceğini söylemiştir. Bahmani vd. (2016) çalışmasında 15 nm boyutlu NS'nın Atterberg limitleri üzerinde 80 nm boyutlu NS'ya göre daha etkili olduğunu söylemektedir. Çünkü boyutu küçük olan NS'nın reaktivite özelliği daha fazladır. Hidratasyon işlemleri daha çabuk gerçekleşerek suyun karışım içerisinde kullanımını arttırmaktadır. Bu çalışmada da kullanılan NS'nın boyutunun 15-20 nm olması Atterberg limitlerindeki değişimleri Bahmani vd. (2016) ile uyumlu olarak açıklamaktadır.

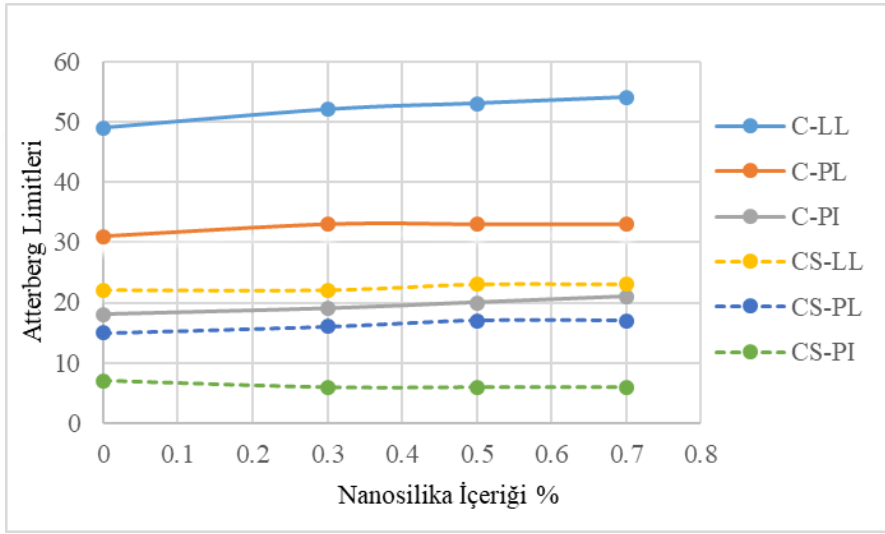


Şekil 4.2. (a) %5 ve (b) %10 çimento katkıli kil (C) ve killi kum (CS) zeminlere NS ilave edilmesi ile Atterberg limitlerinin değişimi

4.1.3 Nano silika-zemin karışımlarının Atterberg limitleri

Zeminlere sadece NS ilavesi ile LL ve PL'lerindeki değişim Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Kil ve killi kum zeminlerde LL, NS ilavesi ile artmıştır. Kil zeminde %0.3, killi kum zeminde ise %0.5 NS ilavesinden sonra PL değerlerinin sabit bir hal aldığı gözlenmiştir. PL'in katkı miktarı arttıkça sabit kalması kullanılacak katkının optimum miktarına erişildiğinin bir göstergesidir. Örneğin kireç ile yapılan zemin stabilizasyonlarında "kireç sabitleme noktasının" bulunması için PL'in sabit olduğu bir nokta aranır (Hilt ve Davidson, 1960). Benzer bir durumun NS zemin karışımları içinde geçerli olduğu düşünülmektedir. Kil zeminlerde PI, LL'in yükselişine bağlı olarak artmıştır. Killi kum zeminlerde ise Atterberg limitleri dar bir aralıkta değişim gösterdiğinden PI'nde önemli bir değişimden bahsetmek mümkün olmamaktadır.

NS'nin özgül yüzey alanı ve katyon değişim kapasitesi oldukça yüksek olup zeminle aktif olarak etkileşime geçebilmektedir. NS partikülleri su molekülleri ile zemin yapısı içinde etkin bir reaksiyona girebilmektedir. Buna sebep olarak kendi kimyasal yapısı ve yüzey/hacim oranının yüksek olması gösterilebilir. Böylece silikanın nano boyutlu boşluklarında su toplanarak zeminin su tutma kapasitesini arttırmaktadır (zeminlerin LL'i artar). Daha evvelki çalışmalarda da nano malzemenin özellikle kil zeminlerin LL ve PL değerlerini arttırdığı raporlanmıştır (Mohammedi ve Niaziyan, 2013; Buazar, 2019). Kil zeminlerde LL değeri (49→54) en fazla %10 artış göstermiş, killi kum zeminlerde ise LL değeri (22→23) %4 artış göstermiştir.

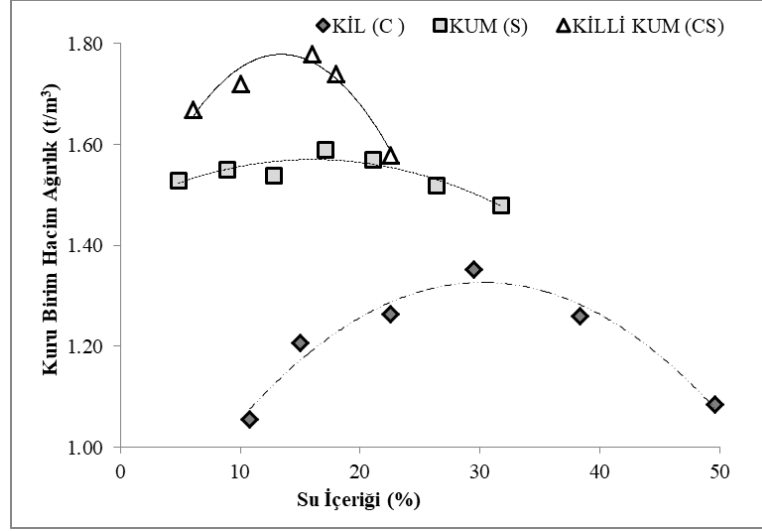


Şekil 4.3. NS katkılı kil (C) ve killi kum (CS) zeminlerin Atterberg limitleri

Genel olarak deney sonuçlarına bakıldığında geomekanik davranışı etkileyecek düzeyde Atterberg limitlerinde bir değişimden söz etmek mümkün değildir.

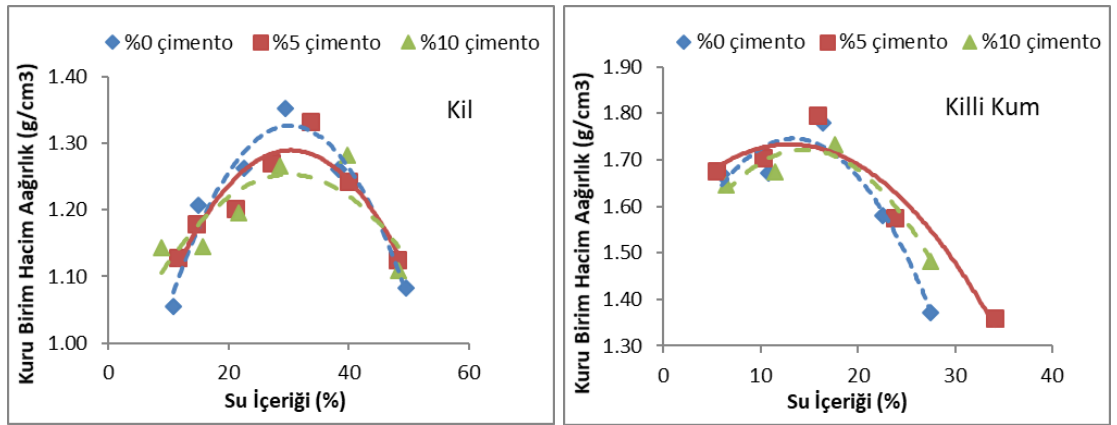
4.2 Kompaksiyon Deneyleri

Kompaksiyon deneyleri ile serbest basınç deneyi için hazırlanacak örneklerin optimum su içerikleri belirlenmiştir. Tez içerisine dâhil edilmiş olan her deney grubunun (Tablo 3.4, deney programı kapsamında verilen) kompaksiyon deneyi ayrı ayrı yapılmıştır. Saf zeminler incelendiğinde kompaksiyon eğrilerinin killi kum, kum ve kil olacak şekilde yukarıdan aşağıya sıralandığı ve malzeme içinde kil içeriği arttıkça optimum su içeriğinin artışı ile beraber kompaksiyon eğrilerinin aşağı yöne ve sağa doğru ilerlediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.4). Kil, killi kum ve kum zeminlerin optimum su içerikleri %32, %16 ve %17.5 olup kuru birim hacim ağırlıkları sırasıyla 1.37 t/m^3 , 1.78 t/m^3 ve 1.58 t/m^3 'tür.



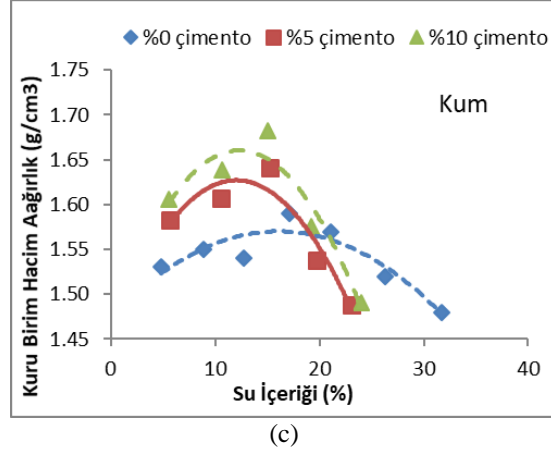
Şekil 4.4. Saf zeminlerin kompaksiyon eğrileri

Saf zemine çimento ilavesi ile zeminlerin maksimum birim hacim ağırlıkları ve optimum su içerikleri değişmiştir. Kil ve killi kum zeminlere çimento ilavesi ile optimum su içeriği artarken, kuru birim hacim ağırlıklar azalmıştır. Kum zemine çimento katkısı, optimum su içeriğini azaltıp maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırmıştır. Choobbasti vd. (2015) kum zeminlerde benzer eğilimleri raporlamışlardır. Bu gelişmenin çimento ile karışan kum danelerinin geniş ve yüksek yoğunluklu (özgül ağırlığı artan) agrega partiküllerine dönüşmesi olarak açıklamışlardır. Kum zemine oranla Portland çimentosunun partikülleri daha incedir. Bu sayede kaba danelerin etraflarındaki boşluklar Portland çimentosunun daneleri ile dolmakta daha sıkı bir yapı oluşturarak maksimum birim hacim ağırlığı arttırmaktadır (Şekil 4.5).

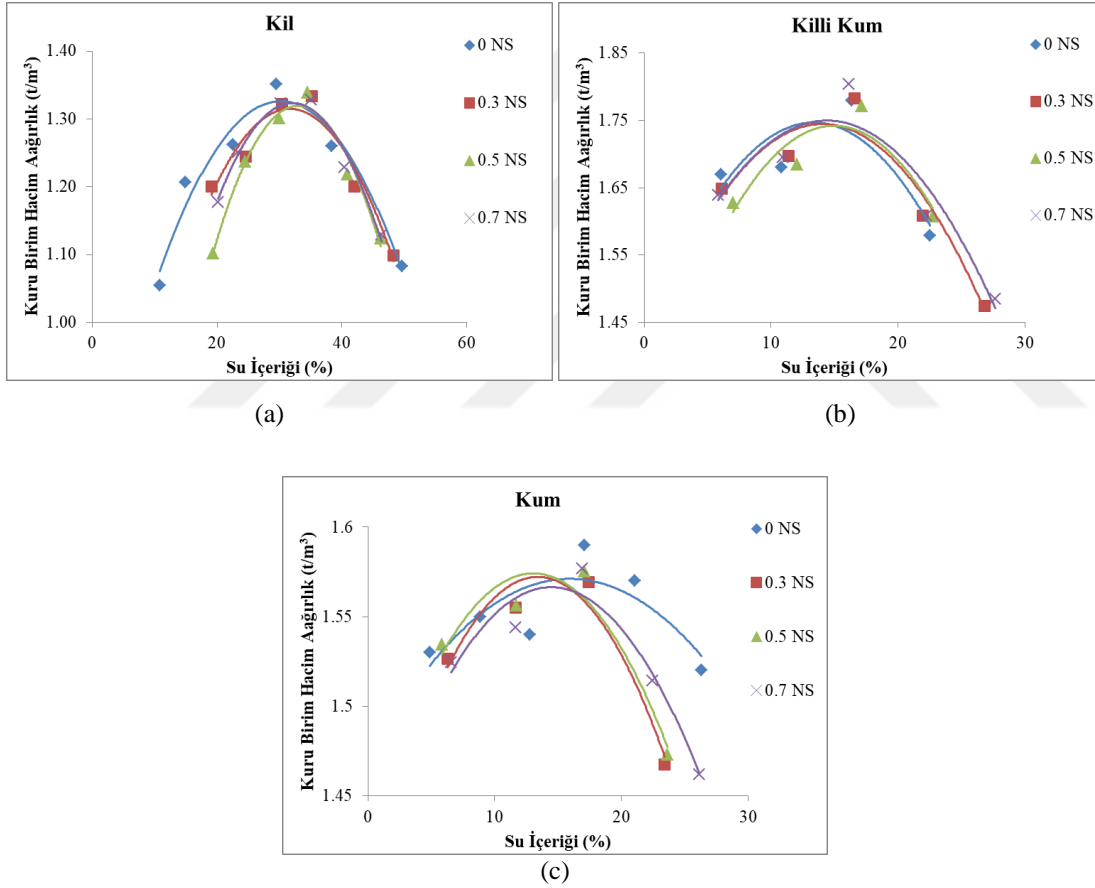


(a)

