



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE NANO-SiO<sub>2</sub> İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK  
PLASTİSİTELİ ZEMİNİN BİR BOYUTLU OTURMA DAVRANIŞININ  
ARAŞTIRILMASI

VEDAT YILMAZ

Ocak 2021



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE NANO-SİO<sub>2</sub> İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK  
PLASTİSİTELİ ZEMİNİN BİR BOYUTLU OTURMA DAVRANIŞININ  
ARAŞTIRILMASI

VEDAT YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Firdevs Uysal

Ocak 2021

**Vedat YILMAZ** tarafından **Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL** danışmanlığında hazırlanan “**Yüksek Fırın Cürufu ve Nano-SiO<sub>2</sub> ile Stabilize edilen Yüksek Plastisiteli Zeminin Bir Boyutlu Oturma Davranışının Araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Fatih ÇELİK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Baki Bağrıaçık, Çukurova Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Prof. Dr. Murat BARUT**  
**MÜDÜR**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Vedat YILMAZ

## ÖZET

### YÜKSEK FIRIN CÜRUFU VE NANO-SiO<sub>2</sub> İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK PLASTİSİTELİ ZEMİNİN BİR BOYUTLU OTURMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

YILMAZ, Vedat

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: : Dr. Öğr. Üyesi Firdevs Uysal

Ocak 2021, 102 sayfa

Bu tez çalışmasında, yüksek fırın cürufu ve nano-SiO<sub>2</sub> ile stabilize edilen yüksek plastisiteli ince daneli zeminin bir boyutlu oturma davranışı araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, yüksek fırın cürufu ve yüksek fırın cürufu ile nano-SiO<sub>2</sub> karışımının stabilizasyona etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Bu kapsamda, yüksek plastisiteli zemine dört farklı oranda yüksek fırın cürufu (%10, %20, %30 ve %40) ve aynı cüruf oranlarına küçük miktarlarda (%1 ve %1.5) nano-SiO<sub>2</sub> eklenerek iki farklı numune hazırlanmıştır. Deneysel çalışmaların ilk aşaması olarak, kullanılan malzemelere XRF (X-Ray Fluorescence), XRD (X-Işınları Kırınımı), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve lazer kırınım testleri yapılarak malzemelerin fiziksel ve özellikleri tespit edilmiştir. Sonrasında, stabilize zeminlerin indeks özelliklerini ve hacimsel değişimini değerlendirmek için bir dizi laboratuvar deneyi (Atterberg limitleri, proktor, konsolidasyon ve şişme) yapılmıştır. Deney sonuçları hem yüksek fırın cürufu hem de cüruf ile nano-SiO<sub>2</sub> karışımlarının plastisitenin azaltılması, yoğunluğun artırılması, konsolidasyon oturmaları ve şişme yüzdelerinin azalmasında etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, genel olarak yüksek fırın cüruf ile %1 nano-SiO<sub>2</sub> karışımının, %1.5 oranına göre daha etkili olduğu görülmüştür.

*Anahtar sözcükler:* Zemin stabilizasyonu, konsolidasyon, Nano-SiO<sub>2</sub>, yüksek fırın cürufu, yüksek plastisiteli zemin

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF ONE- DIMENSIONAL CONSOLIDATION BEHAVIOUR OF HIGH PLASTICITY SOIL STABILIZED BY BLAST FURNACE SLAG AND NANO-SiO<sub>2</sub>

YILMAZ, Vedat

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Advisor: : Assoc. Prof. Dr. Firdevs UYSAL

January 2021, 102 pages

In this thesis, the one-dimensional consolidation behavior of high plasticity fine-grained soil stabilized by blast furnace slag and nano-SiO<sub>2</sub> was investigated. The effect of blast furnace slag, and the mixture of blast furnace slag and nano-SiO<sub>2</sub> on stabilization were examined separately in experimental studies. In this scop, two different samples were prepared by adding four different ratios of blast furnace slag (10%, 20%, 30%, and 40%) and the same slag ratios with small amounts (1% and 1.5%) of nano-SiO<sub>2</sub> to the high plasticity soil, separately. As the first step of experimental studies, the physical and chemical properties of the materials were determined by performing XRF (X-Ray Fluorescence), XRD (X-Ray Diffraction), SEM (Scanning Electron Microscopy), and laser diffraction tests on the materials. Then, a series of laboratory tests (Atterberg limit tests, proctor, consolidation, and swelling) were conducted to evaluate the index properties and the volumetric change of stabilized soils. The test outcomes revealed that both blast furnace slag and the mixture of blast furnace slag and nano-SiO<sub>2</sub> are effective in increasing density, reducing plasticity, compressibility, and swelling. Additionally, it has been observed that the mixture of blast furnace slag with 1% nano-SiO<sub>2</sub> is more effective than 1.5% in general.

*Keywords:* Soil stabilization, consolidation, nano-SiO<sub>2</sub>, blast furnace slag, high plasticity soil

## ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL' a en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında her türlü yardım ve araştırmamın tamamlanmasında kıymetli katkılarından dolayı değerli arkadaşım Hüseyin Mert TOPÇU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen başta babam İmran YILMAZ ve annem Fatma YILMAZ olmak üzere değerli aileme ithaf ediyorum.

Bu çalışmaya MMT2019/8-BAGEP numaralı proje ile finansal destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....	viii
SİMGE VE KISALTMALAR .....	ix
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II KİLİ ZEMİNLERİN OLUŞUMU VE YAPISI .....	4
2.1 Zeminlerin Oluşumu .....	4
2.2 Killi Zeminlerin Özellikleri .....	5
2.3 Kil Zeminlerin Yapısı ve Kil Çeşitleri .....	6
2.3.1 Kaolinit .....	10
2.3.2 Montmorillonit .....	11
2.3.3 İllit .....	12
2.3.4 Klorit .....	12
BÖLÜM III ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ .....	14
3.1 İyileştirmenin Gerekli Görüldüğü Problemler .....	15
3.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri .....	18
3.2.1 Mekanik iyileştirme .....	19
3.2.2 Hidrolik iyileştirme .....	20
3.2.3 Donatı kullanılarak iyileştirme .....	20
3.2.4 Katkı malzemeleri ile iyileştirme .....	20
3.2.4.1 Kireç ile stabilizasyon .....	21
3.2.4.2 Çimento ile stabilizasyon .....	23
3.2.4.3 Bitüm ile stabilizasyon .....	23
3.2.4.4 Cüruf ile stabilizasyon .....	24
3.2.4.5 Uçucu kül ile stabilizasyon .....	26
3.2.4.6 Silis dumanı ile stabilizasyon .....	27

3.2.4.7 Mermer tozu ile stabilizasyon.....	28
3.2.4.8 Nano malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanımı .....	28
<b>BÖLÜM IV LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>33</b>
4.1 Yüksek Fırın Cürufunun Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı .....	33
4.2 Nano SiO <sub>2</sub> 'nin Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı.....	38
<b>BÖLÜM V DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR.....</b>	<b>43</b>
5.1 Deneysel Çalışmalar .....	43
5.1.1 Özgül ağırlıkların belirlenmesi .....	44
5.1.2 Su muhtevasının belirlenmesi .....	45
5.1.3 Kıvam limitleri deneyleri.....	45
5.1.4 Standart proktor deneyi.....	48
5.1.5 Konsolidasyon deneyi.....	50
5.1.6 Şişme yüzdesi deneyleri.....	52
5.1.7 Su ve nano SiO <sub>2</sub> solüsyonunun hazırlanması .....	53
5.2 Deneysel Sonuçlar .....	54
5.2.1 Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri .....	54
5.2.2 Kıvam (Atterberg) limitleri.....	60
5.2.3 Kompaksiyon (Proktor) deneyleri .....	66
5.2.4 Konsolidasyon deneyleri.....	70
5.2.5 Şişme yüzdesi deneyleri.....	82
<b>BÖLÜM VI SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>85</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>90</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	<b>101</b>
<b>TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER .....</b>	<b>102</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kil minerallerinin iyonik içeriğine göre sınıflandırılması (Önalp, 1983) ....	9
Çizelge 2.2. Bazı kil minerallerinin ortalama büyüklük, kalınlık ve spesifik yüzey değerleri (Holtz and Kovacs, 1981) .....	9
Çizelge 2.3. Yaygın kil türleri özellikleri (Taşcı, 2011) .....	13
Çizelge 3.1. Kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri (KGM, 2005) .....	21
Çizelge 3.2. Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri % (Kizirgil, 2001).....	25
Çizelge 5.1. Hazırlanan doğal zemin, YFC ve nano-SiO <sub>2</sub> karışımları .....	43
Çizelge 5.2. Deneysel çalışma aşamaları.....	44
Çizelge 5.3. Atterberg ve zemin fazları (Head, 1992) .....	46
Çizelge 5.4. Na bentonit, kaolen, doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriği .....	55
Çizelge 5.5. Nano-SiO <sub>2</sub> 'nin kimyasal içeriği.....	55
Çizelge 5.6. Nano-SiO <sub>2</sub> 'nin fiziksel özellikleri .....	56
Çizelge 5.7. Malzeme yoğunluk değerleri .....	57
Çizelge 5.8. Doğal zeminin konsolidasyon deney sonuçları .....	71
Çizelge 5.9. E <sub>oed</sub> değerine bağlı hesaplanan E değerleri .....	79

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kil zeminlerin yapısı (Yavaşcan, 2010) .....	6
Şekil 2.2. Zeminlerin dokusu (Ural, 2018) .....	7
Şekil 2.3. Tetrahedron tabakası; tetrahedron yapıtaşı (a), silika tabakası (b) ve silika tabakasının temsili gösterimi (c) (Fell vd., 1992) .....	8
Şekil 2.4. Oktahedron tabakası: oktahedron yapıtaşı (a), alümina tabakası (b) ve alümina tabakasının temsili gösterimi (c) (Fell vd., 1992) .....	8
Şekil 2.5. Kaolinit killinin yapısı (Taşçı, 2011) .....	10
Şekil 2.6. Kaolinit kilinin atomik yapısı (Aydın, 2018) .....	10
Şekil 2.7. Kaolinit killinin SEM görüntüsü (Aziz, 2012) .....	11
Şekil 2.8. Montmorillonit mineralli atomik yapısı (Fell vd., 1992) .....	11
Şekil 2.9. illit minerallerine ait atomik yapı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992) .....	12
Şekil 2.10. Klorit kil mineralinin örnek bir SEM görüntüsü (Aydın, 2018) .....	13
Şekil 3.1. Zemin sınıflarına göre iyileştirme yöntemleri (Önalp ve Sert, 2010) .....	19
Şekil 3.2. Kompaksiyon eğrisi (Coduto, 1999) .....	20
Şekil 3.3. Kirecin kompaksiyon parametrelerine etkisi (Taşçı, 2011) .....	22
Şekil 3.4. Demir-Çelik fabrikalarında cürufa ait akış diyagramı (Kizirgil, 2001) .....	25
Şekil 3.5. Elektrik-ark fırınında silis dumanı oluşumu (Taşçı, 2011) .....	27
Şekil 3.6. Nano boyutlu malzemelerin artan yüzey alanının etkisinin illüstrasyonu (Raufı, 2018) .....	30
Şekil 3.7. Nano teknolojinin yaklaşımlarının açıklaması (Güler, 2020) .....	31
Şekil 3.8. Nano malzemelerin farklı yapısal biçimleri (Raufı, 2018) .....	32
Şekil 5.1. İnce daneli zeminlerde hacim-su muhtevası arasındaki ilişki (Uzuner, 1988) .....	46
Şekil 5.2. Standart proktor deneyi sıkışma eğrisi .....	50
Şekil 5.3. XRD analiz sonuçları; Na bentonit (a), kaolen (b), doğal zemin (c), YFC (d) ve nano-SiO <sub>2</sub> (e) .....	57
Şekil 5.4. SEM Görüntüleri; doğal zemin (a), YFC (b) ve nano-SiO <sub>2</sub> (c) .....	58
Şekil 5.5. Deney dane dağılım eğrileri; doğal zemin (a), YFC (b) ve nano-SiO <sub>2</sub> (c) .....	59
Şekil 5.6. Likit limit değerleri; YFC (a), YFC+%1 nano-SiO <sub>2</sub> (b) ve YFC+%1.5 nano-SiO <sub>2</sub> (c) .....	61

Şekil 5.7. Likit limit ( $w_L$ ) değişimleri .....	62
Şekil 5.8. Plastik limit değerleri; YFC (a), YFC+% 1 nano-SiO <sub>2</sub> (b) ve YFC+% 1.5 nano-SiO <sub>2</sub> (c).....	63
Şekil 5.9. Plastik limit ( $w_p$ ) değişimleri.....	64
Şekil 5.10. Plastisite indisi değerleri; YFC ( a), YFC+%1 nano-SiO <sub>2</sub> (b) ve YFC+% 1.5 nano-SiO <sub>2</sub> (c) .....	65
Şekil 5.11. Plastisite indisi ( $I_p$ ) değişimleri.....	66
Şekil 5.12. Doğal zeminin sıkışma eğrisi .....	67
Şekil 5.13. Artan YFC oranları ile $\gamma_k$ değişimi .....	68
Şekil 5.14. Artan YFC oranları ile $w_{opt}$ değişimi.....	68
Şekil 5.15. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $\gamma_k$ değişimine etkisi .....	69
Şekil 5.16. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $w_{opt}$ değişimine etkisi.....	70
Şekil 5.17. Doğal zeminin sıkışma eğrisi .....	71
Şekil 5.18. Doğal zeminin permeabilitesinin basınç kademeleri ile değişimi .....	72
Şekil 5.19. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin k (permeabilite) değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400 kPa (b) .....	73
Şekil 5.20. Doğal zeminin $c_v$ değerinin basınç kademeleri ile değişimi.....	74
Şekil 5.21. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $c_v$ değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b) .....	75
Şekil 5.22. Doğal zeminin $m_v$ değerlerinin basınç kademeleri ile değişimi .....	75
Şekil 5.23. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $m_v$ değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b).....	76
Şekil 5.24. Doğal zeminin $E_{oed}$ değerinin basınç kademeleri ile değişimi.....	77
Şekil 5.25. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $E_{oed}$ değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b)...	78
Şekil 5.26. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $C_c$ değişimine etkisi .....	80
Şekil 5.27. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $C_s$ değişimine etkisi .....	80
Şekil 5.28. YFC ile nano-SiO <sub>2</sub> 'nin $C_\alpha$ değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b) .....	82
Şekil 5.29. Şişme indisinin zamanla değişimi .....	83
Şekil 5.30. Şişme indisi değerlerinin karşılaştırılması; 24 saat (a), 48 saat (b), 72 saat (c) ve 96 saat (d) .....	84

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Kireç ile karayolu zemin iyileştirilmesi (Al, 2018) .....	22
Fotoğraf 3.2. Bitüm ile zemin stabilizasyonu (Aydın, 2018) .....	24
Fotoğraf 5.1. Likit limit deney aşamaları .....	47
Fotoğraf 5.2. Plastik limit deney numunesi .....	48
Fotoğraf 5.3. Standart proktor deney aşamaları.....	50
Fotoğraf 5.4. Konsolidasyon deney aletleri .....	51
Fotoğraf 5.5. Konsolidasyon deney numunesinin hazırlanması .....	52
Fotoğraf 5.6. Ultrasonik banyo .....	53
Fotoğraf 5.7. Deney malzemeleri; Na bentonit (a), kaolen (b), doğal zemin (c), YFC (d) ve nano-SiO <sub>2</sub> (e) .....	54

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$Al_2O_3$	Alüminyum oksit
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat (Kireç taşı)
$CaO$	Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
$SiO_2$	Silisyum dioksit
$MgO$	Magnezyum oksit
$MgO_3$	Magnezyum karbonat
$CaO_3$	Kalsiyum karbonat
$Na_2O$	Sodyum oksit
$\mu m$	Mikrometre
$\gamma k, maks$	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
wopt	Optimum su muhtevası
$W_s$	Rötre limiti
$W_p$	Plastik limit
$W_L$	Likit limit
$I_p$	Plastisite indisi
qu	Serbest basınç mukavemeti

<b>Kısaltma</b>	<b>Açıklama</b>
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
GGBS	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	Düşük Plastisiteli Kil
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi
XRD	X-Işınları Kırınım Cihazı

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Günümüzde yapılaşma ihtiyacının artması ve kullanılabilir inşaat alanının azalması gibi faktörler zayıf zeminler üzerine yapıların inşasını zorunlu hale getirmektedir. Bu zayıf zeminler üzerinde inşa edilen yapılarda birçok mühendislik problemi ortaya çıkabilmektedir. Zayıf zemin özelliklerini istenilen hale getirmek için uygun zemin iyileştirme yöntemini seçip arazideki mevcut zayıf zemini güçlendirmek çoğu kez daha iyi bir çözüm olabilmektedir (Demiröz ve Karaduman, 2009). Ülkemizde ve dünyada çeşitli iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir ve bu çalışmalar halen devam etmektedir.