(b)



Şekil 4.5. Çimento katkı (a) kil, (b) killi kum, (c) kum zeminlerin kompaksiyon eğrileri

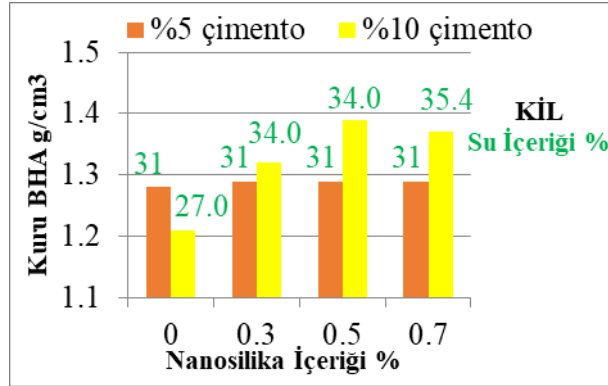


Şekil 4.6. NS katkı (a) kil, (b) killi kum, (c) kum zeminlerin kompaksiyon eğrileri

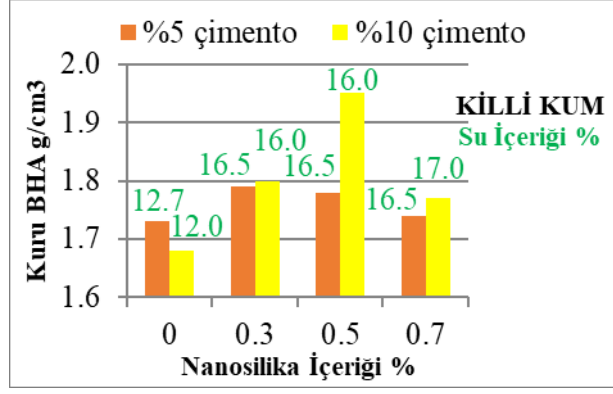
Kil ve killi kum zeminlerde saf zemine NS ilavesi az miktarda optimum su içeriğini arttırmıştır. Ancak eser miktarda NS kullanılması sebebiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda önemli bir değişim gözlenmemiştir. Kum zeminde ise NS ilavesi optimum su içeriğini bir miktar daha azaltmıştır. Yine maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda önemli bir değişim görülmemektedir (Şekil 4.6). Changizi ve Haddad

(2017), saf kile NS ilavesi arttıkça optimum su içeriğindeki artışın nano malzeme ve zemin daneleri arasındaki havanın yer değiştirmesi ve NS tarafından emilen suyun etkisi olduğunu söylemiştir. Zemin - NS karışımları su içeriğinin artışı ile daha sıkışabilir bir hale gelmiştir.

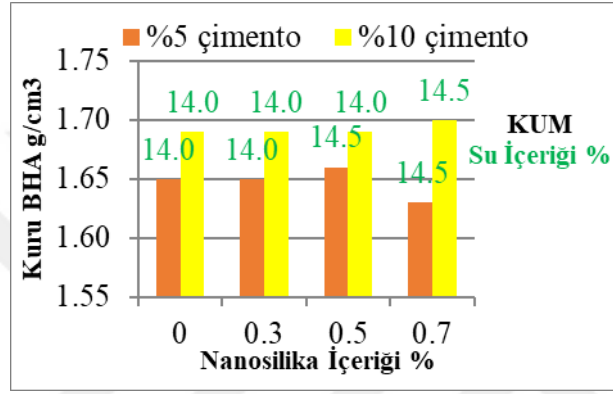
Şekil 4.7’de çimento ve NS katkısı birlikte kullanıldığı zaman ortaya çıkan optimum su içerikleri ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmiştir. Kil zemine NS partikülleri eklendiğinde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği sadece çimento katkılı zemine göre artmıştır (Şekil4.7 (a)). Killi kum örneklerde de benzer bir gözlem yapılmıştır (Şekil 4.7 (b)). Ancak bir zemin örneğindeki çimento içeriğine karşılık gelen optimum NS içeriği zemin türünden bağımsızdır. Örneğin, %10 çimento katkısı ile oluşturulan örneklerin optimum NS içeriği %0.5 iken, %5 çimento içeriği için optimum NS içeriği %0.3’tür. Etkin bir kompaksiyon yapılabilmesi için NS içeriğinin çimento içeriği ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Uygun oranda çimento ve NS’nın varlığı C3S çözülmesini ve aktivitesi boyutuyla ters orantılı olan C-S-H oluşumunu daha da hızlandırır (Aggarwal vd., 2015). Kum zemin örneklerinde ise %5 çimento içeriğinde gerekli olan NS içeriği %0.5, %10 çimento içeriğinde ise %0.7 olmaktadır (Şekil 4.7(c)).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.7. NS-çimento-zemin karışımlarının kompaksiyon deneyi sonuçları (a) kil zemin, (b) killi kum zemin, (c) kum zemin.

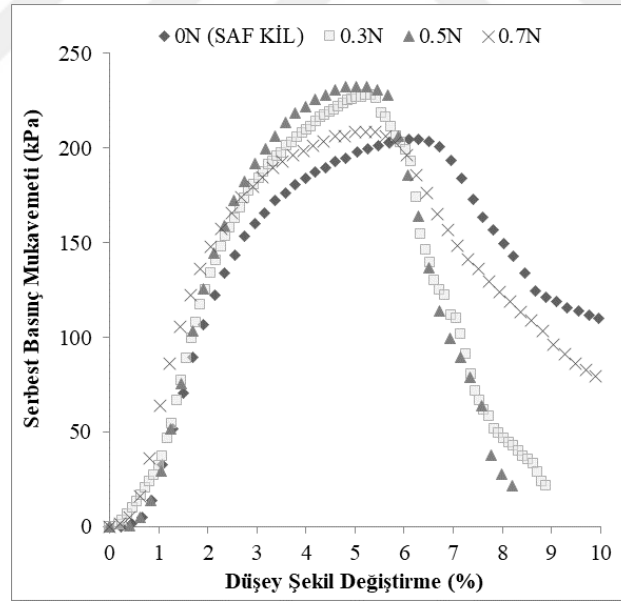
Kum zeminde NS içeriğine göre en büyük optimum su içeriklerinin de maksimum kuru birim hacim ağırlıklarla orantılı olduğu görülmektedir. Nano partiküllerin yüzey alanlarının küçük olması çimentoyla beraber hidrasyon için daha fazla su kullanımını gerekli kılmaktadır (Choobbasti ve Kutanaei, 2017).

4.3 Serbest Basınç Deneylerine Ait Sonuçlar

4.3.1 Kil zeminler

4.3.1.1 Nano silika ve kil zemin içeren örnekler

Tez çalışmasında öncelikle doğal zeminlerin serbest basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Kil zeminin serbest basınç mukavemeti (SBM) 205 kPa olarak bulunmuştur. Zemine NS ilavesi ile %0.5 NS içeriğinde 232 kPa SBM ölçülmüştür. %0.7 NS içeriğinde ise SBM 208 kPa'ya gerileyerek, doğal zeminin mukavemetine eş değer bir mukavemet ölçülmüş olup, NS katkı miktarı artışının mukavemete katkıdan ziyade azaltıcı bir etkisinin olabileceği görülmüştür. Şekil 4.8'den görüleceği üzere doğal zeminde pik SBM'nin ölçüldüğü düşey şekil değiştirme miktarı %6.1 iken %0.5 NS katkılı kil zeminde %4.8'dir. Benzer sonuçlar Changizi ve Haddad (2017) tarafından da raporlanmıştır. NS ilavesi kil zeminlerin doğal zeminle kıyasla daha gevrek davranış göstermesine sebep olmuştur. Hu vd. (2018) 15 nm boyutlu NS kullanarak siltli kil bir zemin üzerinde yaptıkları çalışmada %1 NS ilavesinden sonra mukavemetin artışına eşlik eden düşey şekil değiştirmelerin belirgin bir şekilde azaldığını belirtmiştir.



Şekil 4.8. NS katkılı kil zeminlerin gerilme-düşey şekil değiştirme eğrileri

Mekanik ve kimyasal süreçler mukavemet artışı üzerinde rol oynamaktadır. Kimyasal süreç içerisinde NS, güçlü adsorpsiyon özelliğine sahip bir nano malzeme türüdür. Kile su eklendiğinde, NS, difüz çift tabakası boyunca viskoz bir jel üretir. Viskoz jel nedeniyle kil parçacıkları arasındaki bağlanma kuvveti, emilen sudan çok daha güçlüdür (Şekil 4.9). Ayrıca, viskoz jel partiküller arası mesafeyi azaltır ve kil partikülleri arasındaki temas alanını artırır (Changizi ve Haddad, 2016; Hu vd. 2018).

Ayrıca viskoz jel nedeniyle kil partikülleri arasındaki kohezyon muhtemelen emilen su nedeniyle kil partikülleri arasındaki kohezyondan daha güçlüdür (Changizi ve Haddad, 2017).



Şekil 4.9. Kil partikülleri arasında nano silika etkisi ile oluşan bağ (Changizi ve Haddad, 2017)

Mekanik süreç ise malzemenin kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılmasından ileri gelmekle birlikte fiziksel olarak NS'nın kil mineralleri arasındaki boşlukları doldurması söz konusudur. Ancak, NS partikülünün ortalama çapı 15 nm olduğundan ve NS içeriği bu tez çalışmasında %1'in altında tutulduğundan, kil numunesindeki makro gözenekleri bu kadar az ve küçük partiküllerle doğrudan doldurmak zordur.

Viskoz jel, kil numunesindeki makro gözenekleri bir dereceye kadar doldurur (Lanaman vd. 2014; Hu vd. 2018). Bu nedenle aynı örneklerin kompaksiyon parametrelerine bakıldığında maksimum kuru birim hacim ağırlıkların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.6a).

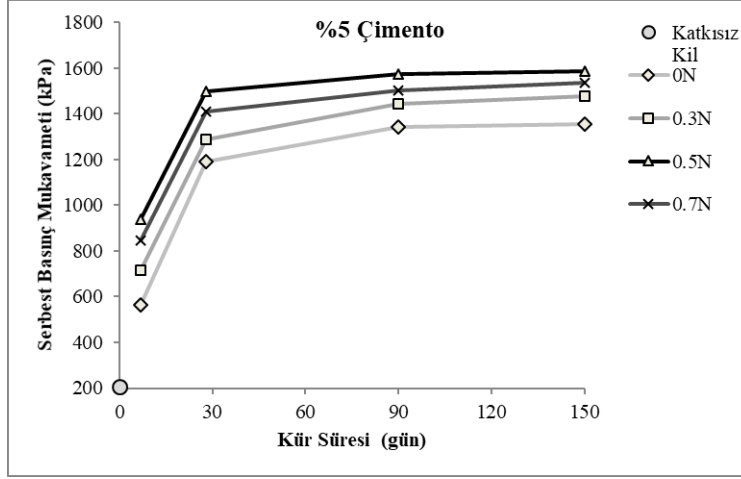
Bundan başka, NS içeren kil zemin örnekleri belli bir süre küre tabi tutulduklarında mukavemetlerinin artması söz konusudur. Vakili vd. (2020) dispersif bir zemin (CL) ve 15-35nm boyutundaki NS kullanarak yaptıkları çalışmada %1 NS ilavesi ile 28 gün sonunda mukavemette 3 kata varan bir artış olduğunu belirtmiştir. Zemine %1 nano silika eklenmesi partiküllerin topaklanmasına neden olmuş ve bu daneler arası boşlukların sayısını azaltmıştır. Topaklanmış bir yapıya dönüşümlerin ardından katyon değişimi gibi kısa süreli reaksiyonların gerçekleştiği belirtilmiştir (Goodarzi ve Salimi, 2015; Vakili vd. 2020).

Tez çalışmasında düşük NS miktarlarında ile çimentonun etkisinin incelenmesi amaçlandığından bu durum incelenmemiştir. Ancak gelecek çalışmalar için bir araştırma konusu olabilecektir.