Zemin iyileştirme problemi zemin özelliklerini çeşitli yöntemlerle daha iyi bir hale getirmek için verilen genel bir isimdir. İyileştirmede esas amaç, problemlili zemini kullanıma açmak için çeşitli mekanik araçlar ve katkı malzemeleri kullanarak zemin mukavemetini arttırmak, oturmasını azaltarak zemini daha geçirimsiz ve güvenli bir hale getirmektir. Zeminlerin katkı malzemeleri ile stabilizasyonu çoğu kez diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik bir çözüm olabilmektedir. Bu durum günümüzde stabilizasyonun geliştirilmesi ve birçok alanda kullanılmasına neden olmaktadır. Stabilizasyonda yaygın olarak kullanılan malzemelere örnek olarak kireç, çimento, uçucu kül, mermer tozu, cam tozu, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve bitüm verilebilir. Bu malzemelere bakıldığı zaman, stabilizasyonda katkı malzemesi olarak çok sayıda endüstriyel fabrika atığının kullanıldığı görülmektedir. Bu atıkların stabilizasyonda kullanılarak bertaraf edilmesi hem problemlili zeminleri iyileştirmekte hem de bu atıkların doğaya verdiği zararları azaltmaktadır. Son yıllarda artan teknolojik gelişmeler ve üretimin daha ucuz hale gelmesiyle zemin stabilizasyonunda nano malzemelerin kullanımı da araştırılmaktadır. Yapılan çalışmalarda nano malzemelerin taşıma gücü ve oturma gibi önemli problemlilerin iyileştirilmesinde dikkat çeken bir etkiye sahip olması araştırmacıların ilgisini arttırmaktadır. Araştırmalarda kullanılan başlıca nano malzemeler nano silika, nano zeolit, nano alümina, nano MgO ve nano kildir (Abhisek and Ashwani, 2017). Çok küçük boyutlara sahip olan nano parçacıklar çok yüksek özgül yüzey alanına sahiptir. Bu nedenle zemin yapısındaki diğer parçacıklarla etkili bir biçimde reaksiyona girer. Zemin içinde çok az miktarda nano malzemenin bulunması bile zeminin mühendislik özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Yapılan çalışmalar bu

malzemelerin zeminin mukavemetini, geçirgenliğini, sıkışabilirliğini ve yoğunluğunu büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir (Abhisek and Ashwani, 2017).

Zemine yük uygulandığında elastik ve plastik şekil değiştirmeler meydana gelir. Elastik şekil değiştirmeler toplam deformasyonların küçük bir kısmını oluşturmakta ve zemine uygulanan yük kaldırıldığında zemin eski haline geri dönmektedir. Plastik şekil değiştirmelerde ise yük kaldırıldığında zeminde kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Zeminde meydana gelen şekil değiştirmelerin tespit edilmesi için bilinmesi gereken parametrelerden biri de zemine daha önce uygulanan gerilmelerdir. Bu özellikler göz önüne alındığı zaman, zeminde meydana gelen deformasyonların araştırılması her zaman matematiksel denklemlerle ifade edilemeyen son derece karmaşık problemlere dönüşmektedir (Özaydın, 2000).

Zeminde meydana gelen ve izin verilebilir değerleri aşan oturmalar, önem arz eden zemin problemlerindedir. Zeminde oluşan aşırı ve fark oturmalar sonucunda yapılarda mimari ve işlevsel sorunlar oluşabilmekte, hatta yapı güvenliğini tehlikeye sokan taşıyıcı sistem hasarları da görülebilmektedir. Karayolu yapıları gibi bazı yapılarda meydana gelen oturmalar ciddi problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle yapıda meydana gelebilecek toplam ve fark oturmaların miktarları ve ne zaman tamamlanacağı yapı tasarım aşamasında dikkatli bir şekilde hesaplanmalıdır. Çoğu kez kum ve çakıl gibi kohezyonsuz zeminlerde meydana gelen elastik oturmalarla kaynaklanan problemleri düzeltmek nispeten daha kolaydır. Elastik oturmalar kısa sürede meydana gelirken, su tutma potansiyeli yüksek ve geçirimsizliği düşük olan ince daneli zeminlerde meydana gelen oturmalar uzun süre devam edebilmektedir. Bu durumda uygulanan yükler altında zeminlerin çoğunlukla yükleme doğrultusunda ve tek yönlü olarak sıkıştığı kabul edilir (Uzuner, 1997).

Şişen zeminler problemlili zeminlerden olup, su içeriği arttığında hacmi artar, tersi durumda ise hacmi azalır. Şişen zeminler genelde montmorillonit tipi kil minerallerini içermekte ve çoğu zaman kurak iklimlerde görülmektedir (Demir ve Kılınç, 2010). Şişen zeminler yapılarda büyük hasarlara neden olabilmektedir. Özellikle mevsimsel değişimlere bağlı olarak suya doygun olmayan kohezyonlu zeminler su ile etkileşime girerek suyu içine hapseder, zemin hacminin artması ile de zeminde kabarmalar meydana gelir. Zemin kurduğunda ise büzülme ve çatlaklar meydana gelir. Bu

hacimsel değişimlerden en çok etkilenen mühendislik yapıları hafif yapılar olup, karayolları dolguları, havaalanı pistleri, tüneller, sulama kanalları ve bahçe duvarları örnek olarak verilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, %25 Na bentonit ve %75 kaolen kilinin karıştırılması ile yüksek plastisiteli doğal bir zemin oluşturulmuştur. Bu doğal zemini stabilize etmek için doğal zemine ağırlıkça dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) yüksek fırın cürufu (YFC) ve aynı YFC oranlarına %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> karıştırılmıştır. Bu şekilde hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının doğal zeminin stabilizasyonuna etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda stabilize edilen zeminin indeks özellikleri ve hacimsel değişimini değerlendirmek için Atterberg limitleri, proktor, konsolidasyon ve şişme deneyleri yapılmıştır.

## BÖLÜM II

### KİLİ ZEMİNLERİN OLUŞUMU VE YAPISI

#### 2.1 Zeminlerin Oluşumu

Zemin, yer kürenin dış kabuğunu oluşturan, bünyesinde farklı dane çaplarında mineral ve organik maddelerin yanı sıra, su ve gaz bulunduran doğal bir malzemedir. Bazı durumlarda organik maddeler de zemin bileşeni olmaktadır. Zeminler, kayaçların fiziksel ve kimyasal ayrışması sonucu meydana gelir. Zeminlerin karakteristikleri genellikle oluştuğu kayaların özelliklerini taşımaktadır (Yavaşcan, 2010). Kayaçların oluşumunda çevre koşullarının yanı sıra kimyasal süreçler de oldukça etkilidir. İklim etkileri, bitkiler ve canlı organizmaların etkileri, hava ile olan etkileşim ve su, genel olarak fiziksel ayrışmada etkili olan faktörler olarak ifade edilebilir. Fiziksel ayrışmanın yanı sıra kayaçlarda bulunan birincil minerallerin kimyasal ayrışmaları da zeminlerin oluşumunda etkili olup, bu ayrışmalar bir takım ikincil minerallerin oluşumuna neden olmaktadır. Yeni oluşan ikincil mineraller birincil minerallere göre daha az dayanıma sahip olup, bu mineraller fiziksel ayrışmaya uğrayarak daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Sonuç olarak kayaçlar çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler sonunda boyutları farklı çok sayıda küçük danelere ayrılmaktadır. Bunlar daha sonra doğal bir malzeme olan zeminleri oluşturmaktadır (Özaydın, 2000). Çakıl, kum ve siltler çoğunlukla kuvars minerallerinden, killer ise silikatlardan oluşmaktadır.

Zeminler oluşumlarına göre iki gruba ayrılır. Bunlar, yerinde oluşmuş (rezidüel) zeminler ve taşınmış zeminlerdir. Rezidüel zeminler kayaçların yerinde fiziksel ve kimyasal ayrışması sonucu meydana gelir. Rezidüel zeminlerde kohezyonlu (ince daneli) ve kohezyonsuz (kaba daneli) olarak iki gruba ayrılır. Taşınmış zeminler, parçalanma ve ayrışma sonucu oluşan parçaların akarsu, buzul, rüzgâr, dalga, kıyı akıntısı, yer çekimi gibi etkiler ile taşınarak birikmesi ile oluşur. Taşınmaya neden olan faktörler ayrıca danelerin parçalanmasına da katkıda bulunabilirler. Farklı taşınma faktörleri ile oluşan zeminler de farklı isimler alabilmektedir. Akarsular tarafından taşınan ve biriken blok, çakıl, kum, silt, kil karışımı zeminler alüvyon zemin adını almaktadır. Akarsu taşınması ile akarsuyun eğiminin büyük olduğu kısımlarda iri daneler, hızın yavaşladığı kısımlarda ince daneli zeminler birikmektedir. Buzullar

yamaçlarda, vadilerde yerçekimi etkisiyle zamanla yavaşça hareket ederek adeta bir akarsu gibi yavaşça ilerler. Buzulların etkisi ile oluşan zeminlere buzul zeminleri adı verilir. Buzullar taşıdıkları bu zeminleri geçtikleri veya sona erdikleri yerlerde biriktirir. Rüzgârlar, ince daneli zeminleri havalandırarak kilometrelerce uzağa taşıyabilir. Rüzgâr ile taşınan ve ince danelerden oluşan zeminlere lős, kum boyutundaki danelerden oluşan zeminlere de kumul adı verilir. Yamaçlardaki kayaçların ayrışması ile oluşan zemin daneleri yer çekimi etkisi ile yuvarlanarak yamaçlarda ve yamaç eteklerinde birikir. Bu şekilde oluşan zeminlere de yamaç zeminleri adı verilir (Tunç, 2002).

## 2.2 Killi Zeminlerin Özellikleri

Kil zeminler dane boyutu 0.002 mm'den küçük, doğal olarak oluşmuş hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan meydana gelen doğal ikincil minerallerdir (Önalp, 2007). Çok küçük danelerden oluşan killer sadece elektron mikroskobu ile görülebilirler. Kilin dane büyüklüğü kil hakkında yeterince bilgi sağlamazken, kilin mineralojik özelliği bu konuda oldukça önemlidir (Chen, 1988).

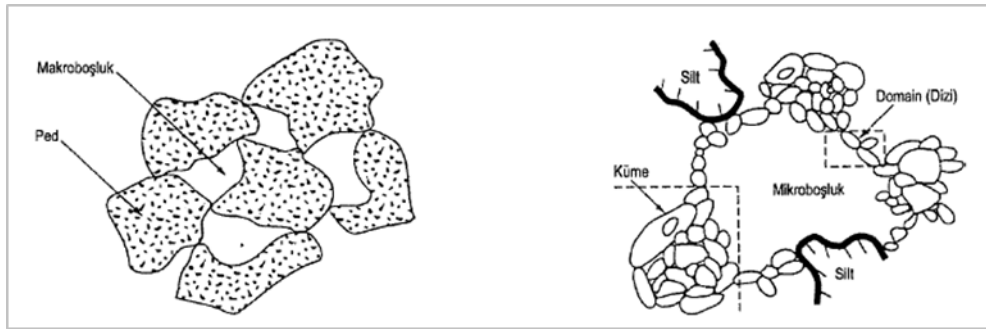
Killi zeminler kil ve diğer minerallerden meydana gelen ince daneli (kohezyonlu) zeminlerdir. Killi zemin kavramı içinde bir miktar kil ihtiva eden zeminler için kullanılır. Zemin içindeki kil minerallerinin miktarı, zeminin mühendislik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Zeminde kil oranı %50 olduğu anda kum ve silt daneleri bir hamur içinde yüzen daneler gibi davranır (Holtz and Kovacs, 1981). Kilin önemli bir özelliği de düşük permeabilitesidir. Bu özelliğinden dolayı dolgu barajlarda kil çekirdek, atık depolarında ise kil şilte gibi geçimsizliğin sağlanması amacıyla kullanılır (Pekdemir, 2013).

Kil danelerinin levha benzeri şekillere sahip olması nedeniyle yüzey alanlarının kütlelerine oranı çok büyüktür. Büyük özgül yüzey alanına sahip kil partiküllerinin arasında bir takım kuvvetler gelişir. Büyük özgül yüzey ayrıca, su moleküllerinin bağlanması için de fazlaca yer sağlar. Bu sebeple killer, suyu içine çekme eğilimi gösterirler. Su ve kil mineralleri arasındaki etkileşim oldukça karmaşıktır. Kil mineralleri aynı boyuta sahip başka minerallerden farklı olarak su ile etkileşimi sonucunda çamur oluşturur. Yaş durumda kolaylıkla şekil verilebilirken, pişirildiğinde büyük dayanım artışı gösterir. Ayrıca, kil mineralleri genel olarak ıslanmış zaman

hacim artışı gösterirken, kurduğunda ise hacmi azalır ve çoğunlukla çatlaklar (Karakaya, 2006). Hacim değişimi nedeniyle killerde meydana gelen oturma ve şişme gibi özellikler bu tür zeminleri problemlili zeminler arasına koyar. Çakıllarda ve kumlarda suyun varlığı önemsiz bir durumken, killerin geoteknik özellikleri su içeriğinden oldukça fazla etkilenmektedir (Coduto, 2006).

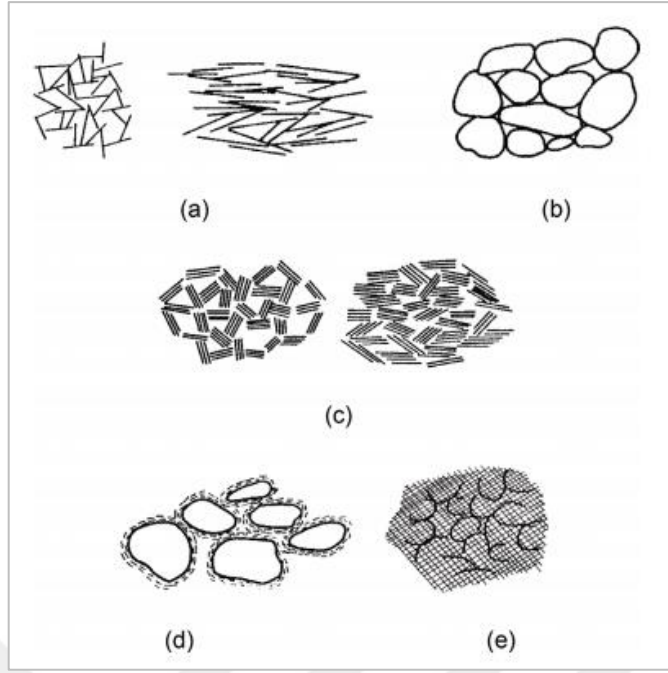
### 2.3 Kil Zeminlerin Yapısı ve Kil Çeşitleri

Kil mineralleri karmaşık bir yapıya sahiptir ve genel olarak alüminyum, demir ve magnezyum gibi silikatların ayrışması ile oluşur. Kil partikülleri elektron mikroskobu altında incelendiğinde, partiküller önce bir zincir gibi danelerin dizilmesi ile folikül bir yapı oluşturur (Şekil 2.1). Bu yapıya daha sonra dizi (domain) adı verilir. Bu diziler daha sonra kendi aralarında birleşerek kümeleri (petekleri) oluşturur. Kümeler boşluklu yapıdadır ve diziler ile birleşerek pedleri meydana getirir. Pedler arasında da boşluklar bulunur ve bu boşluklar kümeler arasındaki boşluklardan daha büyüktür ve gözle görülebilir büyüklüktedir. Pedler ve arasındaki boşluklar birleşerek bir dizi yaparak fisürleri ve hatta çatlakları oluşturur (Tunç, 2002).



Şekil 2.1. Kil zeminlerin yapısı (Yavaşcan, 2010)

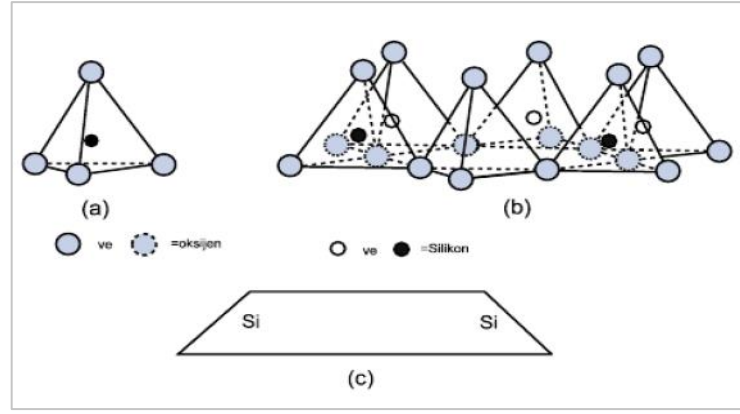
Zeminler Şekil 2.2’de görüldüğü gibi oldukça farklı dokulara sahip olabilir. Şekil 2.2 (a)’da kilde bireysel dane gruplanması, Şekil 2.2 (b)’de silt ve kumların bireysel dane dizilimi, Şekil 2.2 (c)’de kil gruplarının dizilimi, Şekil 2.2 (d)’de kille kaplanmış silt ve kum dane dizilimleri, Şekil 2.2 (e)’de ise belirgin olmayan bir dizilim görülmektedir (Tunç, 2002).



**Şekil 2.2.** Zeminlerin dokusu (Ural, 2018)

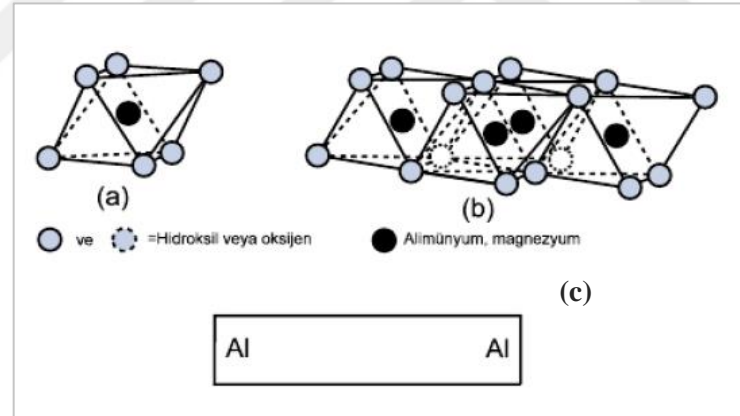
Örselenmemiş killerde, kil mineralleri dağınık iken örselendiklerinde paralele yakın konuma gelmektedir. Ayrıca dağınık halde dizilen kil minerallerinde boşluk oranı daha fazla olup suya daha duyarlıdır. Zemin içinde bulunan boşluklar zeminin stabilite, sıkışma, su tutma eğilimi, drenaj ve şişme gibi özelliklerine etki etmektedir. Kil partikülleri arasında bulunan ve sudan bağımsız olan çekim kuvvetleri de bulunur. Aynı zamanda negatif yüklü kil daneleri pozitif yüklü suyu çekerek danelerin etrafında absorbe su tabakası oluşturur. Bu su tabakası aynı zamanda zeminin plastik özelliklerini de belirler. Şekil 2.2 (a) ve Şekil 2.2 (c) deki partiküllerin birbirine yakın ve uzak olması zemindeki tuz oranına ve buna bağlı floküllemeye bağlıdır (Tunç, 2002).

Genel olarak kil mineralleri silika tetrahedron ve alümina oktahedron olmak üzere iki temel kristal yapıdan oluşmaktadır. Silika tetrahedron yapısal olarak merkezinde silisyum iyonu köşelerinde ise oksijen veya hidroksil iyonları bulunan düzgün dörtyüzlü şekildedir (Şekil 2.3). Düzgün dörtyüzlerin tabanları aynı düzlem üzerinde kalmak sureti ile köşelerinden altılı halkalar ile birleşmesiyle tetrahedron tabakası veya diğer adıyla silika tabakası oluşur (Ünver, 2015).



**Şekil 2.3.** Tetrahedron tabakası; tetrahedron yapıtaşı (a), silika tabakası (b) ve silika tabakasının temsili gösterimi (c) (Fell vd., 1992)

Alümina oktahedron yapı ise, merkezinde alüminyum, köşelerde oksijen ya da hidroksil iyonları bulunan düzgün sekizyüzlü şeklindedir (Şekil 2.4). Düzgün sekizyüzlüler köşelerinden birer yüzeyleri aynı düzlem üzerinde olacak şekilde birleşerek oktahedron tabakası veya diğer adıyla alümina tabakasını oluşturur (Ünver, 2015).



**Şekil 2.4.** Oktahedron tabakası: oktahedron yapıtaşı (a), alümina tabakası (b) ve alümina tabakasının temsili gösterimi (c) (Fell vd., 1992)

Oktahedron tabakasında katyonların yer değiştirmesi sonucu farklı mineraller oluşur. Bu duruma izomorf yer değiştirme adı verilir. Bu durumdan dolayı mineraller farklı yapıya sahip olup, farklı isimlerle adlandırılır. Bir oktahedron tabakası içindeki tüm anyonların hidroksilden oluşması ve katyon pozisyonlarının üçte ikisinin alüminyum ile dolması ile oluşan mineral gibsit olarak isimlendirilir. Levhadaki alüminyum yerine magnezyum geçerek katyon pozisyonlarını doldurması ile oluşan mineraller ise brusit adı verilir. Temel levha yapısındaki değişimler, bilinen kil minerallerinden onlarcasını

oluşturmaktadır. Tüm kil mineralleri, belirli bir katyon içeren tetrahedron ve oktahedron tabakaların farklı bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla oluşur (Savaş, 2008). Killerin karmaşık grupları basitleştirilerek kil mineralleri iyonik içeriğine göre sınıflandırılabilir (Çizelge 2.1).

**Çizelge 2.1.** Kil minerallerinin iyonik içeriğine göre sınıflandırılması (Önalp, 1983)

TİP	GRUP	ALT GRUP	ÖRNEK
1:1	Kaolinit-Serpantin	Kaolinitler, Serpantinler	Kaolin, Halloysit, Antigorit, Lizardit
2:1	Profilit-Talk Montmorillonit- Saponit	Prifolitler, Talkler, Montmorilyonitler	Profilit, Baydellit Montmorilyonitler, Bentonit, Saponit
2:1	Vermikulit-Mika	Di-oktahedral Vermikulit Tri-oktahedral vermikulit	Muskovit, Paragonit Biyotit
2:1:1	klorit	Di oktahedral mika Tri oktahedral mika Di- oktahedral klorit Tri- oktahedral klorit	Donbasit, Sudotit

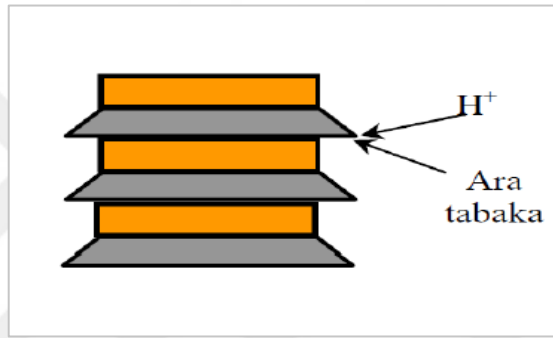
Çizelge 2.2’de doğada en yaygın bulunan kil minerallerinin ortalama büyüklük, kalınlık ve spesifik yüzey değerleri verilmiştir. Dane büyüklükleri karşılaştırıldığında kaolin en büyük ve en kalın montmorillonitler ise en küçüktür. Yüzey aktivitesi dane boyutuna göre değiştiğine göre montmorillonit kaolinden daha aktif olduğu söylenebilir. Doğada en yaygın bulunan kil türleri kaolinit, montmorillonit, illit ve klorittir (Vural, 2012).

**Çizelge 2.2.** Bazı kil minerallerinin ortalama büyüklük, kalınlık ve spesifik yüzey değerleri (Holtz and Kovacs, 1981)

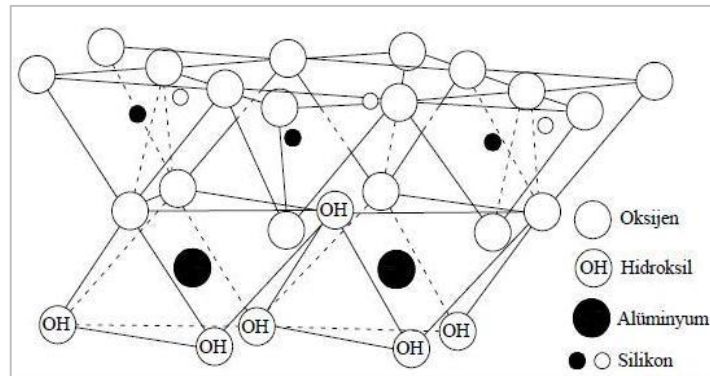
Karakteristik görünüm	Karakteristik kalınlık (mm)	Karakteristik çap (mm)	Özgül yüzey (kg/cm <sup>2</sup> )
montmorillonit	3	100-1000	0.8
illit	30	10000	0.08
klorit	30	10000	0.08
kaolin	50-2000	300-40000	0.015

### 2.3.1 Kaolinit

Kaolinit grubu killer birçok kil mineralinden oluşur. Kaolinit kristalleri levha biçiminde olup düz kristal üniteler oluştururlar. Özgül ağırlıkları 2.60-2.68 mertebesindedir. Kimyasal formülü  $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 'dir. Kaolinitler, yapı olarak bir oktahedral ile bir tetrahedral tabakanın tekrarlı katmanlarından meydana gelir. Kaolinit mineralleri iki tabakanın tekrarlanmasından dolayı 1:1 şekline gösterilir. Kaolinit mineralleri, 0.72mm kalınlığındaki temel bir katmandan meydana gelir ve bu katmanlarda oktahedral levhanın hidroksilleri ile tetrahedral levhanın oksijenleri birbirine hidrojen bağları ile bağlanır (Seyhan, 1972; Çetin, 2003).

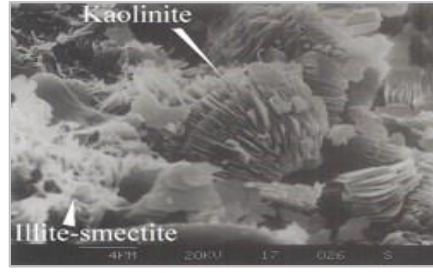


Şekil 2.5. Kaolinit killinin yapısı (Taşçı, 2011)



Şekil 2.6. Kaolinit kilinin atomik yapısı (Aydın, 2018)

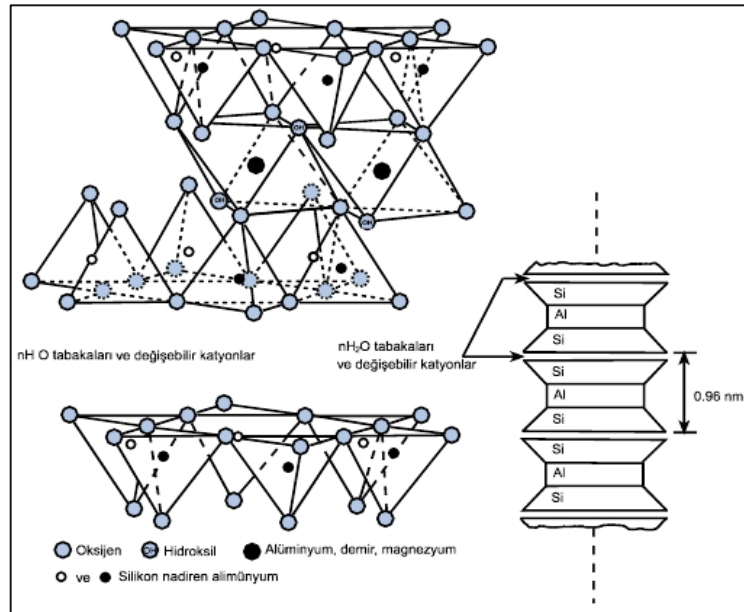
Kaolinitler seramik, dolgu (kâğıt, plastik, tekstil) ve sanayi (çimento, ilaç, kozmetik) alanlarında oldukça sık kullanılır. Şişme potansiyelleri zayıftır. Şekil 2.7'de kaolin kiline ait bir elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir (Çetin, 2003; Seyhan, 1972).



Şekil 2.7. Kaolinit killinin SEM görüntüsü (Aziz, 2012)

### 2.3.2 Montmorillonit

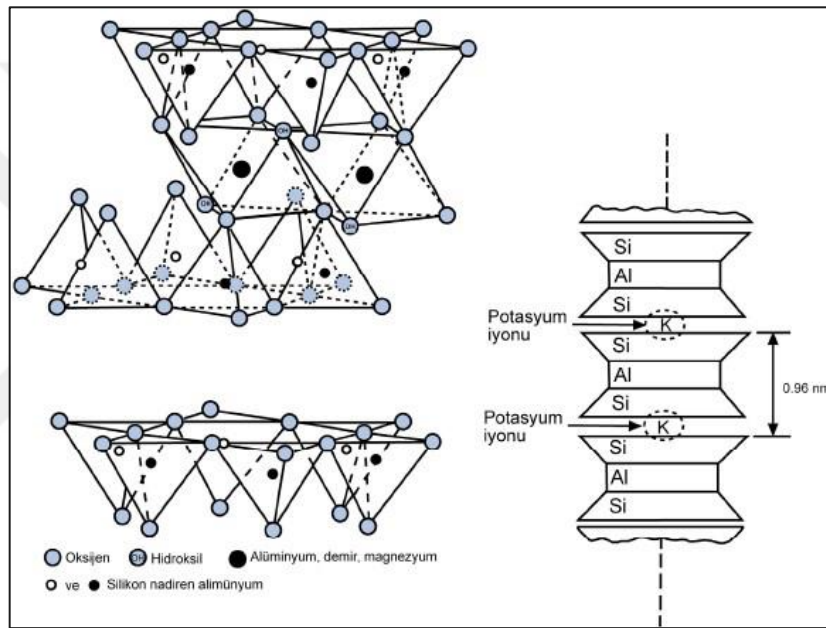
Smektit olarak da isimlendirilen montmorillonit Fransa'nın montmorillon bölgesinde bulunduğu için bu tür killer montmorillonit olarak isimlendirilmiştir. Montmorillonitler iki silika tabakası ile bir gipsit tabakasının üst üste gelmesi ile oluşur (Şekil 2.8). Bu nedenle montmorillonitler 2:1 tabakalanmaya sahiptir ve bu tabakanın katman kalınlığı 0.96nm olup diğer iki yönündeki uzantıları belirsizdir. Montmorillonit kristalleri kaolinite göre boyutları daha küçük olup su emme gücü çok yüksektir ve şişmeye karşı duyarlıdır. (Holtz and Kovacs, 1981). Montmorillonit doğal ortamdan kolayca elde edilen ucuz bir mineraldir. Bu nedenle son yıllarda dökümhanelerde kalıp malzemesi olarak, sondaj duvarlarını korumak (bentonit), kozmetik ve ilaç sanayisi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kolancılar, 2013).



Şekil 2.8. Montmorillonit mineralli atomik yapısı (Fell vd., 1992)

### 2.3.3 İllit

İllit minerali, Illions Üniversitesi profesörlerinden R.E Grim tarafından keşfedilen önemli bir mineraldir. Mineralin kristal yapısı montmorillonite benzer şekilde 2:1 olup, levhalar arasındaki bağlar potasyum iyonu ile sağlanmaktadır (Şekil 2.9). Şişmeye karşı duyarlılığı montmorillonite göre daha az olup içsel sürtünme açısı daha fazladır. Ayrıca silika levhasındaki silisyumun alüminyum ile izomorf yer değiştirmesi de söz konusudur. İllitin tabaka kalınlığı 0.96 nm olup, illit minerali kaolenit ve montmorillonit arasında bir davranış ortaya koymaktadır (Muratoğlu, 2010).



### 2.3.4 Klorit

Klorit, genellikle yeşil renkte olup üç tabakalı mineralleri kapsar (Şekil 2.10). Silikat tabakalarının arasına bir trioktahedrik tabakası yerleşmesi ile oluşur. Kloritler hidrotermal taşlar, şistler ve birçok silikatın birleşmesinden meydana gelir. Kristal yapısı 2:1:1 şeklindedir. Klorit minerali şişmeye müsait olup, montmorillonite göre daha az aktiftir.



**Şekil 2.10.** Klorit kil mineralinin örnek bir SEM görüntüsü (Aydın, 2018)

**Çizelge 2.3.** Yaygın kil türleri özellikleri (Taşcı, 2011)

Özellik	Kaolinit	Montmorillonit	İllit
Dane Boyutu (µm)	0.5-5.0	0.01-1.0	0.02-2.0
Dane Şekli	6 köşeli pul	Eş boyutlu yaprak	Pul
Dış Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	10-30	70-120	70-100
İç Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)	-	550-650	-
Plastisite	Düşük	Yüksek	Orta
Likit Limit	29-70	110-710	60-120
Plastisite İndisi	26-38	51-10	34-60
Kohezyon	Düşük	Yüksek	Orta
Şişme Kapasitesi	Düşük	Yüksek	Orta
Elektrik Yüğü	0	0.5-0.9	1.0-1.5
KDK (meq/100g)	3-15	80-150	10-40
Özgöl Ağırlık	2.6-2.8	2.35-2.7	2.6-3.0
Tabakalar arası mesafe (nm)	0.7	1.0-2.0	1.0
Tabakalar arası bağ	Hidrojen	Van der Waal's bağları	Potasyum iyonları
Net negatif yük (cmolc/kg)	2-5	80-120	15-40

## BÖLÜM III

### ZEMİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Tüm mühendislik yapıları zemin üzerine veya içine inşa edilmektedir. İnşa edilen tüm yapılardan doğacak gerilmeler yapı ömrü boyunca yapı zarar görmeden zemin tarafından güvenli bir şekilde taşınmalıdır. Günümüzde yapılaşmanın artması ve buna bağlı olarak kullanılabilir zeminlerin azalmasından dolayı zayıf zeminlerin de kullanılabilir olması zorunluluk haline gelmiştir. Zayıf zemin koşullarına sahip zeminlerde sıvılaşma riski, taşıma gücü yetersizliği, yüksek yeraltı su seviyesi, aşırı ve fark oturmalar gibi problemlerle karşılaşmaktadır (Altun, 2010). Elverişsiz özelliklere sahip zayıf zeminler üzerinde inşa edilen yapılardan dolayı da birçok mühendislik problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerin ortadan kaldırılması için birçok yaklaşım vardır. Bunlardan en yaygın olanları; mevcut zayıf zemin koşullarına uygun temel tipi seçmek, zayıf zemini kaldırılarak yerine daha iyi zemin ortamı oluşturmak, imkan var ise zayıf zemini terk etmek ve zayıf zemini iyileştirmektir (Özdemir, 2006).

Zeminlerin iyileştirilmesi, farklı özelliklere sahip mekanik araçlar yardımıyla zemin içindeki boşlukların azaltılması veya bu boşlukların katkı malzemeleri ile doldurulması işlemidir (Sağlamer, 2011). Zemin iyileştirilmesi için kullanılan tüm yöntemler, zayıf zeminlerin neden olacağı tüm problemleri gidermeyi ve zemini daha uygun hale getirmeyi amaçlar. Bu yöntemler statik yüklerin yanı sıra deprem kuvvetleri etkisinde de istenilen özellikleri sağlamayan tüm zemin çeşitleri için uygulanabilir. Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıda verilen farklı amaçlar için kullanılmaktadır.

- Zayıf zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak,
- Yapıda meydana gelebilecek oturmaları azaltmak,
- Konsolidasyon süresini azaltmak,
- Şev ve dolgularda ortaya çıkacak stabilite problemlerini ortadan kaldırmak,
- Zeminin geçirgenliğini azaltmak,
- Zeminin yeraltı su seviyesini düşürmek,
- Şişme ve büzülme problemlerini engellemek,
- Yapı temelinde meydana gelebilecek sıvılaşma problemini ortadan kaldırmak,

Zayıf zemin koşullarına sahip zeminlerin iyileştirilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir ve bu yöntemin seçimini etkileyen bazı faktörler bulunmaktadır. Bunlardan en etkin faktörler, iyileştirilecek zemin profili ve zeminin mühendislik özellikleri, yeraltı suyu durumu, hedeflenen iyileştirme seviyesi, iyileştirilecek zeminin derinliği ve çevre yapılar ile ilişkisi, yöntemin uygulanabilirliği (iş planı, ulaşılabilirlik, malzemeler, geçit hakkı, ekipman iş gücü, yeraltında çalışabilme alanlarına ilişkin engeller), ekolojik ve ekonomik faktörler, iyileştirme sonrası yönetime ilişkin gereksinimler (bakım, onarım ve dayanıklılık) şeklinde sıralanabilir (Altun, 2010).