4.3.1.2 Nano silika, %5 çimento ve kil zemin içeren örnekler

NS ve %5 çimento içeren örnekler, 7, 28, 90 ve 150 gün küre tabi tutulmuştur (Şekil 4.10). 7 günlük mukavemetler 1000 kPa'nın altında olmakla beraber bu mukavemet seviyesi 28 gün sonunda hızla artmıştır. Bu mukavemet artış eğilimi 90 ve 150 günde azalarak devam etmiştir. Sadece %5 çimento içeren örneklerde SBM 7 günde 563 kPa, 150 günde ise 1354 kPa'dır. Bu örnek grubunda en yüksek mukavemet %0.5 NS içeren grupta gözlenmiştir. 28 günde 1499 kPa'ya ulaşılmıştır. Pik SBM'nin gözlendiği düşey şekil değiştirme ise %1.1 olup, bir önceki bölümde ifade edilen, %0.5 NS katkılı kil zeminde gözlenen %4.8 düşey şekil değiştirme değerinin %5 çimento katkısı ile gerilediği ve gevrek davranışın gerçekleştiği görülmektedir. %0.7 NS ilavesi, %0.3 NS'den biraz daha yüksek mukavemet değerleri göstermesine rağmen aynı NS katkılı kil zeminlerde olduğu gibi %0.5'ten fazla NS içeriği mukavemeti azaltmaktadır. Iranpour ve Haddad (2016) ile Nezhad vd. (2021), nano partiküllerin optimum miktardan fazla eklenmesinin kil partiküllerin aglomerasyonunu arttırdığına ve böylece işlem gören zeminin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açtığını söylemişlerdir. Ghasabkolaei vd. (2016) ise bu durumu iki temel etmene dayandırarak şu şekilde açıklamaktadır:

1. *Nano partiküllerin zayıf reaksiyonu:* Nano partiküller, homojen bir dispersiyon göstermemeleri nedeniyle yüksek bir spesifik yüzey alanına sahiptir. Numunedeki nano partikül miktarının artırılması, sabit bir hacimde nano partiküllerin sayısını artırmakta bu da nano partiküllerin zayıf reaksiyonu ile sonuçlanmaktadır. Bu partiküller sonuç olarak zayıf ve kararsız topraklara dönüşmektedir (Hosseini vd. 2009; Ghasabkolaei vd. 2016).
2. *Ca(OH)₂ kristalinin çok az miktarda oluşması:* Artan nano partikül miktarı, yeter miktarda ve istenen özellikte Ca(OH)₂ kristalinin oluşmasını engeller. Sonuç olarak, kristal kompakt C-S-H jel oranı azalır. Mukavemet azaltılırken çimento matrisi de zayıflar. Yetersiz Ca(OH)₂ kristalinin varlığında, puzolanik reaksiyon meydana gelmez. Bu nedenle numune yapısında çatlaklar oluşur ve mukavemet gelişemez (Li vd. 2006; Li vd. 2007; Beigi vd. 2013; Ghasabkolaei vd. 2016).



Şekil 4.10. NS ve %5 çimento içeren kil örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler

4.3.1.3 Nano silika, %10 çimento ve kil zemin içeren örnekler

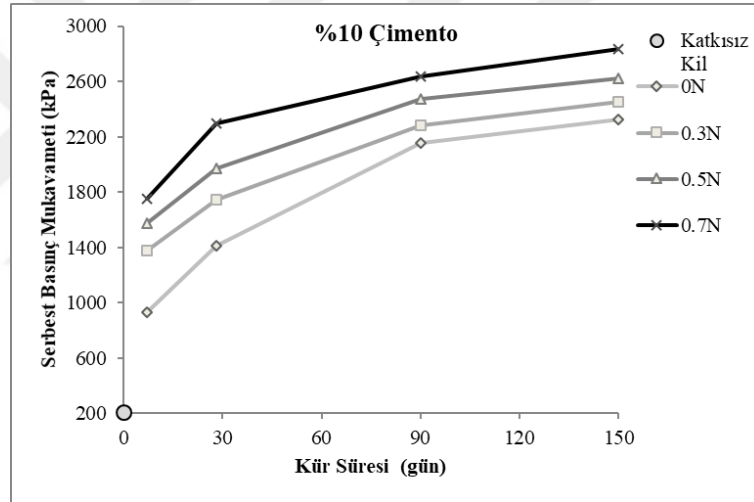
Sadece %10 çimento içeren örneklerde SBM 7 günde 927 kPa, 150 günde ise 2321 kPa'dır. NS ve %10 çimento içeren örneklerde en yüksek SBM, %0.7NS içeren örneklerde görülmüştür (Şekil 4.11). Sadece %10 çimento içeren örneklerle kıyaslandığında %0.7NS içeren örneklerde 1.2-1.9 kat SBM artışı vardır. Tüm örneklerde 7 günden 28 güne gelindiğinde mukavemette belirgin bir gelişme görülse de %5 çimento içeren örneklerdeki gibi 90 ve 150 günde mukavemet - kür süresi ilişkisinde eğrilerin tam bir doyumluğa ulaştığından söz etmek mümkün değildir. Ancak sondan bir önceki kür süresi olan 90 günde en belirgin kazanımlar gözlemlenirken, mukavemetin bir süre daha artma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Bu da ortamda NS ile birlikte daha fazla çimentonun bulunmasının hidrasyon reaksiyonlarını devam ettirdiği şeklinde yorumlanmıştır.

Yüksek aktiviteli NS partikülleri, çimento matrisinde homojen olarak dağıldıklarında çimento hidrasyon hızını artırırlar. Bu da mukavemeti artırır. Serbest basınç mukavemetinin NS ilavesi ile artan yönde gelişmesi aşağıdaki mekanizmalara atfedilir (Ghasabkolaei vd. 2016):

1. *Puzolanik reaksiyon ve kontrollü kristalizasyon:* Çimentonun su ile reaksiyonu sırasında büyük miktarda kalsiyum hidroksit kristalleri üretilir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalleri mukavemet özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Yüksek spesifik yüzey alanına ve yüklü reaktif yüzeylere sahip olan NS, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyonu sonucunda kalsiyum-silikathidrat (C-S-H) viskoz jelini üretir. Viskoz bir C-S-H jeli

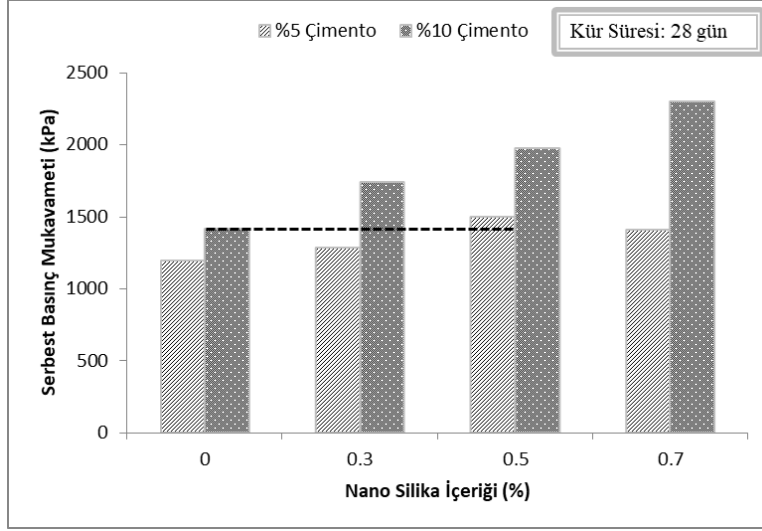
üretirken, puzolanik reaksiyon da daha fazla Ca(OH)_2 kristali oluşumunu engellemektedir (Beigi vd. 2013; Ghasabkolaei vd. 2016).

2. *Çekirdek etkisi:* Yüksek spesifik yüzey alanı ve yüzey enerjisinin bir sonucu olarak, nano partiküller tıpkı bir atom çekirdeği gibi davranır ve hidratlanmış çimento ile birlikte güçlü bir kohezyona neden olur, bu etki az miktardaki nano partikülün homojen olarak çimento matrisinde dağılması ile gerçekleşir. Nano partiküllerin yüksek reaktivitesinin yanı sıra bu etki sayesinde hidratasyon eğilimi bir süre daha devam etmekte ve mekanik mukavemet artmaktadır (Li vd. 2004; Bahadori vd. 2012; Ghasabkolaei vd. 2016).
3. *Mikro ve nano dolgu etkisi:* C–S–H jeli, hidratasyon ürünlerinin %70'ini oluşturur. C–S–H jelinin ortalama parçacık çapı yaklaşık 10 nm'dir (Ye, 2001). Doldurma yeteneği olan nano partiküller, C–S–H jelindeki boşlukları doldurur ve daha yoğun adhezif bir çimento macunu oluşturur (Li vd. 2006; Ghasabkolaei vd. 2016).



Şekil 4.11. NS ve %10 çimento içeren kil örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler

Bu bölümde aynı NS içeriğinde ancak farklı çimento içeriğinin sahip 28 günlük kil zeminlerin de bir incelemesi sunulmaktadır (Şekil 4.12). Burada dikkat çeken nokta, sadece %10 çimento içeren örneğin mukavemeti ile %0.5 NS ve %5 çimento içeren örneğin mukavemetinin bir birine oldukça yakın olmasıdır. Şekil 4.12'de kesikli yatay siyah çizgi karşılaştırma yapılması için eklenmiştir. Bu durum %10 çimento katkısı yerine %0.5 NS katkısı ile %5 çimento katkısı kullanılarak çimentodan %50 tasarruf edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.12. NS içeriğine göre %5 ve %10 çimento içeren 28 günlük örneklerin SBM'lerinin karşılaştırılması

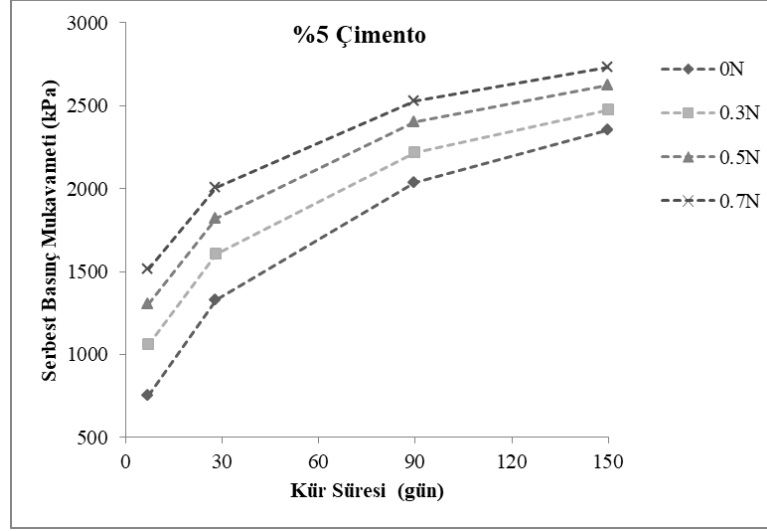
4.3.2 Kum zeminler

4.3.2.1 Nano silika ve kum zemin içeren örnekler

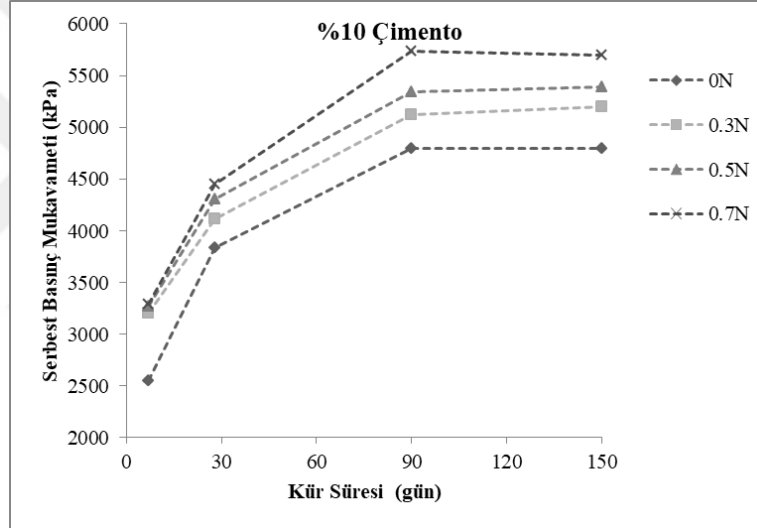
Granüler zeminlerin tek başına serbest basınç mukavemetini ölçmek mümkün olmadığından, kum örneklerine optimum su içeriklerinde %0.3 ve %0.7 NS ilave edilerek sırası ile 18 kPa ve 19 kPa mukavemetler ölçülmüştür. Düşük mukavemet beklenen bir durum olsa da burada gerek suyun yarattığı zahiri kohezyonun gerekse NS'nin zemin matrisindeki boşlukları doldurucu etkisi dikkate alındığında NS kumun kendini tutabilmesine katkıda bulunmuştur.