### **3.1 İyileştirmenin Gerekli Görüldüğü Problemlili Zeminler**

Zayıf zemin koşullarına sahip ve iyileştirme uygulaması gerektiren zeminler aşağıda başlıca özellikleriyle verilmiştir.

#### Şişebilen zeminler

İnce daneli zeminlerin bünyelerine aldıkları suyun artışına bağlı olarak hacimlerinde meydana gelen artışa şişme, su miktarındaki azalmaya bağlı olarak meydana gelen hacimce azalmaya da büzülme adı verilir. Kilin mineral yapısı, plastisite özellikleri, dane boyutu ve ortamın su miktarı, şişme ve büzülmeye neden olan başlıca faktörlerdir. Zemin yapısında bulunan  $Mg^{++}$  ve  $Ca^{++}$  katyonları,  $Na^{++}$  katyonlarına göre daha az şişmeye neden olur. Ayrıca zeminin flokül yapıda olması dağılmış yapıya göre daha çok şişme potansiyeli gösterir. Kuru yoğunluğu fazla olan zeminler genellikle daha fazla şişme potansiyeline sahiptir. Zemin ne kadar kuru ise su emmesi o kadar artar, ne kadar doymuş ise su kaybı da o kadar fazladır. Böylece hacim değişim hızı da artmaktadır (Tunç, 2002). Zeminin su emmesi efektif gerilme parametrelerinden bağımsız iken doymuş olmayan zeminlerde negatif boşluk suyu basıncı etkin olmaktadır. Zeminin su emmesi doymuşluk derecesi, boşluk boyutu ve şekli, yüzeysel çekim kuvveti, zemin danelerinin elektrokimyasal özelliklerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla zeminin kuru yoğunluğu (veya konsolidasyon derecesi), başlangıç (veya doğal) su muhtevası, çatlaklı-fisürlü oluşu, inceliği, aktifliği, permeabilitesi, vb. hususlar şişme potansiyelini de belirleyen parametreler olmaktadır. Aşırı konsolide olmuş killer aynı boşluk oranındaki diğer tip zeminlerden daha fazla şişme gösterirler. Çünkü aşırı konsolide

olmuş killerde çatlaklar ve fisürler daha fazla ve yoğunluğu daha yüksektir. Şişebilen kil tabakasının kalınlığı arttıkça şişme daha geç ama daha büyük olabilir ancak aktif bölgenin altında şişme miktarı derinlikle azalmakta ve su muhtevası değişmedikçe sabit kalmaktadır. Aktif bölgede su muhtevasının değişmesiyle şişme/büzülme tekerrür sayısı, geçmişindeki gerilme durumu gibi nedenlere bağlı olarak daha az olmaktadır.

Suyla etkileşime girdiğinde önemli ölçüde hidrasyon ve katyon absorpsiyonu sağlayan bentonit hacimce en fazla şişen kil mineralidir. Bentonit mineralinin zengin olduğu zeminlerde meydana gelen şişme ve buna bağlı olarak meydana gelen şişme basıncı zeminde problem oluşturmaktadır. İllit mineralleri, bentonite göre daha az şişme eğilimi gösterir, kaolin mineralleri ise su ile etkileşime girdiğinde hidrasyon özelliği çok az olduğundan şişmeye karşı duyarlı değildir. (Tunç, 2002). Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemine göre CH (yüksek plastisiteli kil) veya CL (düşük plastisiteli kil) sınıfı zeminler şişme özelliği göstermektedir (Murthy, 2002; Coduto, 1994).

Şişebilen zeminler için şişme yüzdesi ve şişme basıncı olmak üzere iki kavramdan bahsedilir. Şişme yüzdesi belli bir sürşarj yükü altında su içinde bekletilen bir numunenin düşey yönde kabarmasının başlangıç yüksekliğine olan yüzdesi olarak ifade edilir. Bu özellik Kaliforniya Taşıma Oranını (CBR) ve Proktor yöntemleri ile sıkıştırılan zemin numuneleri ile tespit edilmektedir. Şişebilen zeminler ıslak tarafta yani optimum su muhtevsından daha yüksek su muhtevsında sıkıştırıldıklarında daha az şişme gösterir. Şişme miktarı ve basıncını azaltmak için optimum su muhtevsından %1 ve %3 oranlarından daha fazla su muhtevsında ve şartnamede belirtilen minimum sıkıştırma yüzdesinde sıkıştırma yaparak şişme basıncının azaltılması açısından yararlı olacaktır. Ancak hem düşük kompaksiyon hem de ıslak tarafta yapılan sıkıştırma ile hem düşük taşıma gücü hem de sıkışabilir zeminler elde edileceği de unutulmamalıdır. Aşırı şişebilen kil dolgularının farklı kabarmalarını önlemek amacıyla aşırı kompaksiyondan kaçınılmalıdır. Çünkü aşırı kompaksiyon yapıldığında boşluk oranı azalacak fakat kapiler boşluklar artarak şişebilen zeminlerin suyla teması kolaylaşacaktır. Şişebilen zeminlerin şişmesi bir şekilde engellenirse şişme basıncı doğar. Zeminlerin yoğunluğu azaldıkça ve su muhtevası arttıkça şişme basıncı da azalmaktadır. Ancak şişme basıncının azalmasında yoğunluğun azalması su muhtevsının artmasından daha etkilidir (Tunç, 2002).

Şişme potansiyelinin azaltılması için sürşaj yükü kullanılabilir. Sürşaj yükü ne kadar fazla olursa daneler arasındaki çekim kuvveti dengelenir ve şişme azaltılabilir. Ayrıca şişebilen zeminlere çeşitli tuzlar ilave edilerek boşluk suyundaki iyon konsantrasyonu artırılabilir ve kil mineralleri ile iyon değişimi sonucu şişme potansiyeli azaltılabilir. Zeminde çimentolaşma arttıkça şişme potansiyeli azalacağından dolayı killerin kireç, uçucu kül gibi stabilizörler ile stabilize edilmesi şişmenin önlenmesi açısından yararlıdır (Yavaşcan, 2010).

### Turba ve bataklık zeminler

Turba ve bataklık zeminler içinde büyük miktarda canlı atığı barındırır. Bu organik malzemelerin zamanla çürümesi zeminlerin mühendislik davranışı açısından problem teşkil eder. Düşük taşıma gücüne sahip ve oturma açısından da oldukça sakıncalı olan bu zeminlerin üzerine yapı inşa edilmesi durumunda uygun yöntemlerde iyileştirilmesi gerekmektedir (Özdemir, 2006).

### Yumuşak zeminler

Taşıma gücü açısından oldukça zayıf olan yumuşak zeminlerin üzerine çok düşük miktarda yükleme yapıldığı zaman bile zeminde çok yüksek deformasyonlar meydana gelir. Bu tür zeminlerin üzerine zorunlu olarak yapı inşa edilmesi gerekiyorsa uygun yöntemlerle bu zeminin iyileştirilmesi gerekir (Özdemir, 2006).

### Göçebilen zeminler

Göçebilen zeminler, üzerine bir yük uygulandığında veya ıslandıklarında ani göçmelere bağlı olarak büyük hacim azalmalarının görüldüğü zeminlerdir. Hacim azalmalarının en önemli nedeni zeminin kurak coğrafyalarda oluşmuş olması ve zeminin suya doygun olmamasından kaynaklıdır. Silt, lős, jips ve zayıf çimentolanmış zeminler bu özelliği gösterirler (Arslan, 2006).

### Gevşek kumlar ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyonlar

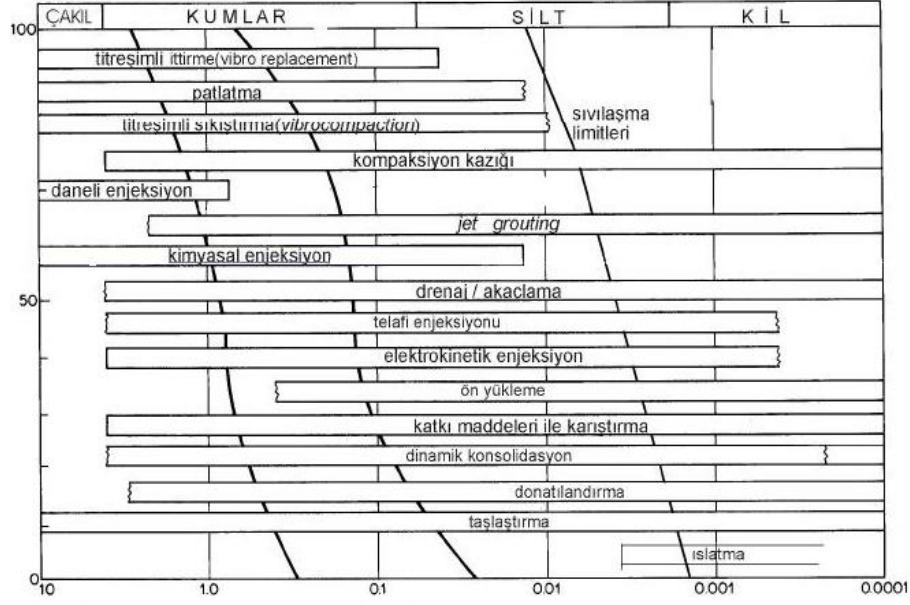
Gevşek kumlar ve yer altı su seviyesinin yüksek olduğu alüvyon zeminler, sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu zeminlerdir. Bu zeminlerde yer altı su seviyesinin yüksek olması ve aynı zamanda dinamik yüklerin (deprem, patlatma, titreşim) uygulanması durumunda taşıma kapasitesinde önemli ölçüde azalmalar meydana gelerek yapının göçmesi ile de sonuçlanabilecek problemler oluşabilmektedir (Özdemir, 2006).

### Dispersif zeminler

Dispersif zeminler su ile etkileşime girdiğinde, boşluk suyu içinde çözülmüş sodyum iyonu yüzdesi fazla olması sebebi ile kolay bir şekilde erozyona uğrayan minerallerdir. Bu tür zeminler kanal, toprak barajlar ve karayolu inşasında kullanıldığında kilin kolayca borulanmasına olanak sağladığı için tehlikeli olabilir (Vural, 2012).

## **3.2 Zemin İyileştirme Yöntemleri**

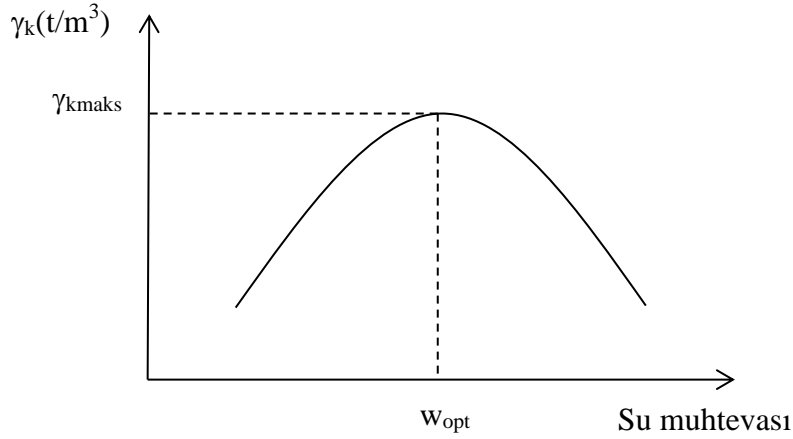
Son yıllarda gerek malzeme gerekse de makina alanında artan teknolojik gelişmeler ile zayıf zeminlerin yerinde iyileştirilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir ve bu yöntemler başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Zemin iyileştirmesinde uygun yöntemin seçimi için zeminin zayıflık teşkil eden özelliği, zeminin yapı ile ilişkisi, iyileştirme amacı ve iyileştirme mertebesi, uygulanabilirlik ve maliyet öncelikli tahkik edilmesi gereken faktörlerdir. Bu amaçla arazi ve laboratuvarında yapılan kapsamlı bir çalışma sonucunda işlevsel ve ekonomik bir iyileştirme programı yapılmalıdır (Ekinci, 2011).



Şekil 3.1. Zemin sınıflarına göre iyileştirme yöntemleri (Önalp ve Sert, 2010)

### 3.2.1 Mekanik iyileştirme

Mekanik iyileştirme, zemine dış yükler tatbik edilerek zemin içinde bulunan hava boşluklarının azaltılması ve zemini daha sıkı bir konuma getirmek amacıyla yapılan iyileştirme yöntemi olarak tanımlanır. Mekanik iyileştirme bilinen eski zemin iyileştirme yöntemi olarak da bilinir. Bu işlemde temel amaç, zemindeki boşlukların azaltılarak yük altında meydana gelebilecek yer değiştirme ve oturmaları en aza indirmektir. Bu şekilde zeminde şişme ve büzölmeler engellenerek zeminin dayanım özelliklerinin uzun yıllar boyunca korunması sağlanacaktır. Zemin yüzeyine yakın bölgelerde genellikle titreşimli veya darbeli silindirler ile yüzeysel kompaksiyon, daha derin zemin tabakalarında ise dinamik kompaksiyon, patlatma, vibro-kompaksiyon ve taş kolon yöntemleri uygulanmaktadır (Sarsılmaz, 2017). Yüzeysel kompaksiyon genellikle otoyol, havaalanı dolguları, dolgu barajlar, temel zemini ve her türlü kaba daneli zeminlerin iyileştirilmesinde uygulanan ekonomik ve etkili bir yöntemdir. Kompaksiyon uygulamalarında zeminin kuru birim hacim ağırlığının en yüksek değere ( $\gamma_{kmax}$ ) ulaşması hedeflenir ve zemin en yüksek birim hacim değerine optimum su içeriğinde ( $w_{opt}$ ) ulaşır (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2.** Kompaksiyon eğrisi (Coduto, 1999)

### 3.2.2 Hidrolik iyileştirme

Hidrolik iyileştirme, genellikle zeminden suyun uzaklaştırılması veya suyun başka bölgeye yönlendirilmesi amacıyla arazide uygulanan bir iyileştirme yöntemidir. İnce daneli zeminlerde düşey drenler yardımıyla zemine ön yükleme yapılmak suretiyle, kaba daneli zeminlerde ise kuyulardan pompa yardımıyla hidrolik iyileştirme yapılmaktadır. Palplanş ve geotekstillere hidrolik iyileştirmeye örnek olarak verilebilir.

### 3.2.3 Donatı kullanılarak iyileştirme

Çekme kuvvetine karşı zayıf olan zeminlerin, çekmeye karşı direncinin artırılması amacıyla zemin içine donatılar yerleştirilmesi ile uygulanan iyileştirme yöntemidir. Donatılar çubuk ağ veya lif şeklinde yerleştirilerek zeminin çekme dayanımı kazanması sağlanır. Zemin ankrajları, geokompozitli yapılar, fore kazıklar, zemin çivileri ve donatı kullanılarak yapılan şevler bu yöntemle örnek olarak verilebilir.

### 3.2.4 Katkı malzemeleri ile iyileştirme

Zeminlerin katkı malzemeleri ile stabilizasyonu genel olarak diğer zemin iyileştirme yöntemlerine göre daha ucuz olabilmesi nedeniyle son zamanlarda birçok alanda kullanılmaktadır. Katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonu, mekanik iyileştirmenin uygun görülmediği ya da yetersiz kaldığı durumlarda uygulanan alternatif bir yöntemdir.

Bu katkı malzemeleri arasında çok sayıda endüstriyel atık da bulunmaktadır. Endüstriyel atıkların zemin stabilizasyonunda kullanımı ile ilgili yapılan araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir. Yan ürün olarak elde edilen endüstriyel atıklar, puzolanik özellik taşıdığı zaman birçok alanda kullanılmaktadır. Bu endüstriyel atıkların zemin stabilizasyonunda değerlendirilmesiyle hem doğaya zarar vermesi engellenir, hem de problemlili zeminler iyileştirilir. Katkı malzemeleri olarak genelde kireç, çimento, uçucu kül, mermer tozu, cam tozu, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve bitüm kullanılmaktadır. Ayrıca gelişen teknolojik imkânlar ile çeşitli nano malzemelerin de zemin stabilizasyonunda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu katkı malzemelerinin uygun oranlarda zemine karıştırılması ile zayıf zeminin permeabilite, oturma, taşıma gücü ve stabilite problemlerinin giderilmesi sağlanmaktadır.

### 3.2.4.1 Kireç ile stabilizasyon

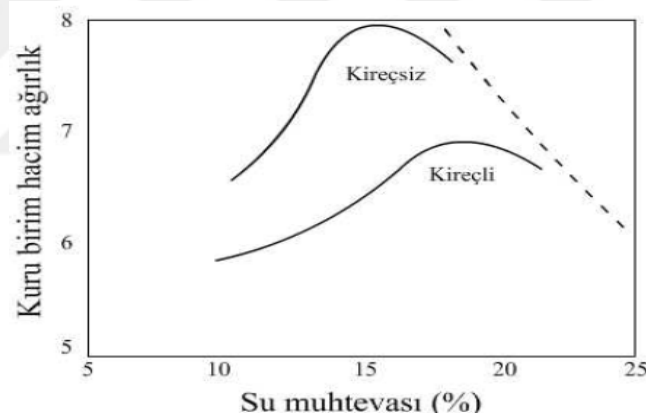
Kireç ile zemin stabilizasyonu, kil zemin ile kirecin karıştırılması ile tatbik edilen ve çok eski tarihlere dayanan bir iyileştirme yöntemidir. Kireç ile zemin stabilizasyonunda sönmüş kireç ( $\text{CaOH}_2$ , kalsiyum hidroksit) kullanılmaktadır. Sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ) ise tehlikeli ve yakıcı özelliğinden dolayı zemin stabilizasyonunda kullanılmaz. Zemin stabilizasyonunda kullanılacak kireç katkısı özellikleri Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından şartnamelerde sunulmaktadır (Çizelge 3.1).