4.3.2.2 Nano silika, çimento ve kum zemin içeren örnekler

NS ve %5 çimento içeren kum örneklerde SBM'nin kür süresi ile artış gösterdiği görülmektedir. Mukavemetin artış hızı 7-28gün>28-90gün>90-150 gün şeklinde azalarak ilerlemektedir. %0.7 NS içeren örneklerde 150 günde 2735 kPa mukavemete ulaşılmıştır (Şekil 4.13). %10 çimento içeren örneklerde ise mukavemet kazanımı 90 günden sonra sabitlenmiştir. Elde edilen en yüksek mukavemet yine %0.7 NS içeren grupta gerçekleşmiştir. 90 gün sonunda ölçülen yaklaşık mukavemet 5700 kPa'dır. Bu grupta dikkati çeken bir noktada örneklerin erken dönem olarak ifade edilebilecek 7 günlük mukavemetlerinin farklı NS içeriklerinde birbirine oldukça yakın olmasıdır. NS etkisi gözlemleyebilmek için uzun dönemlerin takibinin gerekli olduğunu göstermektedir (Şekil 4.14).



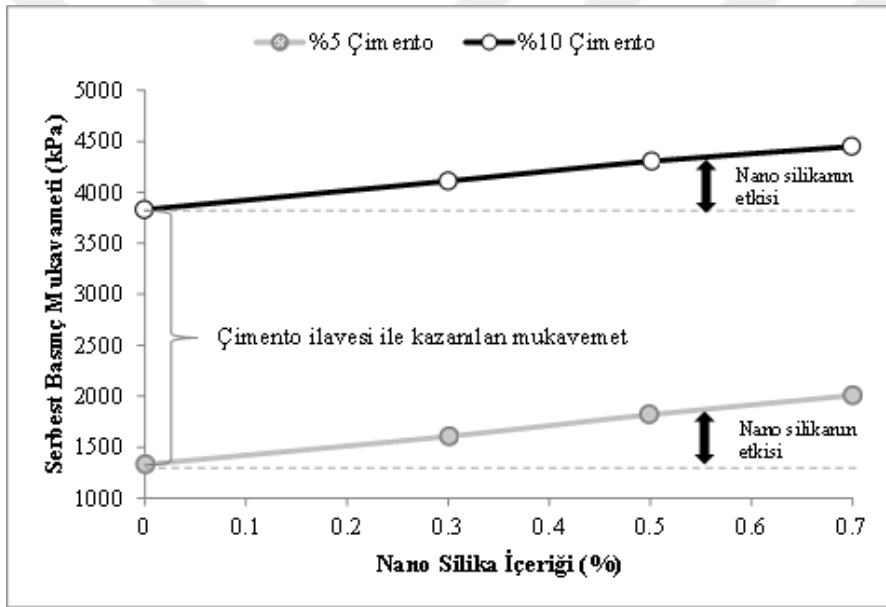
Şekil 4.13. NS ve %5 çimento içeren kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler



Şekil 4.14. NS ve %10 çimento içeren kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler

Choobbasti ve Kutanaei (2017) bu durumu yaptıkları SEM analizleri ile açıklamaktadır. NS içermeyen zeminde 7 günde, zemin matrisindeki bir miktar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalinin varlığı, C-S-H jeli ile birleşir ve bu durum hidrasyon reaksiyonunun tamamlanmadığını gösterir. Ayrıca $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin konsantrasyonu, C-S-H jelinden daha fazladır. 28 günlük kürden sonra, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iğne şekilli kristalleri numunenin geniş bir kısmını kaplamaktadır. NS'sız bu durumda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iğne şekilli kristallerinin varlığı ve çimento-kum karışımının gevşek yapısı serbest basınç mukavemetinin NS'sız durumda neden daha düşük olduğunu açıklamaktadır. 90 günlük kürden sonra çimentolu kum numunesinde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iğne şekilli kristalleri, mikro çatlaklar ve C-S-H jeli görülmektedir. Ayrıca, 7 günde gözlemlenen C-S-H'nin boyutu

ve miktarı, 28 gün ve 90 günlerde giderek azalmıştır. Bu, 7 günlük sonuçlarla karşılaştırıldığında 90 günlük çimentolu kum numunesi için serbest basınç mukavemetinin neden daha yüksek olduğunu açıklamaktadır. NS katkılı durum incelendiğinde ise, 7 günlük kürden sonra NS ve çimento ile işlem görmüş kumun mikro yapısında az sayıda Ca(OH)_2 kristali olduğu ve sıkı bir yapının varlığı görülmüştür. Numunenin sıkı mikro yapısı, NS parçacıklarının yüksek aktivitesi sayesinde daha fazla C-S-H jeli üretmek için hidrasyon reaksiyonunun artması nedeniyledir ve daha yüksek serbest basınç mukavemetine ulaşılmasını sağlar. 28 günden 90 güne gelindiğinde NS içeren çimentolu kumun boşlukları ve hidratlanmamış kristaller giderek azalmaktadır ve oldukça bütünleşik ve sıkı bir mikro yapıyı göstermektedir. 90 günde artık geniş çaplı C-S-H jel konsantrasyonu ile çok sıkı bir yapı karşımıza çıkmaktadır.



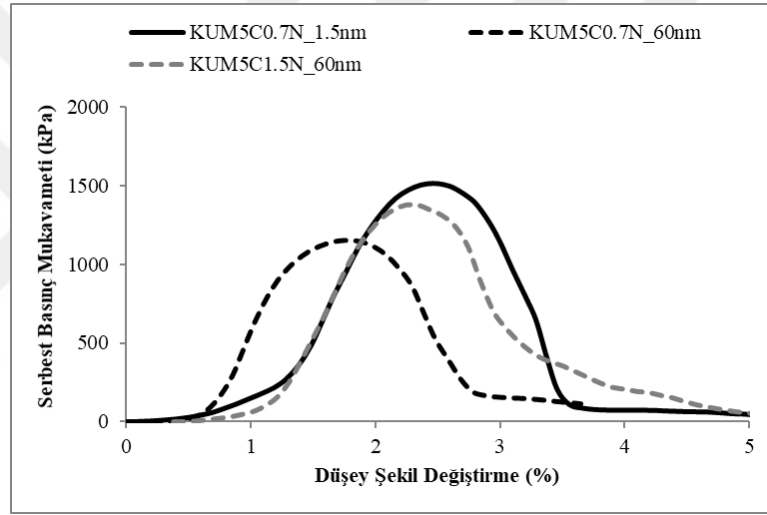
Şekil 4.15. NS ve çimento içeren kum örneklerin NS içeriğine göre SBM'deki değişimleri

Kum zeminlerde gözlenen bir bulgu da %5 çimento ilavesi ile %10 çimento ilavesi ile hazırlanan NS içeren zeminlerin NS içeriğine göre mukavemetlerinin paralel bir şekilde artmasıdır. Diğer bir deyişle, iki örnek grubu arasındaki mevcut %5'lik çimento içeriği esas mukavemeti oluşturmakta, buna katkı olarak eş miktarda mukavemet de NS ile sağlanmaktadır. Şekil 4.15 incelendiğinde %5 ve %10 çimento içeren grupların NS ilavesinin yarattığı ortalama mukavemetler eşittir. %0.3 NS için kaydedilen ek mukavemet 278 kPa, %0.5 NS için 482 kPa ve %0.7 NS için 648 kPa'dır. Sadece çimento içeren örnekler ile %0.7 NS ve çimento içeren örneklerin mukavemetleri karşılaştırıldığında zeminin iyileştirme oranları %5 çimento içeriğinde yaklaşık 1.5 kat, %10 çimento içeriğinde yaklaşık 1.16 kat kadardır. Kısacası %5

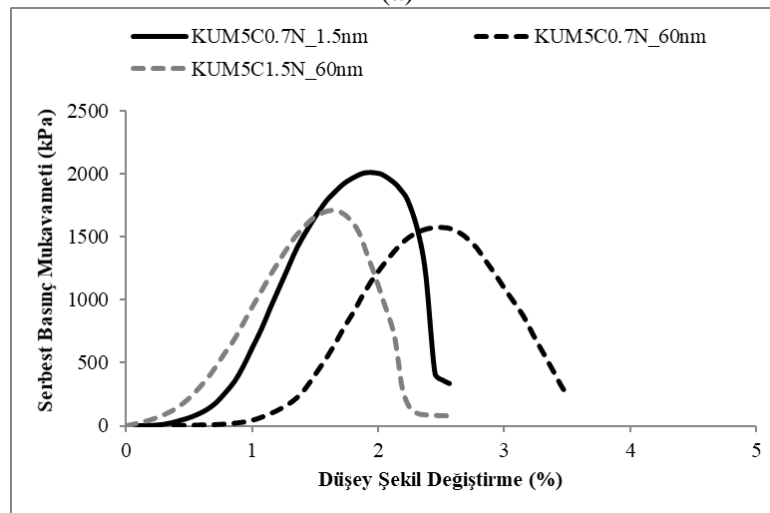
çimento ilavesi daha düşük SBM gösterse de iyileştirme oranı açısından üstün gelmektedir.

4.3.2.3 Nano silika boyutunun ve %1.5 oranında kullanımının etkileri

%5 çimento içeren kum örneklerde 15 nm NS'ya ilaveten bir de 60 nm NS kullanılarak boyut etkisi araştırılmıştır. Bu kısımda 7 ve 28 günlük örnekler hazırlanmıştır. Bu şekilde 15 nm NS'nın 60 nm boyutundaki NS'dan daha fazla mukavemet elde edilmesini sağladığı gözlenmiştir. 7 günde 15 nm NS katkılı örneklerde 1514 kPa, 60 nm NS katkılı örneklerde 1150 kPa SBM ölçülmüştür. 28 günde 15 nm NS katkılı örneklerde 2008 kPa, 60 nm NS katkılı örneklerde 1574 kPa SBM ölçülmüştür (Şekil 4.16).



(a)



(b)

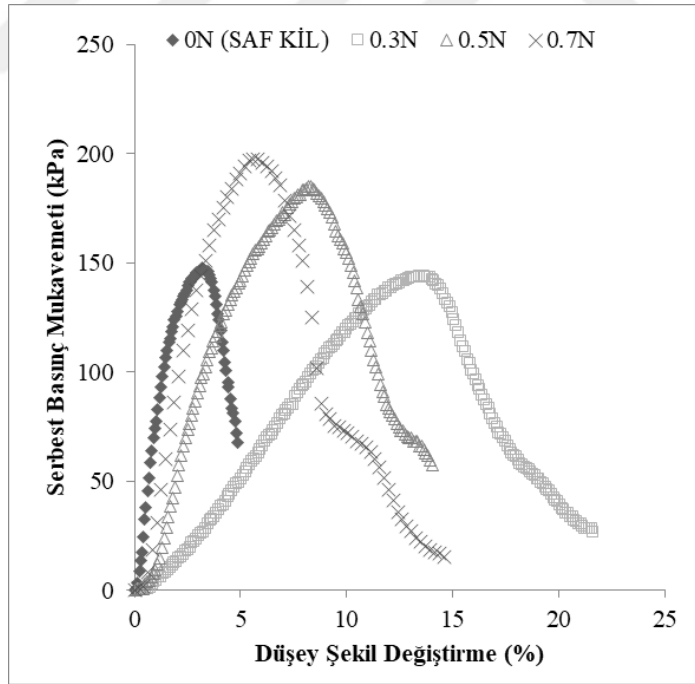
Şekil 4.16. Farklı boyutlarda NS içeren örneklerin mukavemetleri (a) 7 gün ve (b) 28 gün

60 nm NS'nin miktarını arttırarak bir kazanım elde edilip edilemeyeceği de araştırılmıştır. Bu durumda 60 nm NS %1.5 oranında kullanılarak örnekler hazırlanmıştır. 7 günde 1380kPa ve 28 günde 1714kPa ölçülmüş olup, yine de 15 nm NS'nin %0.7 oranında kullanılması ile elde edilen mukavemetler aşılamamıştır. Dolayısı ile bu tez çalışması için 15 nm NS etkin boyutları temsil etmektedir.

4.3.3 Killi kum zeminler

4.3.3.1 Nano silika ve killi kum zemin içeren örnekler

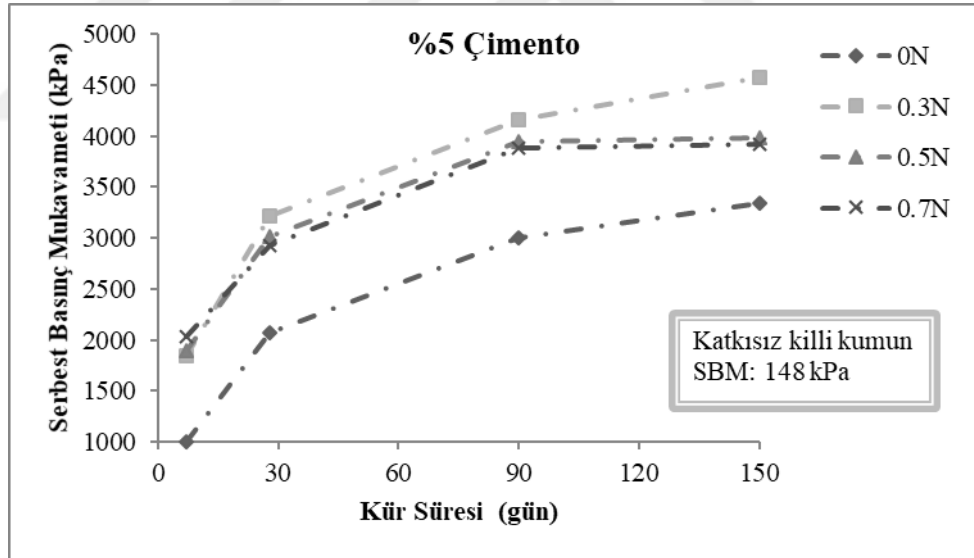
Killi kum zeminin serbest basınç mukavemeti (SBM) 148 kPa olarak bulunmuştur. %0.7 NS içeriğinde 198 kPa SBM ölçülmüştür. Şekil 4.17'den görüleceği üzere doğal zeminde pik SBM'nin ölçüldüğü düşey şekil değiştirme miktarı %3.2 iken %0.7 NS katkılı kil zeminde %5.6'dır. %0.3NS ilavesi doğal zeminin mukavemetini arttırmamış ancak çok daha sünek davranmasını sağlamıştır. Pik mukavemetler NS ilavesi ile artarken bu değerlerin ölçüldüğü düşey şekil değiştirmeler %0.3 NS'den %0.7 NS içeriğine kadar azalmıştır. Sonuçta %0.7 NS ilavesi ile doğal zeminden daha mukavim bir yapı ve aynı zamanda biraz daha sünek bir davranış gözlenmektedir.



Şekil 4.17. NS katkılı killi kum zeminlerin gerilme-düşey şekil değiştirme eğrileri

4.3.3.2 Nano silika, çimento ve killi kum zemin içeren örnekler

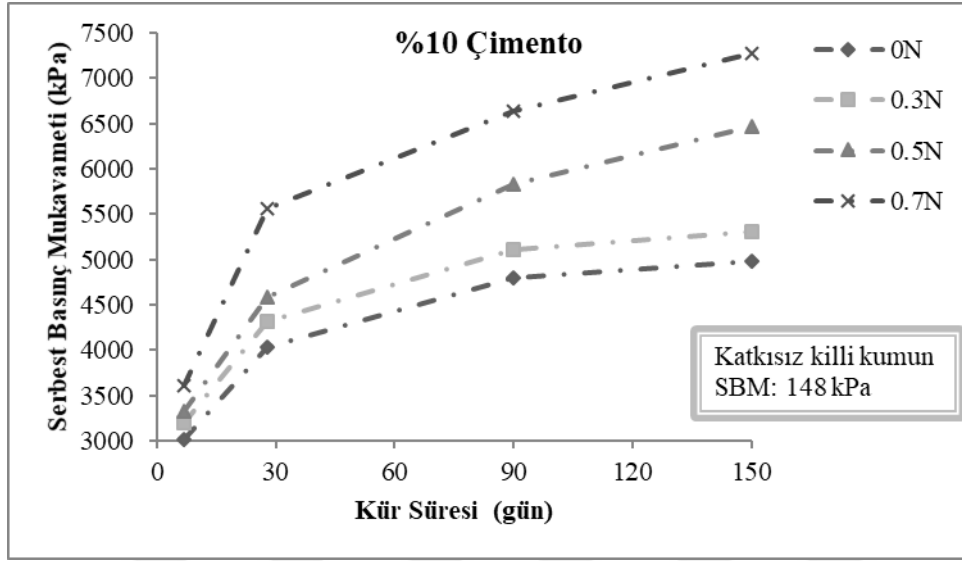
%5 Çimento içeren örneklerin kür süresi ile SBM gelişimleri iki grupta toplanabilir: sadece çimento katkılı zemin ile %0.3NS içeren örnekler, %0.5 NS ile %0.7 NS içeren örnekler (Şekil 4.18). Killi kum zeminlerde %0.5 NS veya %0.7 NS ilavesi farklı kür süreleri boyunca birbirine yakın mukavemet değerleri göstermekle beraber mukavemeti azaltıcı bir etken olmaktadır. Killi kum zeminlerde, kum daneleri arasındaki boşlukların belirli bir kısmı kil daneler ile zaten dolu durumdadır ve zemin ortamında kalan boşluklar da az miktardaki NS ile doldurulabilmektedir. Ortamdaki az miktardaki çimento da bu ince ve kaba daneler arasında bağlayıcılığı kuvvetlendiren bir etmen olmaktadır. Tez çalışmasının önceki bölümlerinde %5 çimento içeriğinde kil zeminde %0.5 NS kum zeminde ise %0.7 NS'nin etkin oran olarak bulunması yukarıdaki açıklamayı desteklemektedir. Killi kum zeminde 150 günde ölçülen mukavemet 4572 kPa'dır. İlk 7 günde NS etkisi sadece çimento katkılı zeminle karşılaştırma yapılarak görülebilir, NS içeren örneklerin ortalama 7 gün mukavemeti 1924 kPa, %5 çimento katkılı zeminin 7 gün mukavemeti 1007 kPa, dolayısıyla NS'nin varlığı yaklaşık ortalama 900 kPa artış sağlamaktadır.



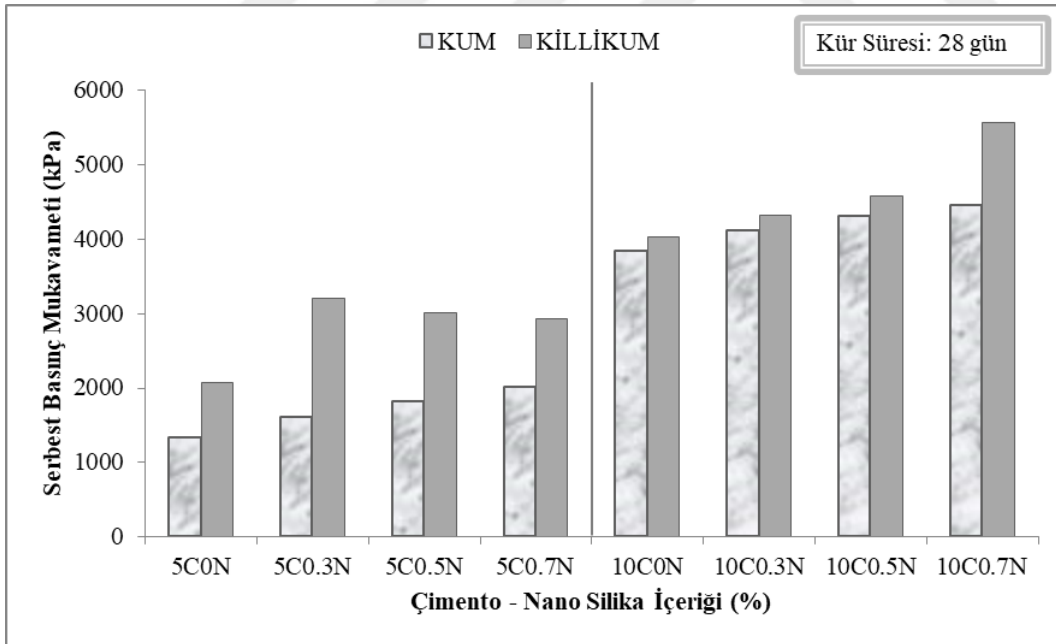
Şekil 4.18. NS ve %5 çimento içeren killi kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler

Başlangıçta, %10 çimento katkılı zeminlerde mukavemeti belirleyen aslen çimentonun kendisidir. 7 günlük sadece çimento içeren örneğin SBM'nin 3014 kPa, NS içeren örneklerin SBM ortalamasının ise 3375 kPa olması NS varlığının ilk 7 günde 361 kPa bir fark yarattığını göstermektedir (Şekil 4.19). Kür süresi uzadıkça ve kullanılan NS miktarı arttıkça zemin matrisi içerisinde NS'nin çimento ile birlikte bağlayıcılığı güçlendirdiği görülmektedir. Kil ve kum zeminlerdeki bulgularla paralel olarak killi

kum zeminlerde de en etkin NS oranı %0.7'dir. 150 günde 7274 kPa'ya ulaşılmıştır. Bu değer tüm örnek grupları içinde bulunan en yüksek mukavemet değeridir.



Şekil 4.19. NS ve %10 çimento içeren killi kum örneklerin kür süresine göre SBM'deki değişimler



Şekil 4.20. NS ve çimento içeren örneklerin 28 günlük kür süresine göre zemin cinsine bağlı olarak SBM'lerindeki değişimler (5C: %5 çimento; 10C: %10 çimento)

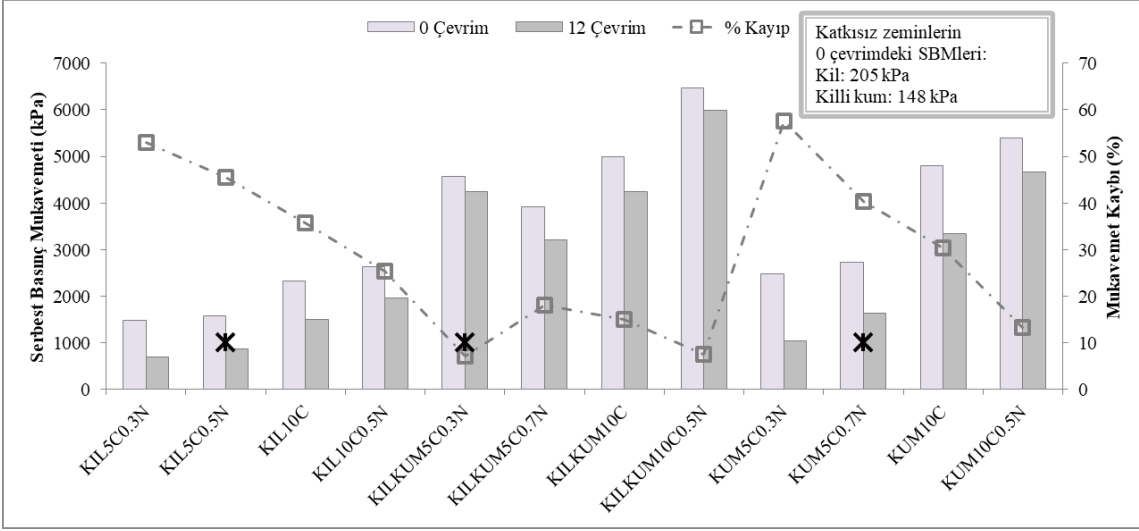
Son olarak, bu bölümde 28 günlük kum zeminler ile killi kum zeminlerin karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 4.20). %5 çimento içeren örneklerde killi kum

zeminlerin daha az NS ilavesi ile daha yüksek mukavemetlere ulaştığı görülmektedir. En etkin NS oranı killi kumda %0.3 olup kum zeminlerin aynı mukavemet seviyesine ulaşabilmesi için %2 NS ilavesi yapılması gerektiği hesaplanmıştır. Bu durum proje maliyetleri açısından killi kum zeminlerde yapılacak uygulamaların daha ekonomik olacağını göstermektedir. %10 çimento içeren örneklerde ise %0.5 NS ilavesine kadar zemin cinsinin önemli bir fark oluşturmadığı görülmektedir. %0.7 NS içeriğinde kum örneklerine göre mukavemet 1.25 kat artmaktadır.

4.3.4 Donma çözülme etkileri

Zeminlerde meydana gelen donma çözülme çevrimlerinin yıkıcı etkileri 150 günlük örnekler üzerinde incelenmiştir. Uygulanan donma çözülme çevrim sayısı 12 olarak belirlenmiştir. 12 çevrim uygulanması ASTM D560 (2016) tarafından zemin çimento karışımları için önerilen maksimum çevrim sayısını göstermektedir. Burada amaç kür süresini uzun tutarak örneklerin mukavemet gelişimlerinin büyük kısmını tamamlamış olmalarını sağlayarak donma çözülme etkisine maruz bırakmaktır. Bu durumun incelenmesi önemlidir çünkü Leroueil vd. (1991) ve Eigenbrod (1996) soğuk iklimlerde yer alan iyileştirilmiş zeminlerde mukavemet kayıplarının ilk yıl içinde meydana geldiğini belirtmektedirler. Ayrıca, Kalhor vd. (2019) CL türü bir zemin üzerinde yaptıkları incelemede NS kullanıldığı takdirde donma çözülme etkilerinin incelenebilmesi için 42 günlük bir kür süresinin dikkate alınmasını 28 günlük kür süresinin NS içermeyen zeminler için tercih edilebileceğini belirtmişlerdir. Donma çözülmeye uğrayan kil zeminlerde mukavemetteki en büyük kayıplar 1-6. çevrimlerde meydana gelmektedir. 6. ve 7. çevrimlerden sonra mukavemetin bir denge konumuna ulaştığı belirtilmektedir (Wang vd. 2007; Roustaie vd. 2015; Roustaie vd. 2016; Kalhor vd. 2019).