**Çizelge 3.1.** Kirecin kimyasal ve fiziksel özellikleri (KGM, 2005)

Özellik ( TS EN 459-2)	Sönmemiş Kireç	Sönmüş Kireç
$\text{CO}_2$ (Kızdırma kaybı)<	<7%	<7%
Toplam ( $\text{CaO}+\text{MgO}$ )	>80%	>80%
$\text{SO}_3$	<2%	<2%
$\text{MgO}$	<10%	<10%
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SO}_3$	<5%	<5%
Parçalar	< 2 mm	-
TS EN 459-2 Madde. 5.2' ye göre ağırlıkça elekte kalan		0.09 mm<7 0.02 mm<2

Kireç ve kil zeminin karıştırılması ile kireç içinde bulunan  $\text{Ca}^{+2}$  ile  $\text{Mg}^{+2}$  iyonları kilin yapısında bulunan  $\text{N}^+$  veya  $\text{K}^+$  ile yer değiştirerek aralarında katyon değişimi meydana gelir. Meydana gelen bu reaksiyonlar iki şekilde gerçekleşir. İlki çok hızlı gerçekleşen

folikülasyon reaksiyonları, ikincisi ise zamana bağlı olarak gelişen puzolanik reaksiyonlardır. Kireç ile kil arasında meydana gelen katyon değişimi sonucunda kil danecikleri birbirine yaklaşarak çökeltme-yığışma meydana gelir. Bunun sonucunda kireç ile kil mineralleri arasında adezyon kuvveti oluşarak kilin yapısı değişir. Kilin mikro yapısındaki bu değişiklik ile daha büyük parçacıklar oluşur. Bu şekilde kil zemin özelliğini kaybederek tıpkı silt gibi davranış göstermeye başlar ve daha sonra sertleşmesiyle katı kıvama geçmeye başlar. Bu durumun oluşmasına neden olan faktör, kil zemine kireç ilavesi ile kilin kalsiyum iyonunu yapısına alması ve şişme özelliğini kaybetmesidir. Kireç ile yapılan stabilizasyonda zeminin mukavemet ve durabilitesi artırılır, şişme potansiyeli, şişme basıncı ve plastisite indisi azaltılır. Al (2018), yapılan çalışmalar sonucunda kireç stabilizasyonu ile zeminin kuru birim hacim ağırlığı ve plastisite indisinin azaltılarak zeminin daha boşluklu bir yapı kazandığını belirtmiştir (Şekil 3.3). Kireç ile zemin stabilizasyonu özellikle kara yolu dolgularında kullanılan etkili bir yöntemdir (Fotoğraf 3.1).



**Şekil 3.3.** Kirecin kompaksiyon parametrelerine etkisi (Taşçı, 2011)



**Fotoğraf 3.1.** Kireç ile karayolu zemin iyileştirilmesi (Al, 2018)

### **3.2.4.2 Çimento ile stabilizasyon**

Zemin stabilizasyonunda çimento, ilk olarak 1920'li yıllarda ABD eyalet karayollarının yapımı sırasında kullanılmıştır. Günümüzde artan taşıt sayıları ile oluşan yoğun trafik ile ulaşım yolları, havaalanlarının temel ve alt temellerinin iyileştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir. Bu sebeple çimentonun stabilizasyonda kullanımı kendine fazlaca uygulama alanı bulmuştur (Ünver, 2015). Çimento ile stabilizasyonda uygulanması (dağılabilmesi) mümkün olan zeminlere belirli oranlarda çimento ilave edilerek, sertleşme başlamadan önce zeminin optimum su muhtevası ile maksimum kuru birim hacim ağırlık olacak şekilde sıkıştırılması işlemidir (Yorulmaz, 2018). Zeminin ince dane miktarı ağırlıkça %40'dan az, likit limit değerinin %45-50'den daha az ve plastisite indisinin de %25'den az olması durumunda bu zemin için çimento ile stabilizasyonun etkili sonuçlar vermektedir. Stabilizasyonda genellikle portland çimentosu kullanılır. Portland çimentosunun hidrasyonu sırasında farklı bileşik ve jeller oluşur. Bu jeller zamanla kristalleşerek zemin danelerini bir arada tutmayı sağlayan rijit bir kenetlenme ağı oluşturur. Çimento stabilizasyonu sonucunda zeminin likit limit, permeabilite ve plastisite indisi azalır. Rötire limiti, kayma dayanımı, durabilite ve hacim stabilitesi ise artırılır. Ancak uygulama ile zeminlerde büzülme meydana gelebilmektedir. Bu nedenle uygulama önce ve sonrasında meydana gelebilecek etkiler göz önünde bulundurulmalıdır (Aydın, 2018).

### **3.2.4.3 Bitüm ile stabilizasyon**

Bitüm ile zemin stabilizasyonu, genel olarak karayolu yüzey kaplamalarında kullanılır. Çimento ve kireç stabilizasyonu sonucunda zeminde kayma gerilmeleri artarken, bitümle yapılan stabilizasyonda ise zeminin suyun zararlı etkilerinden korunması sağlanır. Bitüm ile stabilizasyonda, kaba daneli zeminlerin kohezyon kazanması sağlanırken, ince daneli zeminlerin ise suyun etkilenmesi engellenir. Bu etkiyle birlikte zemin danelerinin su ve rüzgâr erozyonunun da önüne geçmiş olur (Fotoğraf 3.2). Bitüm katkı malzemesi olarak genellikle %5-%10 oranlarında asfalt veya katran olarak yol kaplamalarında kullanılır.



**Fotoğraf 3.2.** Bitüm ile zemin stabilizasyonu (Aydın, 2018)

#### **3.2.4.4 Cüruf ile stabilizasyon**

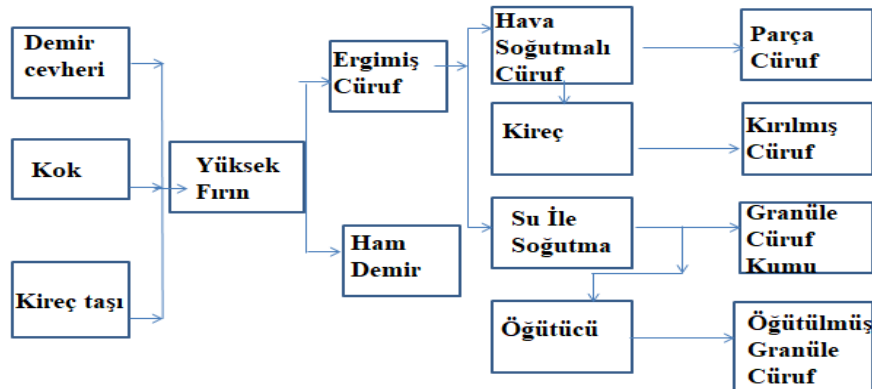
Cüruflar demir ve çelik üretimi esnasında meydana gelen endüstriyel bir yan üründür. Cüruf inşaat sektöründe beton agregası, çimento üretimi, atıl dolgu malzemesi, briket ve tuğla yapımı, yol temel ve alt temel malzemesi, ve zemin stabilizasyon malzemesi olarak birçok alanda kullanılmaktadır. Ülkemizde Sivas, Karabük, İskenderun ve Ereğli demir-çelik fabrikalarında yan ürün olarak elde edilmektedir (Kizirgil, 2001).

Kimyasal içerikleri ve özellikleri meydana geldikleri sanayi kuruluşlarının asıl üretilen ana ürün çeşidine ve elde etme yöntemine bağlı olarak birbirinden farklı özellikler gösterir. Örneğin atık olarak elde edilen yüksek fırın cürufunun kendi başına bağlayıcılık özelliği olmasına karşın, nikel ve bakır cüruflarının sadece puzolanik özelliği vardır. Puzolanik özellik gösteren malzemeler tek başına kullanıldığı zaman hidrolik bağlayıcılığı yokken, ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliğe sahip bileşikler meydana getirir (Tulumer, 2006). Cüruflar bünyesinde çoğunlukla çeşitli hafif metaller, silikatlar ( $\text{SiO}_2$ ), kireç ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ihtiva eder. Ayrıca az miktarda da olsa, yapısında demir oksit ( $\text{FeO}$ ), magnezyum oksit ( $\text{MgO}$ ) ve sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) gibi bazik oksitler de bulunur (Aydın, 2018). Çizelge 3.2' de farklı ülkelerde elde edilen yüksek fırın cüruflarının kimyasal özellikleri ve portland çimentosu ile karşılaştırılması verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri % (Kizirgil, 2001)

Bileşen	ABD	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
Kireç (CaO)	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
Silika (SiO <sub>2</sub> )	30-40	30-60	33-37	34-36	17-25
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Demir oksit (FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6
Magnezyum oksit (MgO)	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-4
Sülfür (S)	0-2	1-1.6	0.6-0.8	1-2	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-	-	1-3

Cüruflar içinde önem arz eden ve yaygın biçimde kullanılan türü yüksek fırın cüruflarıdır (YFC). YFC, yüksek fırınlarda hafif olması özelliğinden dolayı ham demirin üstünde bulunurlar. Demir filizi gangı, kok ve kireçtaşının yanması ile oluşan atıklar YFC'yi oluşturur (Şekil 3.4). YFC genelde 1400-1600 °C sıcaklık koşullarında oluşur. YFC, yavaş soğutulduğunda kristal bir yapı kazanır ve bu durumda bazalta benzer özellikler gösterir. YFC, ayrıca beton üretiminde agrega olarak kullanılabilir (Tokyay ve Erdoğan, 2002). İnce öğütülmüş haldeki YFC'nin beton içinde kullanılması ile betonun işlenebilirliği arttığı, betonun daha az su absorbe ettiği ve beton üretiminde önem arz eden terlemeyi azalttığı tespit edilmiştir (Neville, 1999). Hızlı soğutma işlemi ile de camsı yapıda cüruflar elde edilir. Bu yöntemle elde edilen cüruflar granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak isimlendirilirler ve bu cüruf bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. YFC'nin hidrolik bağlayıcılık gösterebilmesi cürufun kimyasal içeriğine, dane boyutuna ve içinde camsı yapıda bulunan madde miktarına bağlıdır (Tokyay ve Erdoğan, 2002).



**Şekil 3.4.** Demir-Çelik fabrikalarında cürufa ait akış diyagramı (Kizirgil, 2001)

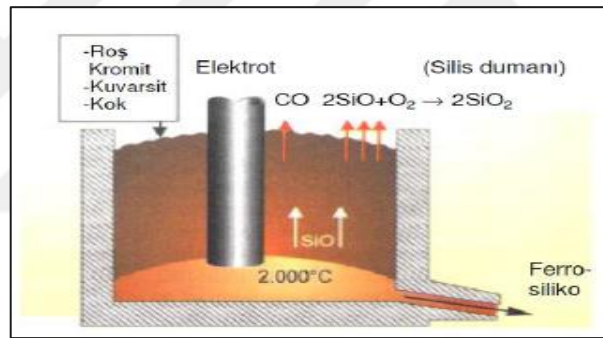
YFC içeriğindeki bir miktar silis ve alüminyum bileşeninden dolayı, granüllü cüruf olarak amorf yapıya sahip olarak elde edildiğinden, öğütüldüklerinde puzolanik özellik göstermektedir. Başka bir ifade ile kalsiyum hidroksit ve su ile bir araya geldiklerinde hidrasyon olayı sonucu bağlayıcılık özelliği gösterir. Aynı zamanda öğütülmüş durumdaki YFC, içinde bulunan kireçten dolayı kendi başına da bir miktar bağlayıcılık özelliği gösterir.

### 3.2.4.5 Uçucu kül ile stabilizasyon

Türkiye’de elektrik enerjisinin büyük bir kısmı termik santrallerden sağlanmaktadır. Elektrik üretimi için linyit kömürünün yakıldığı bu termik santrallerde, kömürün yanması sonucu meydana gelen kül danecikleri çeşitli filtreler yardımıyla tutularak hem çevreye zarar vermesi engellenir hem de farklı alanlarda değerlendirilmek üzere biriktirilir. Ülkemizde termik santrallerden elde edilen uçucu kül miktarı, 13.5 milyon/yıl civarındadır. Uçucu küllerin kimyasal içerikleri, termik santrallerde kullanılan kömürün çeşidi ve miktarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Uçucu kül alüminyum, silisyum çeşitli oksitler ve alkaliler içeren puzolanik bir malzemedir. Bu özelliği ile kil ve kireç arasındaki puzolanik reaksiyonu hızlandırmak, artırmak ve böylece zeminin dane çapını büyütme için zemine ilave edilir. Aynı zamanda kireç ve su ile etkileşime girdikten sonra hidrasyon sonucu puzolanik özelliği ortaya çıkarak, belirli bir süre sonra mukavemet artışına neden olur. Uçucu kül ASTM C618-01’e göre içinde bulunan kimyasal madde oranlarına bağlı olarak iki sınıfta incelenir. Ayrıca bu sınıflara girmeyen üçüncü bir kül çeşidi de bulunmaktadır. F tipi uçucu küller yapısında çoğunlukla bitüm bulunan kömürün yanması sonucu ortaya çıkan ve kimyasal içeriğinde  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$  şartını sağlayan uçucu kül olarak tanımlanır. F tipi uçucu kül yapısında alümina ve silis miktarı çok fazla olduğundan, çimentolaşma potansiyeli de çok düşüktür. Fakat normal ısı seviyelerinde su ve kireç ile bir araya geldiklerinde çimentolaşma özelliği oluşmaktadır. C tipi uçucu küller ise genelde linyit kömürünün yanması sonucu oluşan ve kimyasal içeriği  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$  şartını sağlayan uçucu küllerdir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küle göre yapısında daha fazla kireç bulundurduğundan kimyasal reaksiyonlar hemen meydana gelir. Uçucu kül katkısı zeminin kompaksiyonu, kıvam limitleri, kayma mukavemeti parametreleri, permabilitesi ve dinamik özellikleri üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır (Al, 2018).

### 3.2.4.6 Silis dumanı ile stabilizasyon

Silis dumanı, yüksek saflıkta kuvarsitin silisyum veya ferrosilisyum alaşımı elektrik ark fırınlarında kok kömürü ile indirgenmesi sonucu ile meydana gelen çoğunlukla gri renge sahip bir tozdur.  $\text{SiO}_2$  gazı elektrik ark fırınının düşük sıcaklığa sahip üst bölgelerinde hava ile etkileşime girerek hızlı bir şekilde okside olur. Daha sonra amorf silis şeklinde yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen hemen tamamını meydana getirir (Şekil 3.5). Toplam silis dumanı üretimi dünyada yaklaşık 1 milyon tondur. ABD’de 130.000 ton, Norveç’te 120.000 ton ve geriye kalanı diğer ülkelerde üretilmektedir. Kuzey Amerika’da 13 adet silikon, silis dumanı ve ferrosilikon üreten santral vardır. Silis dumanı, ferrokrom (FeCr), ferromanganez (FeMn), ferromagnezyum (FeMg), kalsiyum silikon gibi silikon açığa çıkaran diğer üretim şekillerinden de temin edilmektedir (Taşçı, 2011)



Şekil 3.5. Elektrik-ark fırınında silis dumanı oluşumu (Taşçı, 2011)

Silisyum fırınlarından ortaya çıkan silis dumanının yapısında en az, %89  $\text{SiO}_2$  bulunmaktadır. Alaşım fırınlarından ortaya çıkan tozlar da silis dumanı olarak isimlendirilmekle birlikte kimyasal içerikleri biraz farklı olup, silis oranları ise biraz daha düşük olabilmektedir. Dane şekli açısından genellikle küresel biçimde olan silis dumanı 0.1µm dolayında belirlenen ortalama çapları ile çimento danelerinden yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Silis dumanı çok küçük daneli olduğu ve yapısında çok fazla miktarda  $\text{SiO}_2$ ’den dolayı çok güçlü puzolanik bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı çimento sanayisinde çok fazla kullanılmaktadır. Silis dumanları doğal puzolan veya uçucu kil ile etkileşime girdiğinde, yüksek  $\text{SiO}_2$  miktarı, sabite yakın kimyasal bileşimi, çok düşük safsızlığı, camsı fazı ve oldukça yüksek inceliği sebebiyle beton üretimi esnasında uygun bir mineral katkıdır (Topçu, 2004).

### **3.2.4.7 Mermer tozu ile stabilizasyon**

Kireçtaşı veya dolomitin başkalaşıma uğraması sonucunda meydana gelen mermer, yerkürenin farklı yerlerinde bulunabilen sert ve ağır bir kayadır. Mermer tozu, bilinen en küçük dane boyutuna sahip olan mermer atıkları olarak karşımıza çıkar. Kimyasal bileşimlerinin %90-98'i  $\text{CaCO}_3$ 'ten (Kalsiyum karbonat) oluşturmaktadır. Düşük oranda  $\text{MgCO}_3$  (Magnezyum karbonat) içermektedir.  $\text{CaCO}_3$  kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral kalsittir. Aynı zamanda yapısında çok az miktarda da olsa silis, silika, feldspat, demiroksit, mika, florin ve organik maddeler de bulundurulmaktadır (Gücek, 2011). Mermer tozları, mermer işleme fabrikalarında mermer blokların veya plakaların kesilmesi esnasında ortaya çıkan ve genellikle 300 mikronun altında olan parçacıklardır. Mermer tozları, mermer kesme işlemi esnasında su kullanılması sebebiyle suyla birlikte havuzlara taşınır ve bu havuzlarda çökelerek atık sahalarına gönderilir. Bu atıklar karo, harç, sıva, mozaik, seramik, yem, beyaz çimento, kâğıt, tarım, gübre ve diğer sanayi sektörlerinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca zemin stabilizasyonunda da kullanımı ile ilgili de araştırmalar yapılmaktadır. Mermer tozu atıkları farklı sektörlerde değerlendirilmesine rağmen, büyük çoğunluğu atık olarak kalmakta ve bu atıklar atık sahalarında büyük miktarda yığınlar oluşturmaktadır. Geri dönüşümü sağlanamayan atıkların çevre için çok büyük sorunlara sebebiyet verdiği bilinmektedir. Çevre kirliliğinin önlenmesi, bu atıkların yeniden değerlendirilerek ekonomiye kazandırılması yeni kullanım alanlarının oluşturulmasına bağlıdır (Gücek, 2011). Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTAE) raporuna göre ülkemizde 5 milyar metreküp mermer rezervi bulunmaktadır ve bu mermer sahalarının %92'sinin işletmeye alınmadığı bilinmektedir. Mermer işletim tesislerinde işlenen mermerlerin %30'nun atık olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir (Yorulmaz, 2018).