Tez çalışmasında seçilen bazı örnekler üzerinde donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Üç zemin türünden %5 ve %10 çimento içeren 2'şer örnek grubu incelenmiştir. Bununla beraber seçilen örnek gruplarının içinde %5 çimentolu örnek gruplarının temsil ettiği mukavemet açısından en etkin NS miktarını içeren örneklerin mutlaka olması sağlanmıştır. En etkin NS içeriğine sahip olan örnekler Şekil 4.21'de "*" işareti ile belirtilmiştir. %10 çimento içeren gruplarda ise sadece çimento ve çimento-%0.5 NS içerendeki örneklerin bir karşılaştırması verilmiştir. Şekil 4.21'de 0 ve 12 çevrim sonrası ölçülen SBM'ler ile birlikte ikincil düşey ekseninde bu örneklerin hesaplanan mukavemet kayıpları sunulmuştur ve kesikli çizgi ile grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu hesaplamada 0 çevrimdeki örneğin SBM %100 kabul edilerek bu değerden %'ce hesaplanan azalma miktarı "mukavemet kaybı" olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 4.21. Seçili örnek gruplarında 12 çevrim donma çözülme sonucu gözlenen SBM değişimleri (C: çimento)

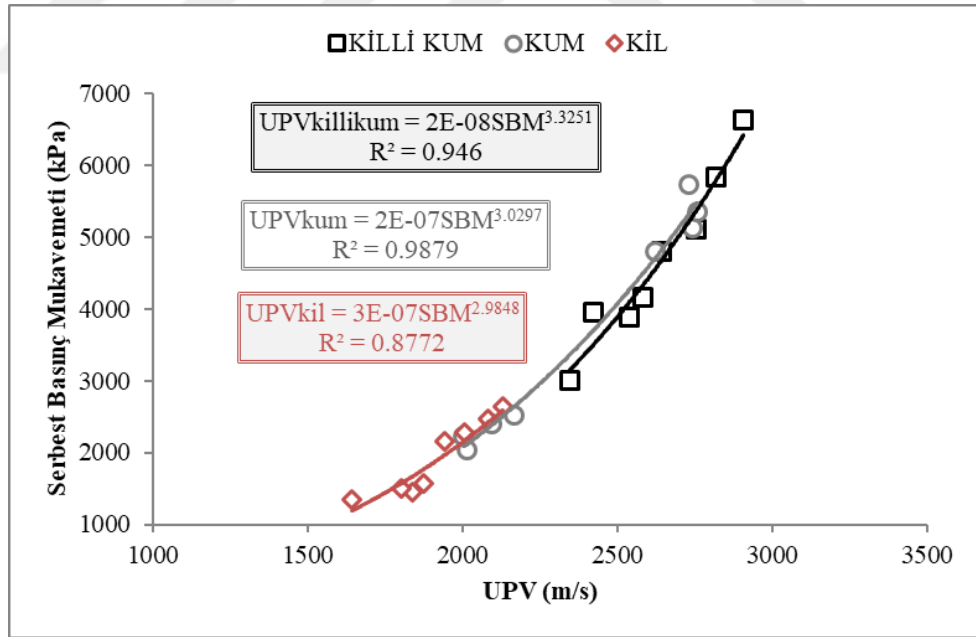
%5 çimento içeren örneklerde, en etkin NS içeriğine sahip örneklerde mukavemet kayıpları diğer örneğe göre hep daha az mukavemet kaybına uğramıştır. Bu da etkin NS içeriğinin zeminin donma çözülme davranışı üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Eğer zemin türüne uygun olarak etkin oranda NS kullanılırsa, donma çözülme sonucu meydana gelecek mukavemet kaybı da azalacaktır. Sırası ile etkin NS içeriğinde mukavemet kayıpları kil, killi kum ve kum zeminlerde %8, %11 ve %18 oranında önlenmektedir. İncelenen örnek grupları içerisinde en yüksek mukavemet kayıpları KİL5C0.3N (%53) ve KUM5C0.3N (%58)'de gözlenmiştir. %10 çimento içeren örneklerde %0.5 NS içeriğinde mukavemet kayıpları kil, killi kum ve kum zeminlerde %10, %7 ve %17 oranında önlenmektedir. KİL KUM10C0.5N örneği genel olarak bu kategoride %8'lik mukavemet kaybı ile en mukavim örnek olmuştur.

4.3.5 Ultrasonik darbe hızı ölçümlerinin (UPV) serbest basınç mukavemeti ile ilişkisi

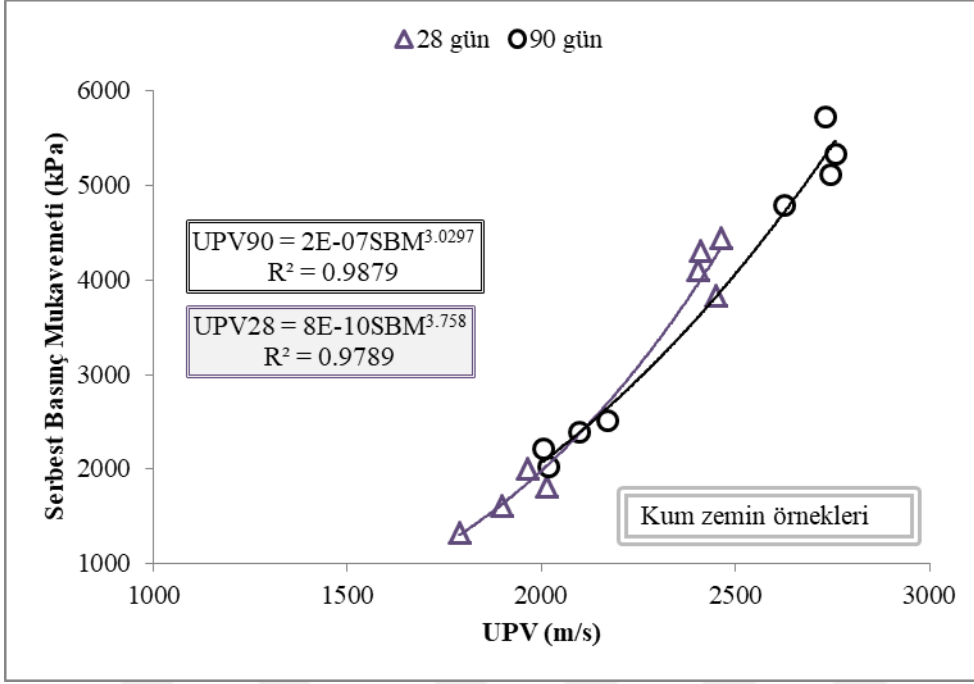
Zemin türüne bağlı olarak UPV-SBM ilişkilerini belirlemek üzere 90 günlük örneklerin SBM deneyleri öncesinde ultrasonik darbe hızı ölçümleri alınmıştır (Şekil 4.22). Kür süresi etkisini incelemek için de kum örneklerin 28 gün ve 90 gündeki ultrasonik darbe hızları da karşılaştırılmıştır (Şekil 4.23). Yeterli veri miktarını sağlayabilmek için çimento veya NS içeriğine göre bir ayırım yapılmamıştır. Zira SBM yüksek olan örneğin UPV'si de diğer hızlara göre yüksek, SBM düşük olan örneğin UPV'si de diğer hızlara göre düşük ölçülmüştür. Daha rijit yapıdaki örneklerde P-dalgasının geçiş süresi kısalmıştır. Ultrasonik darbe hızı, çimento yüzdesi ile artmıştır.

Kür süresinin uzaması ile de kum daneleri ile çimento arasında reaksiyonlar sonucu rijitlik artmıştır ve UPV değerleri yükselmiştir.

Genel olarak, zeminde çimento yüzdesinin artması, daha fazla ısı oluşumuna neden olarak hidrasyon işlemlerini hızlandırır. Çimento parçacıkları, çimento hidrasyonunun sonucunda sert bir zemin matrisi oluşturur çünkü çimento birincil bağlayıcı ajandır. Zemindeki boşlukların azalması daha fazla sayıda daneler arası temasın varlığını sağlamaktadır (Chang ve Woods, 1992). Bu nedenle, daha yüksek oranda çimento içeren örnekler, daha yüksek ultrasonik darbe hızına ve daha yüksek serbest basınç mukavemetine sahiptir. Çimentonun daha yoğun bir yapıya yol açmasıyla zemin örnekleri içinden geçebilecek uygun bir dalga hareket yolu sağlanmış olmaktadır. NS'nin varlığında çimento kısmının yoğunluğu NS ve zemin kısmına göre daha fazladır. Örneğin çimento kısmı ultrasonik darbe hızı daha az iletir; dolayısıyla küçülen boşluklar ve mikro çatlaklar daha yüksek hıza neden olur. Kür süresinin artmasıyla birlikte serbest basınç mukavemetinin ve ultrasonik darbe hızının arttığı da görülebilir. Bunun nedeni, numunenin çimento kısmındaki mikro çatlakların ortadan kalkması ve numuneler yaşlandıkça hidrasyon gelişmesi olarak yorumlanabilir (Kutanaei ve Choobbasti, 2017).



Şekil 4.22. Killi kum, kum ve kil zeminlerin UPV-SBM ilişkisi



Şekil 4.23. Kum zeminlerin kür süresine göre UPV-SBM ilişkisi

90 günlük örnekler incelendiğinde UPV hızları kil, kum ve killi kum olarak artmaktadır; bu bulgu zeminlerin SBM değerleri ile de uyumludur. Ölçülen hız aralıkları kil zeminlerde 1600-2100m/s, kum zeminlerde 2000-2700m/s, killi kum zeminlerde 2300-2900m/s şeklindedir. Hız ile SBM arasında üssel ($UPV = a \cdot SBM^b$) bir ilişki olduğu görülmektedir ve en küçük regresyon katsayısı 0.87'den büyük bulunmuştur. Bu da anlamlı bir ilişkinin varlığını göstermektedir. Kum zeminlerde 28 gün ve 90 gün örneklerinin kıyaslanması ile UPV'nin kür süresi arttıkça ötelenildiği görülmektedir. Bu ötelenmenin SBM yüksek olan zemin örneklerde daha büyük olduğu görülmektedir.

4.4 Kesme Kutusu Deneylerine Ait Sonuçlar

Öncelikle doğal zeminlerin kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zeminlerin içsel sürtünme açısını etkileyen faktörler arasında danelerin dizilimi, dane büyüklüğü ve danelerin köşeliliği yer alır. Kohezyon ise zemin daneleri arasındaki çimentolanma, kimyasal bağlar, elektrostatik çekim nedeniyle oluşmaktadır. İçsel sürtünme açısı ayrıca, zeminin porozitesi arttıkça azalmaktadır. Genel olarak kum zeminlerin porozitesinin kil zeminlerden düşük olması sonucunda içsel sürtünme açısı değerleri de daha büyük olmaktadır. NS içermeyen kum, killi kum ve kil zeminlerin efektif kohezyon (c') değerleri ve efektif içsel sürtünme açılarına (ϕ') sırasıyla bakıldığında efektif kohezyon değerleri artmış, efektif içsel sürtünme açıları azalmıştır.

Kil içeriğinin her iki kesme mukavemeti parametresi üzerindeki etkisi çok önemlidir. Zeminlerde kil oranının artmasıyla birlikte zeminin su tutma kapasitesinin artmasına bağlı olarak efektif kohezyon artmıştır (Mousavi, 2016). Kil miktarı arttıkça kilin daneler arası çekim kuvveti artmakta ve buna bağlı olarak efektif içsel sürtünme açısı azalmaktadır (Kim vd., 2018).

Tablo 4.1. Kesme Kutusu Deneyleri İle Ölçülen Kayma Mukavemeti Parametreleri

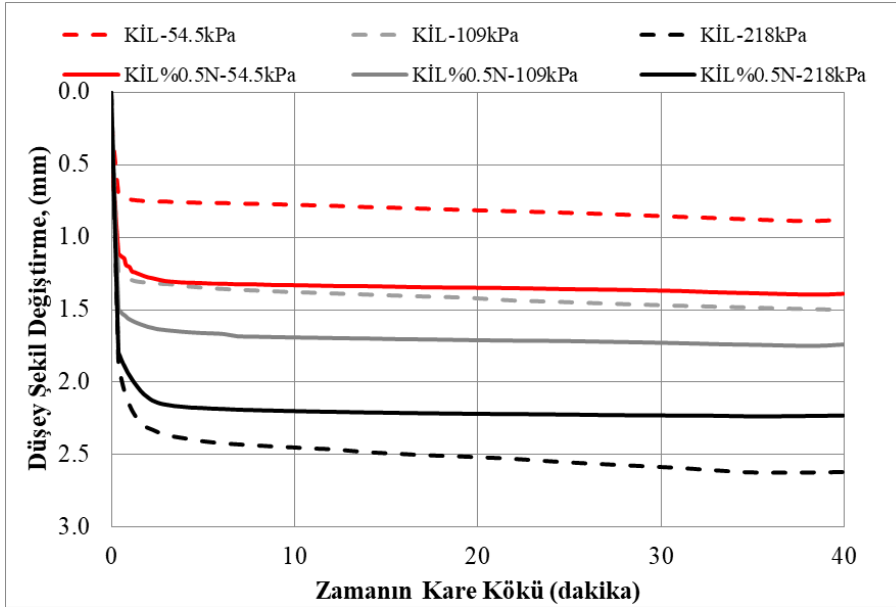
Örnek Adı	Normal Gerilme (kPa)	Kayma Gerilmesi (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
KİL	54.5	32.8	17.0	19.2
	109	59.9		
	218	91.5		
KİL+%0.5NS	54.5	36.05	18.0	22.3
	109	66.82		
	218	103.2		
KİLLİ KUM	54.5	44	15.4	29.3
	109	79.3		
	218	136.6		
KİLLİ KUM+%0.5NS	54.5	49.5	24.0	28.3
	109	88.3		
	218	139.4		
KUM	54.5	45	11.8	30.9
	109	76.1		
	218	142.6		
KUM+%0.5NS	54.5	42.8	8.0	33.0
	109	80.7		
	218	151.4		

Her üç zemin türüne de %0.5 NS ilave edilerek zeminlerin kayma parametreleri incelenmiştir (Tablo 4.1). %0.5 NS ilavesi her üç zemin türünde kayma mukavemetine katkıda bulunmuştur. Bu sonuca göre NS parçacıklarının zemin içinde düzgün bir şekilde dağıldığı ve zemin partikülleri arasındaki gözenekleri etkin bir şekilde doldurduğu söylenebilir (Cui vd., 2018). Kohezyon miktarındaki en fazla artış %55 ile killi kum zeminlerde meydana gelmiştir. Bunun sebebi NS ile killi kum zemin arasında daha fazla viskoz jel oluşumu meydana gelmesi ile açıklanabilir (Cui vd., 2018). Ayrıca zemin daneleri yüzeylerine yapışan viskoz jel oluşumu, danelerin birbirine tutunmasına bağlı olan mukavemeti ve zemin daneleri ile NS arasındaki kenetlenme kuvvetlerini arttırmıştır. Sonuçta killi kum zeminlerin efektif kohezyonu artmıştır. Ancak, zeminin efektif içsel sürtünme açısında bir miktar azalma olduğu gözlenmiştir. Bu bölümde, sadece saf zemin ile %0.5 NS içeren zeminlerin bir karşılaştırmasını sunmak

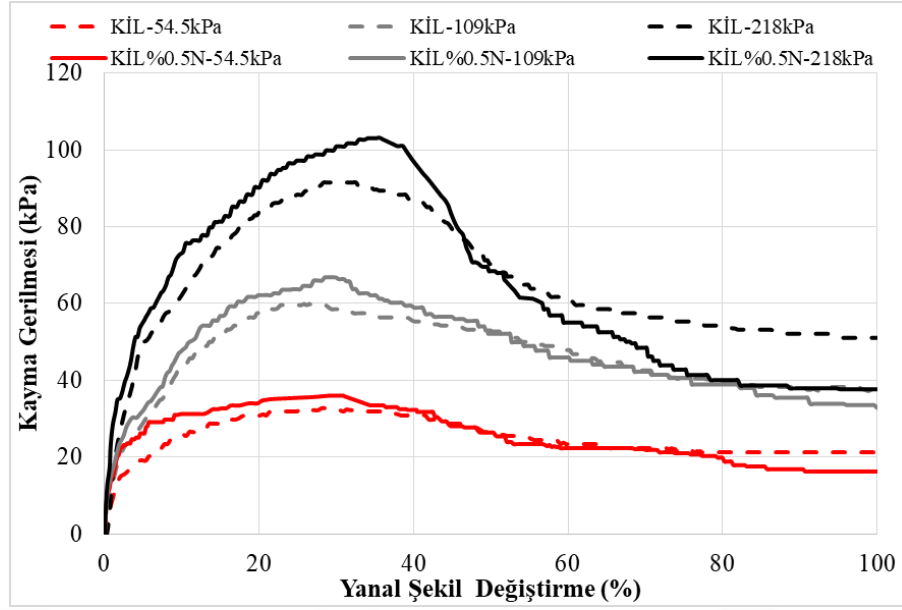
amaçlanmıştır; ancak konunun derinlemesine incelenmesi için efektif içsel sürtünme açısındaki bu azalmaya sebebiyet veren faktörün bilinmesi gerekmektedir. Burada da muhtemel etmen bu zemin türü için gerekli olan optimum NS miktarının bilinmesidir. Killi kum zeminlerde efektif içsel sürtünme açısını arttıracak NS içeriğinin %0.5'ten fazla olduğu düşünülmektedir.

Saf kum zemin ile %0.5 NS katkılı kum zeminler karşılaştırıldığında efektif kohezyon değerinin azaldığı efektif içsel sürtünme açısının ise arttığı görülmektedir. Söz konusu kohezyon “görünür” kohezyon olup kum zeminlerde drenajsız yükleme şartlarından ötürü (kesme kutusu deneyinin doğasına bağlı olarak) gelişen boşluk suyu basıncının bir tepkisi olarak ortaya çıkmaktadır. Az miktardaki NS, kum danelerinin temas noktalarını güçlendirerek, efektif içsel sürtünme açısını yükseltmektedir. Eğer ortamda gereğinden fazla NS bulunursa bu durumda hem zeminin porozitesi azalır, hem de kum danelerinin kendileri NS ile kaplanır, bu durum efektif içsel sürtünme açısının azalması ile sonuçlanır.

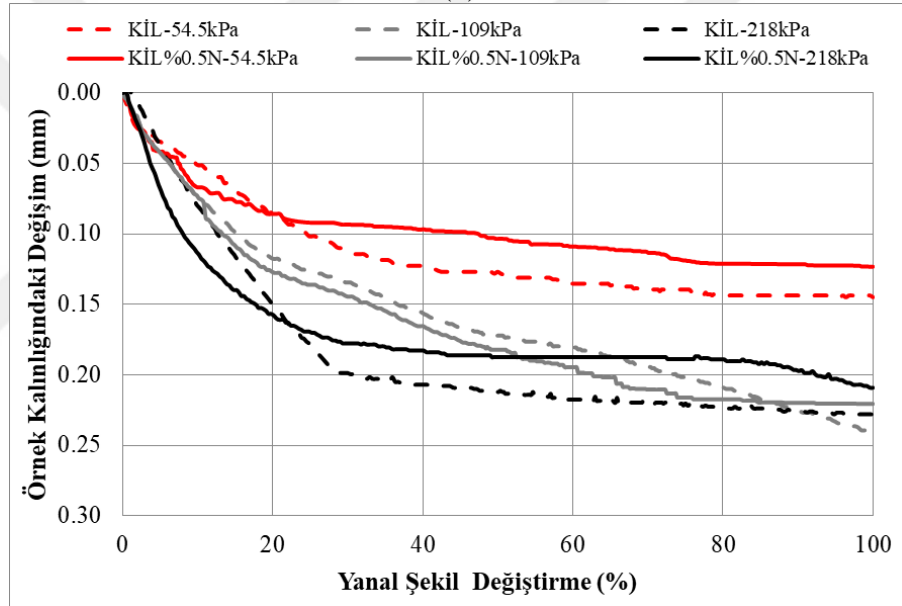
NS katkısı ile kil zeminin hem efektif kohezyonu hem de efektif içsel sürtünme açısı artmıştır. Sırasıyla artış miktarları %5 ve %16'dır. Sonuçlar, NS ilavesi ile kil zeminlerin efektif içsel sürtünme açısının artış oranının efektif kohezyondan daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu nedenle NS ile stabilize edilmiş kilin efektif içsel sürtünme açısı, zeminin mukavemetini arttırmada zeminin efektif kohezyonundan daha etkilidir (Changizi ve Haddad, 2015).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.24. Kesme kutusu deneylerinde (a) konsolidasyon aşaması ve (b) kayma gerilmesi – yanal şekil değişirme ve (c) örnek kalınlığındaki değişim - yanal şekil değişirme ilişkileri

Kesme kutusu deney sonuçlarına örnek olması için saf kil zemin ile %0.5NS katkıli kil zeminin 54.5 kPa, 109 kPa ve 218 kPa normal gerilemeler altında elde edilen konsolidasyon ve kesme uygulaması aşamalarına ait grafikler sunulmuştur (Şekil 4.24). Kil ve %0.5 NS katkıli kil zeminler incelendiğinde 3 farklı normal gerilme değerinde de NS katkısı ile zeminlerin kayma mukavemetlerinde artış gözlemlenmiştir (Şekil 4.24). NS katkıli zeminlerde pik kayma gerilmesine karşılık gelen yanal şekil değiştirmelerin katkısiz kil zeminin aldığı değerlere göre bir miktar (yaklaşık %5 kadar) ötelendiği görülmektedir. Katkıli zemin daha fazla yanal şekil değiştirmeye dayanabilecek bir seviyeye gelmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kil, killi kum ve kum zeminler üzerinde çimento ve NS etkisini araştırmak amacı ile bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar Atterberg limitleri deneyleri, kompaksiyon deneyleri, serbest basınç deneyleri, donma çözülme deneyleri, ultrasonik darbe hızı ölçümleri ve kesme kutusu deneyleridir. Bu çalışmalara dayanarak aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- Atterberg deneyleri sonuçlarına bakıldığında örneklere eklenen NS oranı ile %5 çimentolu kil zeminlerin LL'i artarken, %10 çimentolu kil örneklerin LL'i azalmıştır. PL değerleri LL'lerin değişimine paralel bir şekilde hareket etmiştir. NS içeriğinin artması %10 çimento katkılı killi kum örneklerinin PI'ni önemli ölçüde azaltmıştır. En düşük plastisite indisi %0.7 NS ile işlem görmüş %10 çimento katkılı numunelerde 4 olarak elde edilmiştir. Saf kil ve killi kum zeminlerde LL, NS ilavesi ile artmıştır. Kil zeminde %0.3, killi kum zeminde ise %0.5 NS ilavesinden sonra PL değerlerinin sabit bir hal aldığı gözlenmiştir.
- Kompaksiyon deney sonuçlarına bakıldığında kil ve killi kum zeminlerde saf zemine NS ilavesi optimum su içeriğini az miktarda arttırmıştır. Ancak eser miktarda NS kullanılması sebebiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda önemli bir değişim gözlenmemiştir. Kum zeminde ise NS ilavesi optimum su içeriğini bir miktar daha azaltmıştır. Yine maksimum kuru birim hacim ağırlıklarda önemli bir değişim görülmemektedir. Bir zemin örneğindeki çimento içeriğine karşılık gelen optimum NS içeriği zemin türünden bağımsızdır. %10 çimento katkısı ile oluşturulan örneklerin optimum NS içeriği %0.5 iken %5 çimento içeriği için optimum NS içeriği %0.3'tür. Kum zemin örneklerinde ise %5 çimento içeriğinde gerekli olan NS içeriği %0.5 , %10 çimento içeriğinde ise %0.7 olmaktadır. Kum zeminde NS içeriğine göre en büyük optimum su içeriklerinin de maksimum kuru birim hacim ağırlıklarla orantılı olduğu görülmektedir.
- Serbest basınç deneyleri sonuçlarına bakıldığında kil zeminlerde sadece %10 çimento içeren örneğin mukavemeti ile %0.5 NS ve %5 çimento içeren örneğin mukavemetinin bir birine oldukça yakın olmasıdır. Kum zeminlere bakıldığında sadece çimento içeren örnekler ile %0.7 NS ve çimento içeren örneklerin mukavemetleri karşılaştırıldığında zeminin iyileştirme oranları %5 çimento içeriğinde yaklaşık 1.5 kat, %10 çimento içeriğinde yaklaşık 1.16 kat kadardır. Kısacası %5 çimento ilavesi daha düşük SBM gösterse de iyileştirme oranı açısından üstün gelmektedir. Killi kum zeminlerde %10 çimento içeren örneklerde ise %0.5 NS ilavesine kadar zemin cinsinin önemli bir fark oluşturmadığı

görülmektedir. %0.7 NS içeriğinde kum örneklerine göre mukavemet 1.25 kat artmaktadır. Her üç zemin türünde de yapılan çalışmalar sonucu en yüksek serbest basınç mukavemeti değerlerinde %5 çimento içeriğinde kil zeminlerde %0.5 NS, killi kum zeminlerde %0.3 NS, kum zeminlerde %0.7 NS içeriğinde ulaşılmıştır. Bu durum kil daneleri ortamda ne kadar çok olursa boşlukların o kadar dolu olması ile açıklanabilir. %10 çimento içeriğinde her üç zemin türünde de en yüksek serbest basınç mukavemetine %0.7 NS içeriğinde ulaşılmıştır.