### **3.2.4.8 Nano malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanımı**

Son yıllarda nano malzemelerin zemin stabilizasyonunda kullanımı ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiği zaman, nano parçacıkların zeminin taşıma gücü ve oturma gibi temel problemlerini iyileştirdiği ve zayıf zeminleri daha kararlı bir hale getirdiği görülmüştür. Bu çalışmalarda kullanılan başlıca nano malzemeler genellikle nano silika, nano kil, nano zeolit, nano alümina ve nano

MgO'dir. Çok küçük boyutlara sahip olan nano parçacıklar çok yüksek özgül yüzey alanına sahiptir. Bu nedenle zemin yapısındaki diğer parçacıklarla daha istekli bir biçimde reaksiyona girer. Bu durumda, çok az miktarda nano malzemenin bile zeminin mühendislik özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Nano malzemelerin zemine katkı olarak ilave edilmesiyle zemin mukavemetini, geçirgenliğini, sıkışabilirliğini ve yoğunluğunu büyük ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Abhisek ve Ashwani, 2017).

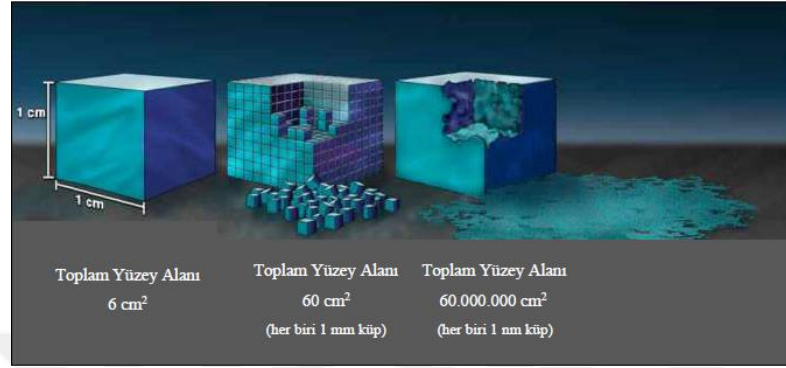
### Nano malzeme ve nano teknoloji

“Nanomalzeme” kelimesi iki kelimedenden oluşan bileşik bir kelime olup, “malzeme” kendini açıklayıcı bir terim iken, “nano”, temelde Yunanca “nanos” kelimesinden türetilen ve cüce anlamına gelen bir ön ektir. Nano aslında bir uzunluk birimi olup, metrenin milyarda biridir ( $10^{-9}m = 1nm$ ). Nano malzeme, bir boyutun uzunluğu 1-100nm aralığında değişen küçük ölçekli organik veya inorganik malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Zamiri, 2013). Uluslararası Standart Örgütü (ISO), aynı zamanda nano malzemeyi nano ölçekteki herhangi bir dış boyuta veya yüzey alanına sahip bir malzeme olarak tanımlamaktadır. Nano malzemeler seramik, metal ve kompozit malzemeler gibi farklı malzeme ürünleridir. Aynı hacim değerindeki diğer malzemelerin sergilemeyeceği özelliklere sahip olmalarından ötürü 21. yüzyılın en umut verici malzemeleri olarak kabul görmüştür (Boverhof, vd., 2015). Nanoteknoloji, nano ölçekli malzemeleri sentezlemek ve karakterize etmek için farklı yaklaşımlar kullanan yeni nesil teknolojiler olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda nanoteknoloji, nano boyutlu malzemeleri üretmek, kullanmak ve izlemek dâhil olmak üzere atomik ve moleküler boyutlu parçacıkların sentezi, görselleştirilmesi, yapılandırılması ve izlenmesi olarak da tanımlanmaktadır (CIEL Publiaction, 2014).

### Nano malzemelerin başlıca özellikleri

Nano malzemeler esasen dünyada doğal olarak var olan ve yapay yollarla elde edilmiş mühendislik nano malzemeleri olmak üzere iki çeşittir. Mühendislik nano malzemeleri, hacim özellikleri bakımından karşılaştırıldığında önemli ölçüde geliştirilmiş farklı özellikler gösterir. Nano malzemelerin temel iki özeliği vardır. Bunlar görece yüksek yüzey alanı ve kuantum etkisi hâkimiyetidir. Malzemelerin dane boyutu küçüldükçe

birim kütle başına düşen yüzey alanı artar (Şekil 3.6). Bu durumda daha fazla atomun tepkimeye girmesi anlamına gelir. Belirli bir malzemenin hacmi ile karşılaştığında daha fazla yüzey alanı, kimyasal malzemelerin harici malzemelerle kimyasal olarak etkileşime girmesi nedeniyle artan yüzey aktivitesine yol açar (Raufi, 2018).



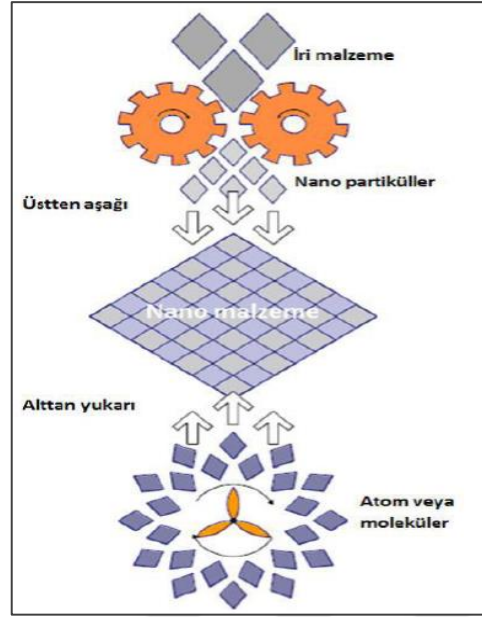
**Şekil 3.6.** Nano boyutlu malzemelerin artan yüzey alanının etkisinin illüstrasyonu (Raufi, 2018)

Nano malzemelerin büyük miktarda kuantum etkileri oldukça baskın olup, aynı zamanda benzersiz bazı özellikleri (optik, elektrik, manyetik ve diğer benzersiz özellikler) vardır. Bu nedenle nano malzemeler tıp, mühendislik, elektronik ve diğer bazı alanlarda potansiyel olarak büyük etkiye sahiptir. Nano malzemelerin fiziksel, kimyasal ve diğer mekanik özellikleri ile ilgili geniş araştırmalar yapılmaktadır (Raufi, 2018).

#### Nano malzemelerin sentezlenmesi ve işlenmesi

Nano teknolojinin amacı genel olarak, uzun ömürlü, kaliteli, hafif ve ucuz nano boyutlu malzemeler elde etmektir. Bunun için yaygın olarak bilinen iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi “*Top-Down*” (yukarıdan aşağıya) ve bir diğeri ise “*Bottom-Up*” (aşağıdan yukarıya) olarak adlandırılan yöntemlerdir.

*Top-Down* yöntemi, esas olarak hacimli malzeme küçültülerek (öğütülerek) nano boyuta getirilir. *Bottom-Up* yönteminde ise küçük atomlar, moleküller ve kümeler kimyasal işlemlerle birbirine bağlanarak istenilen özellikte nano malzeme üretilir (Şekil 3.7) (Güler, 2020).

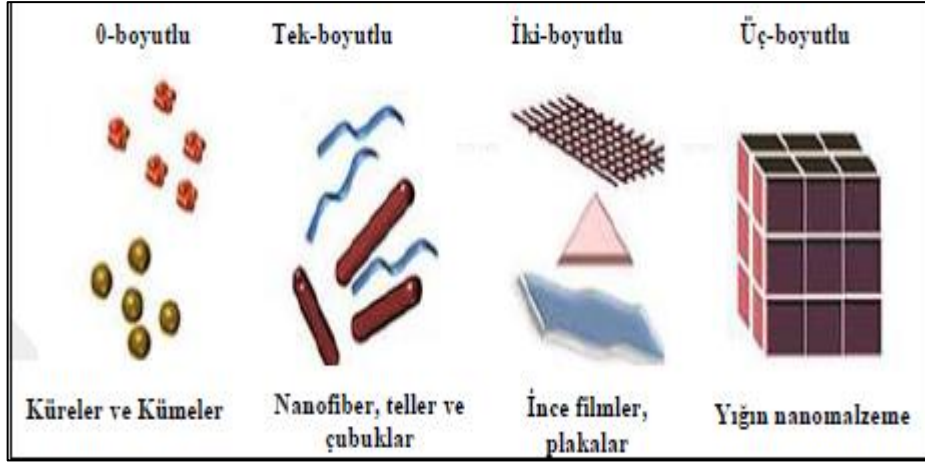


**Şekil 3.7.** Nano teknolojinin yaklaşımlarının açıklaması (Güler, 2020)

Nano parçacıkların temel özellikleri ve yapısı, genelde kullanılan deney yöntemlerine göre belirlenir. Nano malzemeler için yapay yaklaşımın tam olarak anlaşılması için malzeme özelliklerinin yeni özelliklerle üretilmesi son derece önem arz etmektedir. Bugüne kadar kimyasal buhar biriktirme, Sol-Jel, PLS, püskürtme ve mekanik öğütme gibi yöntemlerle, yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya yaklaşımlarla ilgili çeşitli teknikler uygulanmaktadır (Habıba vd., 2015).

#### Nano malzemelerin yapısal olarak sınıflandırılması

Nano malzemeler uzunluk birimi nanometre olacak şekilde sıfır boyutlu (0D), bir boyutlu (1D), iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) olarak sınıflandırılabilir (Şekil 3.8). Nano partiküller, atom salkımları şeklinde olup, doğada sıfır boyutlu olarak bulunur. Bunlara oksitler, metaller, yarı iletkenler ve fullerenler örnek olarak verilebilir. Tabakalı veya lameli nano malzemelerde, uzunluk ve genişlik, kalınlıktan daha fazladır ve bir boyutlu olarak adlandırılır. Bunlara da nano teller, nano çubuklar ve nano tüpler örnek olarak verilebilir. Telsi yapılı nano malzemler iki boyutlu olup uzunluğu, genişliği ve çapına göre daha büyüktür. 2D filmler, levhalar ve ağlar bunlara örnek olarak gösterilebilir. Kütleli nano yapı malzemeler ise kristaller olarak da adlandırılır ve bu tür nano malzemeler en sık rastlanan nano yapılarıdır. Nano kompozitler (organik, inorganik ve hibritler) örnek kütleli nano malzemelere olarak gösterilebilir (URL-1).



**Şekil 3.8.** Nano malzemelerin farklı yapısal biçimleri (Raufi, 2018)

### Nano malzemelerin karakterizasyonu

Nano malzemeler şekil, yük, boyut, kütle ve kompozisyon gibi parametrelerle mikroskopik, spektroskopik ve spektrofotometrik gibi farklı metotlarla karakterize edilirler. Nano yapıları görüntülemek, boyutları ve içerikleri ile ilgili bilgi edinmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM), ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Kütle spektrometrisi (MS) ile nano yapıların kütle ve kompozisyonları açısından tanımlamaları yapılabilmektedir. Kütle spektrometrisi, MALDIMS (Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization), ESI-MS (Electrospray Ionization), DESI-MS (Desorption Electrospray Ionization) ve IM-MS (Ion Mobility) gibi farklı analiz karakterlerinin yansısı LC-MS (Liquid Chromatography) gibi kromatografik ve spektroskopik kombinasyonlarla da özellikle protein-peptit, yağ ve karbonhidrat tabanlı nano malzemelerin kütle karakterizasyonunda önemli bir yere sahiptir. Dinamik ışık saçılımı (DLS) yöntemi de nano parçacıkların çapları ve boyut dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan standartlaşmış bir yöntemdir. Aynı zamanda özellikle 100nm'nin altındaki parçacıkların boyut, şekil ve yapısal özellikleri SAXS (Small-Angle X-Ray Scattering) analizi ile belirlenebilmektedir. XRD (X-ray Diffraction) analizi de nano parçacıkların atomik yapılarının karakterizasyonunda kullanılabilen bir tekniktir (Tarhan vd., 2010).

## BÖLÜM IV

### LİTERATÜR TARAMASI

#### 4.1 Yüksek Fırın Cürufunun Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı

Yıldırım ve Kuloğlu (1993), Ergeni bakır işletmeleri cürufunun yol üst yapısının temelinde kullanımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. 40'nolu elek altı agrega yerine cüruf kullanarak karışımlar hazırlanmış ve laboratuvar ortamında modifiye proktor deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, cürufllu temel ve alt temel karışımlarının kuru birim hacim ağırlık değerlerinde %6 civarında bir artış meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Varlıorpak vd. (1995), yol yapısı altında bulunan zayıf zeminlere demir-çelik fabrikalarından elde edilen cüruf ilave ederek zeminin mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Hazırlanan karışımlar üzerinde modifiye proktor ve CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda katkısız numunelerin %6 olan CBR değerlerinin, toplam %35 oranında katkı (%32 cüruf + %3 kireç) ilavesi ile birlikte CBR değerinin %68.5'e kadar arttığını gözlemlenmiştir.

Veith (2000), kaolen kiline farklı oranlarda kireç ve yüksek fırın cürufu ekleyerek hazırlanan numunelere serbest basınç ve şişme deneyleri yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile kaolen kilinin şişme potansiyelinde %28'e kadar bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu azalmanın nedeninin ise kireç katkısı ile oluşan hidratlar ve aktif hale gelen cürufun yarattığı çimentolaşma olarak belirtilmiştir. Çalışmada, aynı zamanda zeminin donma ve çözülme direncinde önemli artışların meydana geldiği de tespit edilmiştir.

Al-Rawas vd. (2002), araştırmacılar Kuzey Umman' dan temin edilen ve şişme potansiyeli yüksek olan kil üzerinde çimento tozu, bakır cürufu, granüller yüksek fırın cürufu ve cüruf çimentosu kullanarak killi zeminin şişme potansiyeli ve plastisite indisi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Killi zemine ağırlıkça %3, 6 ve %9 oranlarında katkı ilave edilmesi ile hazırlanan karışımlara kıvam limitleri, şişme yüzdesi ve şişme basıncı

deneyleri yapılmıştır. Ayrıca iyon değişim kapasitesi ve asitlik dengesi (PH) değerlerindeki değişimler de ölçülmüştür. Yapılan deneyler ile bakır cürufunun kullanıldığı karışımlarda şişme potansiyelinde önemli miktarda azalma görülmüş, ancak diğer karışımlarda şişme potansiyeli ve plastisitede aynı etki gözlemlenmemiştir. Ayrıca cürufun katyon değişim kapasitesinin zemin stabilizasyonunda olumlu etki gösterdiği belirlenmiştir.

Ahnberg vd. (2003), yapılan araştırmada killi zemine kireç, çimento, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ilave ederek zeminin mukavemet parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Farklı oranlarla hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun zeminin dayanım parametrelerinin artışında iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Şentürk vd. (2004), bu çalışmada yüksek fırın cürufu kullanılarak bentonit killinin stabilizasyonu amaçlanmıştır. Killin ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında cüruf katkısı ilave edilerek hazırlanan karışımlar 1, 7, 14 ve 28 gün kür süreleri sonunda kıvam limitleri, serbest basınç deneyleri ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışım içinde bulunan yüksek fırın cürufu oranı ve kür süresine bağlı olarak likit limit değerinin düştüğü, serbest basınç dayanımlarının ise arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda şişme potansiyeli yüksek olan bentonit kilinin şişme basıncının da genel olarak azaldığı tespit edilmiştir.

Bilgen ve Çapar (2007), araştırmacılar yüksek fırın cürufu ve kireç katkısının kil zeminler üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanılan düşük plastisiteli (CL) kil, Zonguldak-Devrek bölgesinden temin edilmiştir. Killi zemine farklı oranlarda kireç katkısı ile 150 mikron çapındaki elekten elenmiş cüruf eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu deney numunelerinin 0, 7 ve 28 gün kür süresi sonunda dayanım ve şekil değiştirme özelliklerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %5 cüruf ve %7.5 kireç katkısı ile hazırlanan numunenin 28 gün sonunda serbest basınç değerinde 20 kata kadar artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kırılma anında zeminde meydana gelen birim deformasyonların %11 mertebesinden % 1 mertebesine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak cüruf ve kireç katkısının düşük plastisiteli kil zeminin optimum su muhtevalarında önemli bir değişikliğe neden olmadığı, kuru birim hacim ağırlığında

azalmalar meydana getirdiği ve kompaksiyon eğrisini düzleştirdiği gözlemlenmiştir. Böylece, zeminin rijit bir yapıya dönüşüp, elastisite modülünde artışların meydana gelebileceği belirtilmiştir.