- Donma çözülme deneylerine bakıldığında %10 çimento içeren örneklerde %0.5 NS içeriğinde mukavemet kayıpları kil, killi kum ve kum zeminlerde %10, %7 ve %17 oranında önlenmektedir. %10 çimento ve %0.5 NS katkılı killi kum örneği genel olarak bu kategoride %8'lik mukavemet kaybı ile en mukavim örnek olmuştur.
- Ultrasonik darbe hızı ölçümleri sonucu 90 günlük örnekler incelendiğinde UPV hızları kil, kum ve killi kum olarak artmaktadır, bu bulgu zeminlerin SBM değerleri ile de uyumludur. Kum zeminlerde 28 gün ve 90 gün örneklerinin kıyaslanması ile UPV'nin kür süresi arttıkça ötelenmesi görülmektedir. Bu ötelenmenin SBM yüksek olan zemin örneklerde daha büyük olduğu görülmektedir.
- Kesme kutusu deney sonuçlarına göre kohezyon miktarındaki en fazla artış %55 ile killi kum zeminlerde meydana gelmiştir. NS katkısı ile kil zeminin hem efektif kohezyonu hem de efektif içsel sürtünme açısı artmıştır. Sırasıyla artış miktarları %5 ve %16'dır. %0.5 NS ilavesi her üç zemin türünde kayma mukavemetine katkıda bulunmuştur.

Nano silika katkısı zeminin incelenen mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Her zemin türüne özgü olarak optimum bir NS içeriği olduğu tespit edilmiştir. Güvenli ve ekonomik tasarımların yapılabilmesi için bu optimum değerlerin saptanması önem arz etmektedir. Nano silika katkısının zeminlerin geoteknik özelliklerini geliştirme yönünde kullanılabilecek, gelecek vaat eden bir katkı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aggarwal, P., Singh, R.P., Aggarwal, Y.**, 2015, Use of nano-silica in cement based materials, A review, *Cogent Engineering*, 2:(1), Article ID 1078018 <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2015.1078018>
- Alsharef, J.M.A., Taha, M.R., Firoozi, A.A., Govindasamy, P.**, 2016, Potential of using nanocarbons to stabilize weak soils, *Applied and Environmental Soil Science*, Article ID 5060531. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5060531>
- Arya, A., Jain, A.**, 2017, A review of geotechnical characteristics of nano additives treated soils, *International Conference on Recent Development in Engineering science, Humanities and Management*, 121-126pp.
- ASTM C597**, 2016, Standard test method for pulse velocity through concrete, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166**, 2016, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487**, 2017, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080**, 2011, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318**, 2017, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D560**, 2016, Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6913**, 2017, Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698**, 2012, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM E2456 - 06**, 2020, Standard terminology relating to nanotechnology, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Bagherpour, I., Choobbasti, A.J.**, 2003, Stabilization of fine-grained soils by adding micro silica and lime or micro silica and cement, *Electron J Geotech Eng*, 8:1–10pp.

- Bahadori, H., Hosseini, P.,** 2012, Reduction of cement consumption by the aid of silica nanoparticles (investigation on concrete properties), *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(3):416-425pp.
- Bahmani, S.H., Farzadnia, N., Asadi, A., Huat B.B.K.,** 2014, Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials*, 64:350-359pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086>
- Bahmani, S.H., Farzadnia, N., Asadi, A., Huat B.B.K.,** 2016, The effect of size and replacement content of nanosilica on strength, *Construction and Building Materials*, 118:294-306pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.075>
- Barbhuiya, G.H., Hasan, S.D.,** 2020, Effect of nano-silica on physio-mechanical properties and microstructure of soil: A comprehensive review, *Materials Today*, 44(1):217-221pp. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.115>
- Beigi, M.H., Berenjian, J., Omran, O.L., Nik, A.S., Nikbin, I.M.,** 2013, An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete, *Materials and Design*, 50:1019–1029pp.
- Buazar, F.,** 2019, Impact of biocompatible nanosilica on green stabilization of subgrade soil, *Scientific Reports*, 1-9pp.
- Chang, T., Wood, R.,** 1992, Effect of particle contact bond on shear modulus, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118:1216-1233pp.
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:8\(1216\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:8(1216))
- Changizi, F., Haddad, A.,** 2015, Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7:367-378pp. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.013>
- Changizi, F., Haddad, A.,** 2016, Effect of nano SiO₂ on the geotechnical properties of cohesive soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34:1-9pp.
- Changizi, F., Haddad, A.,** 2017, Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 170(2):62-71pp. <http://dx.doi.org/10.1680/jgrim.15.00026>
- Chew, S.H., Kamruzzamani A.H.M., Lee F.H.,** 2004, Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 130(7):696–706pp.
- Choobbasti, A.J., Vafaei, A., Kutanaei, S.S.,** 2015, Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica, *Open Engineering*, 5:111-116pp.

- Choobbasti, A.J., Kutanaei, S.S.,** 2017, Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9:981-988pp.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.03.015>
- Cui, H., Jin, Z., Bao, X., Tang, W., Dong, B.,** 2018, Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms, *Construction and Building Materials*, 189:286-295pp.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.181>
- Dündar, B.,** 2016. The effect of nanosilica on the properties of pumice incorporated blended cements, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 90pp.
- Eigenbrod, K.D.,** 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4):529–537pp.
- Firoozi, A.A., Taha, M.R., Firoozi, A.A.,** 2014, Nanotechnology in civil engineering. *Electron J Geotech Eng* 19:4673–4682pp.
- García, S., Trejo, P., Ramírez, O., López-Molina, J., Hernández, N.,** 2017, Influence of nanosilica on compressive strength of lacustrine soft clays, *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, P5.
- Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H., Nejad, M.,** 2018, Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay, *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(2):135-142pp.
<http://dx.doi.org/10.22060/ajce.2018.14203.5462>
- 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, *European Physics Journal Plus*, 131-134pp. <http://dx.doi.org/10.1140/epjp/i2016-16134-3>
- Goodarzi, A.R., Salimi, M.,** 2015, Effect of iron industry slags on the geotechnical properties and mineralogy characteristics of expansive clayey soils, *Modares Civil Engineering Journal*, 15:161–203pp.
- Haeri, S.M., Hosseini, A.M., Shahrabi, M.M., Soleymani, S.,** 2015, Comparison of strength characteristics of Gorgan loessial soil improved by nanosilica, Lime and Portland Cement, *Fundamentals to Applications in Geotechnics*, 1820 – 1827pp.
<http://dx.doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-1820>

- Hilt, G.H. and Davidson, D.T.,** 1960, Lime fixation in clayey soils, Lime and Portland Cement, *Highway Research Board Bulletin*, 262:20-32pp.
- Hosseini, P., Bahadori, H., Booshehrian, A.,** 2009, Titanium dioxide nanoparticles used in concrete pavements to improve the properties and photocatalysis properties of concrete, *The 3rd Conference & Exhibition on Environmental Engineering*.
- Hu, H., Chen, X., Chen, J., Ren, X.,** 2018, Laboratory investigation of the effect of nano-silica on unconfined compressive strength and frost heaving characteristics of silty clay, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 55:352-359pp.
- Huang, Y., Wang, L.,** 2016, Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review, *Environmental Earth Sciences*, 75:497-507pp. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-015-5118-8>
- Humur, H.G.,** 2018. Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 67pp.
- Iranpour, B., Haddad, A.,** 2016, The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment, *Engineering Geology*, 205:40–53pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.015>
- Javadzadeh, P.,** 2019, Investigating the effect of nanomaterials on resistance parameters of clay soil, *Journal of Applied Engineering Sciences*, 9(22):139-144pp. <http://dx.doi.org/10.2478/jaes-2019-0019>
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaeic, M., Mirhosseini, S.M.,** 2019, Influence of Nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles, *Cold Regions Science and Technology*, 161:129–136pp. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.011>
- Kim, D., Nam, B.H., Youn, H.,** 2018, Effect of clay content on the shear strength of clay–sand mixture, *International Journal of Geo-Engineering*, 9:19-31pp. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0087-x>
- Kutanaei, S.S., Choobbasti, A.J.,** 2017, Effects of nanosilica particles and randomly distributed fibers on the ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of cemented sand, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(3):04016230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001761](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001761)
- Kutanaei, S.S., Choobbasti, A.J.,** 2016. Experimental study of combined effects of fibers and nanosilica on mechanical properties of cemented sand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04016230:1-9pp.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001521](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001521)

- Lanaman, J., Paineau, E., Davidson, P., Bihannic, I., Michot, L., Philippe, A. Petukhov, A., Lekkerkerker, H.,** 2014, Effects of added silica nanoparticles on the nematic liquid crystal phase formation in beidellite suspensions, *Journal of Physical Chemistry B*, 118:4913-4919pp.
- Leroueil, S., Tardif, J., Roy, M., La Rochelle, P., Konrad, J.M.,** 1991, Effects of frost on the mechanical behaviour of champlain sea clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 28(5):690–697pp.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., Ou, J.,** 2004, Microstructure of cement mortar with nanoparticles, *Composites B: Engineering*, 35 (2):185-189pp.
- Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y., Wang, M.,** 2006, Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite, *Material Letters*, 60:356-359pp.
- Li, H., Zhang, M., Ou, J.,** 2007, Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement, *International Journal Fatigue*, 29:1292-1301pp.
- Locat, J., Berube, M. A., and Choquette, M.** 1990, Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: Shear strength development, *Canadian Geotechnical Journal*, 27:294–304pp.
- Locat, J., Tremblay, H., and Leroueil, S.,** 1996, Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime, *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 654–669pp.
- Mohammadi, M., Niazi, M.,** 2013, Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay, *Journal of Advanced Science and Technology*, 3: 37-46pp.
- Mousavi, S.E.,** 2016, Effect of moisture content on shear strength of offshore clay interface steel surface, *International Journal of Engineering*, 29:183-191pp.
- National Research Council,** 2006, Committee on Geological and Geotechnical Engineering Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium: Opportunities for Research and Technological Innovation, 206pp.
- Nezhad, R.S., Nasehi, S.A., Uromeihy, A., Nikudel, M.R.,** 2021, Utilization of nanosilica and hydrated lime to improve the unconfined compressive strength (UCS) of gas oil contaminated clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, 39:2633–2651pp. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01642-6>

- Önder, E.**, 2019. Nanosilika katkılı geleneksel betonların mekanik ve elastik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 39pp.
- Panzer, T.H., Christoforo, A.L., Cota, F.P., Borges, P.H.R., Bowen, C.R.**, 2011, Ultrasonic pulse velocity evaluation of cementitious materials, *Analysis of Natural and Man-Made Materials*.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C.**, 2007, Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Construction Building Materials*, 21(3):539–45pp.
- Ren, X., Hu, K.**, 2014 Effect of nanosilica on the physical and mechanical properties of silty clay, *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 6:1010 – 1013pp. <https://doi.org/10.1166/nnl.2014.1857>
- Rikhtehgar, Y.A.**, 2016. Investigation into the effects of nano-materials and nano-polymers on clays, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 127pp.
- Roustaie, M., Eslami, A., Ghazavi, M.**, 2015, Effects of freeze-thaw cycles on a fiber reinforced fine grained soil in relation to geotechnical parameters, *Cold Regions Science and Technology*, 120:127-137pp.
- Roustaie, M., Ghazavi, M., Alighaei, E.**, 2016, Application of tire crumbs on mechanical properties of a clayey soil subjected to freeze-thaw cycles, *Scientia Iranica*, 23:122-132pp.
- Sarli, J.M., Hadadi, F., Bagheri, R.A.**, 2020, Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO₂, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38:1151–1163pp. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01078-7>
- Thomas, T., Rangaswamy, K.**, 2020, Strengthening of cement blended soft clay with nano-silica particles, *Geomechanics and Engineering*, 20:505-516pp. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.20.6.505>
- Tomar, A., Sharma, T., Sandeep, S.**, 2020, Strength properties and durability of clay soil treated with mixture of nano silica and polypropylene fiber, *Materials Today - Proceedings*, 26:3449–3457pp. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.239>
- Vakili, A.H., Shojaei, S.I., Salimi, M., Selamat, M.R., Farhadi, M.S.**, 2020, Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with

nanosilica-treated dispersive soils, *Soils and Foundations*, 1-12pp.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.001>

Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X., Wen, Z., 2007, Effect of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay, *Cold Regions Science and Technology*, 48:34-43pp.

Ye, Q., 2001, The study and development of the nano-composite cement structure materials, *New Building Materials*, 1:4-6pp.

Zomorodian, S.M.A., Shabnam, M., Armina, S., Kelly, B.C.O., 2017, Strength enhancement of clean and kerosene - contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives, *Applied Clay Science*, 140:140-147pp.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.004>



TEŞEKKÜR

Çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalıőmanın hazırlanma sürecinin her aőamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ'ye çok teşekkür ederim.

27/ 08 / 2021

Gizem AKSU UYSAL

ÖZGEÇMİŞ

Gizem AKSU UYSAL, ilk ve orta öğrenimini Suphi Koyuncuoğlu İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Lise öğrenimini ise Atatürk Lisesi'nde tamamladı. 2017 yılında Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve 2018 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı.