James vd. (2008), yapılan araştırmada yüksek plastisiteli (CH) bentonit kiline ait özellikleri iyileştirmek için yüksek fırın cürufu ve kireç katkıları kullanılmıştır. Çalışmada cüruf ve kireç katkısı ayrı ayrı ve farklı oranlarda bentonit kili ile karıştırılarak deney numuneleri hazırlanmış ve bu deney numuneleri 0, 7, 28, 90 ve 150 gün kür sürelerine tabi tutularak, laboratuvarında serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ağırlıkça %5 kireç ile hazırlanan deney numunesinin en kısa sürede en yüksek dayanıma ulaştığı gözlemlenmiştir. Kireç miktarı arttırılarak hazırlanan karışımlarda ise dayanımın düştüğü tespit edilmiştir. Yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışımlarda ağırlıkça %3 ve %25 aralığında oluşturulan deney numunelerinde, cüruf miktarı artıkça dayanımın arttığı tespit edilmiştir. Yapılan bu stabilizasyon mikro yapıdaki değişimlerle de açıklanmıştır.

Çapar vd. (2009), yapılan araştırmada atık olarak elde edilen yüksek fırın cürufunun kireç ile birlikte kullanılarak yol dolgusunun stabilizasyonunda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Stabilizasyonda Kocaeli ilinde bulunan Uzunçiftlik kili kullanılmıştır. Çeşitli oranlarda ve ayrı ayrı karışımlarla hazırlanan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda zeminin optimum su muhtevasında çok fazla değişimin meydana gelmediği, ancak maksimum kuru yoğunluğun azaldığı ve proktor eğrilerinde düzleşmenin olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda serbest basınç dayanımları ve CBR değerlerinde önemli derecede artışların meydana geldiği belirlenmiştir. Uzunçiftlik kilinin stabilizasyonsuz CBR değerleri yaklaşık olarak 260-280kPa değerleri arasında iken, %5 kireç ve %3.33 cüruf kullanılarak bu değerin 1500kPa olduğu görülmüştür.

Yavaşcan (2010), çalışmada İskenderun demir-çelik fabrikasından temin edilen iki farklı incelik değerinde yüksek fırın cürufu, ağırlıkça farklı oranlarda (%10, 20, 30, 50) düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) kile karıştırılarak stabilizasyondaki performansı değerlendirilmiştir. Dane birim hacim ağırlık, atterberg limitleri ve kompaksiyon parametreleri tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, CH tipi kilde

meydana gelen iyileştirmenin CL tipine göre daha iyi olduğu, fakat her iki iyileşmenin de istenilen seviyede olmadığı gözlemlenmiştir.

Bilgen (2011), problemlili zemin olarak yüksek plastisiteli (CH) bentonit kili ile düşük plastisiteli (CL) Uzunçiftlik kilinin yüksek fırın cürufu ve kireç ile stabilizasyonunu araştırmıştır. Laboratuvarında farklı oranlar ile hazırlanan 30 deney numunesine hidrometre, elek analizi, kıvam limitleri, serbest basınç, kompaksiyon, CBR, PH deneyleri ve sismik araştırmalar yapılmıştır. 0, 1, 7 ve 28 gün kür süreleri kullanılarak kür sonrasında deneylerden elde edilen parametrelerin değişimleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda CH ve CL tipi kil zeminlerde farklı stabilizasyon mertebeleri elde edilmiştir. %5 kireç ve %3.33 cüruf ile hazırlanan deney numunesi, CL tipi kilin serbest basınç dayanımını 16 kat arttırdığı, %7.5 kireç ile %3.33 cüruf ile hazırlanan numunenin ise CH kilinin serbest basınç dayanımını 10 kat arttırdığı gözlemlenmiştir. Kullanılan katkı miktarlarına göre değişmekle birlikte, kireç ve yüksek fırın cürufunun birlikte kullanılması CBR değerlerinde 20 kata kadar artışa neden olmuştur. %5 kireç ve %3.33 cüruf ile hazırlanmış CL tipi kilde yaş CBR değeri %135 olarak tespit edilmiştir. Bu değer yol alt temel malzemesi olarak kullanılacak malzemelerde istenilen CBR değerinden de fazla olduğu belirtilmiştir.

Bilge (2011), yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kireç ve zeolit kullanarak yüksek plastisiteli (CH) bentonit kilini stabilize etmiştir. Çalışmada, kile ağırlıkça %10 sabit kireç ile %5, %10 ve %15 oranlarında cüruf, kül ve zeolit eklenerek hazırlanan deney numunelerine özgül yoğunluk, kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile yüksek şişme potansiyeline sahip olan bentonit kiline katkı malzemeleri ilave edildiğinde genel olarak plastisite indisinin azaldığı ve en düşük plastisite indisi azalmasının %15 cüruf ve %15 zeolit ile sağlandığı tespit edilmiştir. Karışımların özgül yoğunluğunun saf bentonite göre daha yüksek olduğu ve en iyi sonucun %5 cüruf kullanımında olduğu görülmüştür. Karışımlar üzerinde yapılan kompaksiyon deneylerinde, maksimum kuru birim hacim ağırlığın saf bentonite göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, en yüksek kuru birim hacim ağırlık ve en düşük optimum su içeriği de %15 cüruf ile elde edilmiştir. Karışımların 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımlarının saf kile göre daha yüksek olduğu, en yüksek dayanımın da zeolit ve cüruf ile hazırlanan karışımlarda meydana geldiği görülmüştür.

Kavak vd. (2012), yapılan çalışmada düşük plastisiteli (CL) kile yüksek fırın cürufu ve kireç ilave ederek bu karışımların serbest basınç dayanımı, kompaksiyon parametreleri, atterberg limitleri ve CBR değerlerindeki değişimlerini 1, 7 ve 28 günlük kür süresi için araştırmıştır. Deneyler sonucunda, zemine ağırlıkça %5 kireç ve %3.33 cüruf kullanılarak hazırlanan karışımında, zeminin serbest basınç dayanımı, CBR değeri ve kuru birim hacim ağırlık değerinde artışların meydana geldiği ancak optimum su muhtevasında önemli bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

Fırat vd. (2016), çelikhane cürufunun zemin stabilizasyonunda kullanılması amacıyla yapılan bu çalışmada, çelikhane cürufu ve kireç oranı sabit kalmak şartıyla uçucu kül ve kaolen kili ile karıştırılıp, 7 farklı karışım üzerinde 1, 7, 28 ve 56 gün kür süresi sonunda, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile 28 gün kür süresi sonunda maksimum taşıma kapasitesine ulaşıldığı, çelikhane cürufunun yol alt tabakalarında rahatlıkla kullanılabilmesi ve atık olarak ortaya çıkan bu malzemenin zemin stabilizasyonunda değerlendirilerek ekonomiye katkı sağlanabileceği belirtilmiştir.

Saravanan vd. (2017), araştırmada zayıf dayanıma sahip ince kum ve problemlili killi bir zeminin stabilizasyonu amacıyla kireçle aktive edilen öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) kullanılmıştır. Sınıfı belirlenen zayıf zeminler ile farklı oranlarda cüruf ile hazırlanan karışımlarla kesme deneyleri, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, GGBS katkısı ile birlikte zayıf zeminin taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. % 4 GGBS oranı ile de serbest basınç dayanımı ve CBR değerlerinin en iyi sonucu elde edilmiştir.

Şentürk (2019), yüksek fırın cürufunun zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmak için zayıf kil zemin olarak kullanılan bentonite ağırlıkça %5, %10, %15 ve % 20 oranlarında cüruf ilave ederek hazırladığı deney numunelerini 1, 7, 14 ve 28 gün küre tabii tutmuştur. Bu süreler sonunda kıvam limitleri, kesme kutusu deneyleri, serbest basınç deneyleri ve şişme basıncı deneyleri yapmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda cüruf miktarı artıkça zeminin kuru birim hacim ağırlığında artış gözlenirken, optimum su muhtevasında ise azalmalar tespit edilmiştir. Cüruf miktarı artıkça likit limit değerinin azaldığı, plastik limitin arttığı ve dolayısıyla plastisite indisinde azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. En düşük likit limit değeri %15 ve %20 cüruf

kullanılarak hazırlanan deney numunelerinde tespit edilmiştir. Kesme kutusu deneyleri ile cüruf oranı artıkça içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerinde artışların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Serbest basınç deneyinde ise kür süresi ve cüruf miktarı artıkça zeminin dayanımında artışlar meydana gelmiştir. Cüruf ilave edilerek hazırlanan numunelerin şişme basıncı genel olarak saf bentonitin şişme basıncından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Yılmaz (2018), çelikhane cürufunun kaolen kili ve uçucu kül ile karıştırılarak temel veya alt temel tabakasında kullanımı ile ilgili araştırma yapmıştır. Çalışmada kaolen kil miktarı %5 oranında sabit tutularak %55, %60, %65 ve %70 oranlarında çelikhane cürufu ile %25, %30, %35 ve %40 oranlarında uçucu kül karıştırılmıştır. Bu karışımlar optimum su muhtevasında hazırlanarak 1, 7, ve 28 gün küre bırakılmıştır. Bu kür süreleri sonunda, zemin sınıflandırılması, kompaksiyon, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda numunelerin kür süresi artıkça hem serbest basınç dayanımları hem de CBR değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. CBR değerindeki en yüksek artış, %80 çelikhane cürufu ile %15 uçucu kül ile oluşturulan deney numunesinde tespit edilmiştir.

#### **4.2 Nano SiO<sub>2</sub>'nin Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı**

Gelsefidi vd. (2013), düşük plastisiteli (CL) kiline kireç ve nano-SiO<sub>2</sub> ilave ederek CBR değerlerinde meydana gelen değişimi araştırmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında kirecin tek başına etkisi araştırılmıştır. Sonraki aşamada, kireç ile stabilize edilen zeminin optimum karışımı ile nano-SiO<sub>2</sub> birlikte kullanılarak yeni karışımlar oluşturulmuş ve CBR deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan karışımların tümü 0, 3, 7, 14 ve 28 gün küre bırakılarak kür sonunda CBR deneyleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, zeminin CBR değerinde artış, maksimum kuru birim hacim değerinde azalma ve optimum su muhtevasında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Zemine %5 kireç katkısı ilave edilerek hazırlanan karışımın 28 günlük kür süresi sonunda, CBR değerinde 3 kat artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. %5 kireç katkısı sabit tutularak, %1, %3 ve %5 nano-SiO<sub>2</sub> eklenerek hazırlanan karışımlarda bu değerlerin 21 katına ulaştığı tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en optimum karışımın %5 kireç + %3 nano-SiO<sub>2</sub> olduğu belirlenmiştir.

Nohani ve Alimakan (2015), farklı oranlarda (%0.5, %1, %1.5 ve %2) nanokil kullanarak kıvam limitleri, CBR, drenajsız üç eksenli basınç ve kompaksiyon deneyleri yapmıştır. Zemine nanokil eklenmesi ile kıvam limitlerinin arttığı, drenajsız dayanım ve CBR değerlerindeki en iyi sonucun zemine %1.5 oranında nanokil eklenmesi ile elde edildiği belirtilmiştir. Ancak, nanokil oranının %1.5'dan %2'ye çıkarılması durumunda hem drenajsız dayanım hem de CBR değerlerinde azalma görülmüştür.

Malik vd. (2019), çalışmada killi zemine nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek nano malzemenin zemin dayanımına etkisi araştırılmıştır. Zeminin ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan numunelerine serbest basınç deneylerini yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda nano-SiO<sub>2</sub> miktarındaki artışla birlikte zeminin serbest basınç dayanımında da artışlar gözlemlenmiştir.

Priyadharshini ve Arumairaj (2015), farklı nanomalzemeler (nanokil, nanoMgO, nanoalümina) kullanarak standart laboratuvar deneyleri yapmış ve bu malzemelerin zemin stabilizasyonundaki etkinliğini araştırmıştır. Nanokilin artması ile kıvam limitlerinde artış gözlemlenirken, nanoMgO ve nanoalümina miktarlarındaki artışın kıvam limitlerini azalttığı tespit edilmiştir. Nanokil ve nanoalümina miktarındaki artış optimum su içeriğini arttırmış ve kuru birim hacim ağırlık değerlerini azaltmıştır. NanoMgO oranındaki artış ise optimum su içeriğini azaltarak kuru birim hacim ağırlık değerini arttırmıştır. Drenajsız dayanımda ise, %1 nanokil ile %48, %0.3 nanoMgO ile %41 ve %0.75 nanoalümina ile de %43 oranında artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak nanoMgO'in diğer iki malzemeye göre oturmaların azaltılması ve taşıma gücü değerinin artırılmasında daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Khalid vd. (2015), nanozemin kullanarak yumuşak zeminin dayanım ve kıvam limitlerindeki değişimi araştırmıştır. Yumuşak zemine %2, %3 ve %4 oranlarında nanozemin ilave edilmesinin kayma dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Ancak aynı oranlarda nanozemin ilavesinden sonra zemin plastisitesinde düşüş tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda çok az miktarlarda kullanılan nano zeminin yumuşak zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirme ve geliştirmede etkili olduğu belirtilmiştir.

Changizi ve Haddat (2016), bu çalışmada düşük plastisiteli kil zemine nano-SiO<sub>2</sub> ilave ederek mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada zemine

ağırlıkça %0.5, %0.7 ve %1 oranında nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek hazırlanan deney numunelerine kesme kutusu, serbest basınç ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda zeminin içsel sürtünme açısı, kohezyon ve serbest basınç dayanımı değerlerinde artışlar görülmüştür. Kompaksiyon deneylerine göre de zeminin kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Zeminin dayanım parametrelerindeki en büyük artış %7 nano-SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan karışımdan elde edilmiştir.

Mostafa vd. (2016), bu çalışmada karayolu alt zemin tabakasında kullanılan killi zeminin artan trafik yüklerine göre hasar görmesini önlemek için farklı katkı malzemeleri ile stabilizasyonu gerçekleştirilmiştir. Katkı malzemesi olarak kireç, silis dumanı ve nano-SiO<sub>2</sub> kullanılmıştır. Araştırmada ilk adım olarak numuneler katkılı ve katkısız olarak hazırlanmıştır. Zemine ağırlıkça %2, %4, %6 ve %8 oranlarında kireç, %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı, ve %1, %2 ve %3 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek karışımlar oluşturulmuştur. Hazırlanan karışımlar ilk olarak ayrı ayrı modifiye proktor, atterberg limitleri, serbest basınç, şişme ve CBR deneylerine tabi tutulmuştur. İkinci aşamada ise optimum karışımlar üzerinde, direk kesme deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan tüm karışımlara 7 ve 28 gün kür süreleri sonunda serbest basınç ve şişme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, zeminin optimum su içeriğinin arttığı, kuru birim hacim ağırlık ve plastisite indisinin azaldığı tespit edilmiştir. Şişme yüzdelerinin karışımlar ile azaldığı ve en düşük şişme yüzdesi %8 kireç ile %15 silis dumanı ve %8 kireç ile %3 nano-SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan karışımlarda olduğu belirlenmiştir. Serbest basınç değerindeki en yüksek artışın %8 kireç ile %10 silis dumanı ve %6 kireç ile %3 nano-SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan karışımlarında meydana geldiği tespit edilmiştir. CBR ve kesme kutusu deneylerinden elde edilen dayanımın en büyük artışı sırasıyla, %8 kireç ile %10 silis dumanı ve %6 kireç ile %3 nano-SiO<sub>2</sub> karışımlardan elde edildiği gözlemlenmiştir.

Ghasabkolaei vd. (2016), bu çalışmada düşük plastisiteli zayıf kilin geoteknik özelliklerini iyileştirmek için çimento ve nano-SiO<sub>2</sub> katkıları kullanılmıştır. Çalışmada atterberg limitleri, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Kile ağırlıkça %9 oranında çimento ile %1, %1.5 ve %3 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlara 7, 14 ve 28 gün kür süreleri sonunda serbest basınç deneyleri yapılmıştır. CBR sonuçlarına göre optimum karışım oranı %9

çimento ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> ile elde edilmiştir. Zemine çimento ve nano-SiO<sub>2</sub> ilave ederek zeminin plastisite indisinde azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, %9 çimento ile %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan deney numunesinin 28 gün kür süresi sonunda serbest basınç dayanımının %38 arttığı gözlemlenmiştir. SEM analizleri ile zeminin yapısındaki boşlukların nano-SiO<sub>2</sub> ile doldurulduğu ve zemini daha yoğun bir hale getirdiği tespit edilmiştir.

Moayed ve Rahmani (2017), bu çalışmada düşük plastisiteli (CL) kiline nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek dayanımda meydana gelen iyileştirme araştırılmıştır. Araştırmada kilin ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında nano-SiO<sub>2</sub> katkısı ile hazırlanan numunelerine serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile nano-SiO<sub>2</sub> katkısının CL tipi kiline ait serbest basınç dayanımını 1.43 katına kadar artırdığı gözlemlenmiştir.

Iswarya ve Satheeskumar (2018), bentonit kiline ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ve %0, %2 ve %4 oranlarında kireç ilave edilmesiyle zeminin serbest basınç, kompaksiyon ve kıvam limitleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışmalarda nano-SiO<sub>2</sub>'nin tek başına kullanılmasıyla zeminin plastisite indisinde artışlar meydana geldiği, ancak kirecin artan oranlarla ilave edilmesiyle plastisite indisinde azalmalar olduğu tespit etmiştir. Kompaksiyon deneyleri sonuçlarına göre yalnız nano-SiO<sub>2</sub>'nin kullanılmasıyla zeminin optimum su içeriğinde artışlar, maksimum kuru birim hacim ağırlığında ise azalmalar meydana geldiği, artan kireç oranları ile birlikte ise optimum su muhtevasında artışlar devam etmesi ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlığında da artışlar meydana geldiği tespit etmiştir. Zeminin serbest basınç dayanımlarında da artan nano-SiO<sub>2</sub> ve kireç oranlarıyla birlikte artışlar meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Ghavami vd. (2018), bu çalışmada düşük plastisiteli kil üzerine farklı oranlarda silis dumanı ve nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek zemin üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada zeminin ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ile %1, %2 ve %3 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ile hazırlanan karışımları üzerine atterberg limitleri, standart proktor, serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca zeminin mikro yapısındaki değişimleri incelemek için SEM (Taramalı elektron mikroskobu) analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, silis dumanı ve nano-SiO<sub>2</sub> katkısı ile zeminin optimum

su içeriğinin arttığı ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının azaldığı tespit edilmiştir. Başlangıçta düşük katkı oranlarıyla hazırlanan karışımlarda plastisite indisinin düştüğü, artan oranlarla ise plastisite indisinin arttığı gözlemlenmiştir. Düşük plastisiteli zemine ağırlıkça %15 silis dumanı ve %3 nano-SiO<sub>2</sub> katkıları ayrı ayrı ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların 28 günlük kür süresi sonunda yapılan serbest basınç deneyleri sonucunda, zeminin serbest basınç dayanımlarının sırasıyla %50 ve %70 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Aynı karışımların 7 günlük kür süresi sonunda yapılan CBR değerinde 2 kata kadar artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca SEM analizleri sonucunda silis dumanı ve nano-SiO<sub>2</sub> katkısının kilin yapısında bulunan gözenekleri doldurarak zemini daha boşluksuz bir hale getirdiği ve dolayısıyla zeminin sıkıştırmasında olumlu etki gösterdiği belirtilmiştir.

## BÖLÜM V

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Bu bölümde öncelikle tez kapsamında yapılan laboratuvar deney prosedürleri ardından da yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur.

#### 5.1 Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar gerekli sağlık ve güvenlik önlemleri alınarak Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarında yapılmıştır. Ayrıca, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi laboratuvarında da bir kısım analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda doğal zemin adı verilen ve stabilize edilen ince daneli zemini temsil eden zemin, Na bentonit ve kaolenin karıştırılması ile oluşturulmuş yüksek plastisiteli bir zemindir. Doğal zemin, sadece yüksek fırın cürufu (YFC) ve YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanılarak stabilize edilmiş ve çeşitli mühendislik özelliklerindeki değişimler laboratuvar deneyleri ile araştırılmıştır. Stabilizasyon çalışmalarında, doğal zemine ağırlıkça dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ve aynı YFC oranları ile birlikte ağırlıkça iki farklı oranda (%1 ve %1.5) nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmiştir (Çizelge 5.1). Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalar üç aşama özetlenerek Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

**Çizelge 5.1.** Hazırlanan doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> karışımları

Karışım No	Karışım Oranları
1	%100 Doğal zemin
2	%90 Doğal zemin +%10 YFC
3	%80 Doğal zemin +%20 YFC
4	%70 Doğal zemin +%30 YFC
5	%60 Doğal zemin +%40 YFC
6	%90 Doğal zemin +%10 YFC+%1 nano-SiO <sub>2</sub>
7	%80 Doğal zemin +%20 YFC+%1 nano-SiO <sub>2</sub>
8	%70 Doğal zemin +%30 YFC+%1 nano-SiO <sub>2</sub>
9	%60 Doğal zemin +%40 YFC+%1 nano-SiO <sub>2</sub>
10	%90 Doğal zemin +%10 YFC+%1.5 nano-SiO <sub>2</sub>
11	%80 Doğal zemin +%20 YFC+%1.5 nano-SiO <sub>2</sub>
12	%70 Doğal zemin +%30 YFC+%1.5 nano-SiO <sub>2</sub>
13	%60 Doğal zemin +%40 YFC+%1.5 nano-SiO <sub>2</sub>

## Çizelge 5.2. Deneysel çalışma aşamaları

<b>1. Aşama</b> <i>Doğal zeminin tespiti</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Yüksek plastisiteli doğal zeminin yapay olarak oluşturulması için Na bentonit ve kaolen killlerinden farklı oranlarda karışımlar hazırlanmış, bu karışımlara kıvam limitleri (likit ve plastik limit) deneyleri yapılarak özellikle plastisite değerleri değerlendirilmiştir. Yapılan araştırmalar ile yüksek plastisiteli olması istenen doğal zemin için %25 Na bentonit ve %75 kaolen kullanımının uygun olduğuna karar verilmiştir.</li></ul>
<b>2. Aşama</b> <i>Malzeme özelliklerinin tespiti</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Na bentonit, kaolen, doğal zemin, nano-SiO<sub>2</sub> ve YFC'nin kimyasal içerikleri tespiti için XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır.</li><li>• Na bentonit, kaolen, doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub>'nin X-Işınları Kırınımı (XRD) analizleri yapılarak mineral tanımlamaları yapılmıştır.</li><li>• Na bentonit, kaolen, doğal zemin, nano-SiO<sub>2</sub> ve YFC'nin özgül ağırlıkları tespit edilmiştir.</li><li>• Doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub>'nin mikro yapısını tespit etmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır.</li><li>• Doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub>'nin dane dağılımları lazer kırınım yöntemi ile tespit edilmiştir.</li></ul>
<b>3. Aşama</b> <i>Laboratuvar deneylerinin yapılması</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Doğal zemin ve doğal zemine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC ilave edilerek, ayrıca aynı YFC oranlarına %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> eklenerek hazırlanan karışımlar için TS-1900-1 standardına uygun olarak kıvam limitleri deneyleri yapılmıştır.</li><li>• Yukarıda bahsi geçen tüm karışımlar için ASTM D-698 standardına uygun olarak standart proktor deneyleri yapılmış, karışımların optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri tespit edilmiştir.</li><li>• Proktor deneyleri ile tespit edilen optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre hazırlanan tüm karışımlar için ASTM D 2435-96 standardına uygun olarak konsolidasyon ve şişme deneyleri yapılmıştır.</li></ul>

### 5.1.1 Özgül ağırlıkların belirlenmesi

Özgül ağırlık, dane birim hacim ağırlığının ( $\gamma_s$ ), suyun birim hacim ağırlığına ( $\gamma_w$ ) oranıdır. Özgül ağırlık deneyleri laboratuvarında TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Piknometre deney sonuçları ve teorik formüllerle elde edilen, dane birim hacim ağırlık, kuru birim hacim ağırlık, doymuş birim hacim ağırlık porozite, boşluk oranı, suya doygunluk derecesi gibi parametreler zeminin indeks özellikleridir. Bu parametreler geoteknik hesaplamalarda yaygın olarak kullanılır. Zemin numunesinin dane birim hacim ağırlığı zemin cinsine göre değişkenlik gösterir. TS 1900-1'göre yapılan piknometre deneyi aşağıda özetlenmiştir.

Deney için etüvde kurutulmuş zeminden küçük bir miktar alınıp tartılır ( $W_1$ ). 50 ml'lik ölçekli bir piknometre şişesi içerisine damıtık su konularak tartılır ( $W_2$ ). Zemin piknometre şişesinin içerisine kayıpsız bir şekilde konulup numune içindeki havanın dışarı çıkarılması için vakum uygulanır. Kabın geri kalan kısmı da tamamen damıtık su

ile doldurularak tekrar tartılır ( $W_3$ ). Dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s = W_1 / (W_1 - W_3 + W_2)$  eşitliği ile hesaplanır. Bu işlemler en az iki kez tekrarlanıp ortalaması alınır.

### 5.1.2 Su muhtevasının belirlenmesi

Bu deney, zemin örneklerinin su muhtevasının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Su muhtevası ince daneli zeminlerin en önemli parametrelerinden biridir. Zemin laboratuvar deneylerinde en çok kullanılan ve belirlenmesi en kolay olan su muhtevası, bir zemin örneğinin içerdiği su ağırlığının aynı örneğin kuru ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Su muhtevası deneyleri TS 1900-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Zemin numunesinin konulacağı temiz ve kuru kabın ağırlığı 0,01 g hassasiyetindeki terazi ile tartılır ( $W_1$ ). Kabın içine su muhtevası belirlenecek yaş numuneden bir miktar alınıp kap ile birlikte 0,01 g hassasiyetindeki terazi ile tartılır ( $W_2$ ). Numune kapla birlikte sıcaklığı  $105 \pm 5$  °C olan etüvde 24 saat bekletildikten sonra tekrar tartılır ( $W_3$ ). Su muhtevası  $W_2 - W_3 / (W_3 - W_1)$  eşitliği yardımıyla hesaplanır.

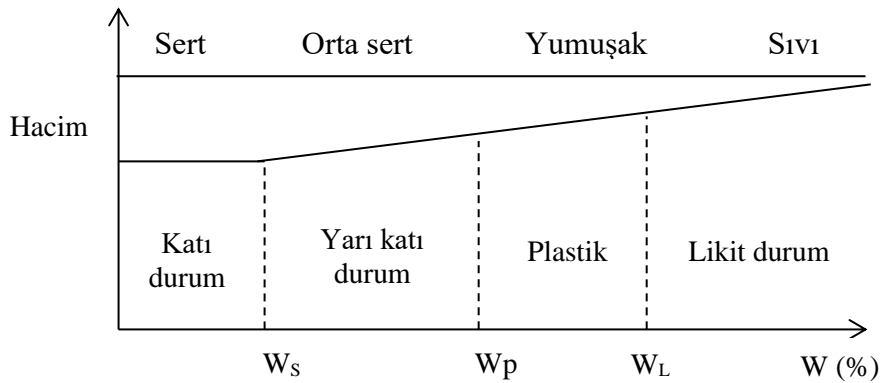
### 5.1.3 Kıvam limitleri deneyleri

İnce daneli zeminlerin dane dağılım eğrileri birbirine çok benzer olmasına rağmen mühendislik açısından çok farklı özellikler gösterebilir. Bu farklılıkların ortaya çıkmasında en önemli etkenlerden biri de su muhtevasında meydana gelen değişimler ile açıklanabilir. Bu nedenden dolayı ince daneli zeminlerin ikincil bir alt sınıflandırmaya ihtiyacı vardır (Kip ve Kumbasar, 1984 ). İnce daneli zeminlerde kıvam, zeminlerin sertlik-yumuşaklık gibi durumları belirlemektedir. İnce daneli zeminlerin yumuşak, orta sert, sert gibi adları alması içerdiği su muhtevaları ile açıklanabilmektedir. Genel olarak ince daneli zeminler su ile birlikte yoğrulduğunda, plastik bir malzeme gibi davranış gösterirler. Plastik özellik veya plastisite aralığı olarak tanımlanan bu durum zeminin şekil verebilme aralığını temsil eder (Uzuner, 1998). Killi bir zemine su ilave edilerek katı durumdan yarı katı duruma, plastik duruma veya likit duruma geçmesi sağlanabilir. Zeminde meydana gelen bu durumla birlikte zeminin, mühendislik özellikleri de değişmektedir. (Özaydın, 1989). Zemin katı durumdayken istenilen şekil verilemez ve zeminde çoğunlukla kırılmalar meydana gelir. Yarı katı

durumda zemine çok zor şekil verilir ve zeminde çatlaklar gözlemlenir. Plastik durumda zemine istenildiği gibi şekil verilebilir ve herhangi bir çatlama veya kırılma meydana gelmez. Likit durumda ise zemin tıpkı bir sıvı gibi akışkan bir özellik gösterir. İsveçli araştırmacı Atterberg (1911) bu durumları birbirinden ayırıp, “kıvam limitlerini (Atterberg limitleri)” tanımlamıştır (Çizelge 5.3). Atterberg limitleri ince daneli zeminin kıvamları ile birlikte dayanımı ile ilgili bilgiler de vermektedir (Ansal, 1998). Ayrıca, Şekil 5.1’de ince daneli zeminlerin hacminde meydana gelen değişimler ile kıvam limitleri arasındaki ilişkisi görülmektedir.

**Çizelge 5.3.** Atterberg ve zemin fazları (Head, 1992)

Kıvam	Katı	Yarı katı	Plastik	Akıcı	Süspansiyon
Su	Su muhtevası azalır				
Limitler	Katı durum Rötire limiti	Plastik limit	Likit limit	Plastisite indisi	
Rötire (Büzülme)	Sabit hacim	Hacim azalır			
Durum	Katıdan serte	Yoğrulabilir	Yapışkan	Çamur	Su süspansiyonu
Kayma mukavemeti	Kayma mukavemeti artar				İhmal edilebilir
Su muhtevası	0	$W_S$	$W_P$	$W_L$	

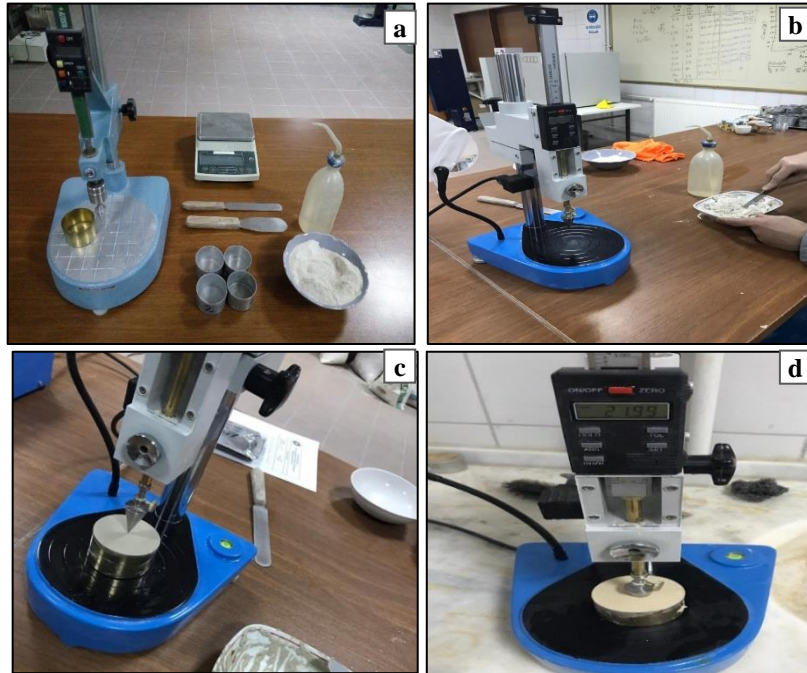


**Şekil 5.1.** İnce daneli zeminlerde hacim-su muhtevası arasındaki ilişki (Uzuner, 1988).

### Likit limit deneyi

Likit limit deneyi laboratuvarda TS 1900-1 standardına uygun olarak düşen koni yöntemiyle yapılmıştır (Fotoğraf 5.1.a). Yapılan deney prosedürü aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Deney için hazırlanan zemin numunesi 40 nolu (0.475 mm) elekten geçirildikten sonra sıcaklığı  $105\pm 5$  °C olan etüvde 24 saat bekletilir. Etüvden alınan numuneden 200 gr alınarak karıştırma kabında üzerine damıtık su ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılır (Fotoğraf 5.1.b). Hazırlanan homojen karışım düşen koni deney kabına içerisinde boşluk kalmayacak şekilde doldurularak deney aletine yerleştirilir (Fotoğraf 5.2.c). Düşen koni deney aletine yerleştirilen numune üzerine 80 gr ağırlığında olan konik uç düşürülerek 5 saniye beklenilir (Fotoğraf 5.1.d). Daha sonra sayaçtan batma miktarına bakılarak deney föyüne batma miktarı mm cinsinden yazılır. Deneyi tamamlanan karışımdan su içeriğini tespit etmek için numune alınır. Karıştırma kabında bulunan numune üzerine her seferinde biraz daha su ilave edilerek bu işlem 4 defa tekrarlanır. Deneyler sonucunda, düşeyde su muhtevaları yatayda batma miktarları olacak şekilde grafik üzerine yerleştirilerek batma miktarı 20 mm denk gelen su muhtevası likit limit ( $w_L$ ) olarak belirlenir.



**Fotoğraf 5.1.** Likit limit deney aşamaları

## Plastik limit deneyi

Plastik limit deneyleri TS 1900-1 standardına uygun olarak laboratuvarında yapılmıştır (Fotoğraf 5.2). Yapılan deney prosedürü aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Likit limit deneyi için hazırlanan numuneden bir miktar alınarak avuç ile cam plak veya mermer üzerinde rulo haline getirilir. Zemin numunesi 3mm çapına sahip olduğu anda çatlamlar meydana gelene kadar avuç içi ile yuvarlanır. Zemin numuneleri 3mm çapında olduğu anda çatlamlar gözlemlenirse, numuneler alınarak su içeriği tespit edilir. Bu deneyler 3 veya 4 defa tekrarlanıp hesaplanan su içeriği değerlerinin ortalaması alınarak plastik limit belirlenmiş olur.



**Fotoğraf 5.2.** Plastik limit deney numunesi

### **5.1.4 Standart proktor deneyi**

Kompaksiyon (sıkıştırma), genel bir tanım olarak zeminin yapısında bulunan danelerin birbirine yaklaştırılması ile birlikte zemin içinde bulunan boşluk miktarının azaltılması olarak tanımlanabilir. Sıkışmanın sağlanabilmesi ve buna bağlı olarak danelerin birbirine yaklaşabilmesi, danelerin birbirine göre hareket etmeleri ile mümkün olabilmektedir. Danelerin gösterdiği bu hareket potansiyelleri de zeminin içerisinde bulunan su miktarı ve maruz kaldığı yüke bağlı olarak değişiklik gösterir. Zemin içinde bulunan su miktarı kompaksiyon üzerinde büyük öneme sahiptir. Eğer zemin içerisinde bulunan su miktarı çok fazla miktarda ise danelerin birbirine yaklaşması zorlaşır ve buna bağlı olarak kompaksiyon işlemi de zorlaşır. Zeminin su muhtevası artıkça içinde bulunan havanın dışarı çıkması engellenir. Suyu doymuş bir zemin sıkışmaya maruz bırakılırsa, zeminin boşluk suyu basıncında meydana gelecek artışlar

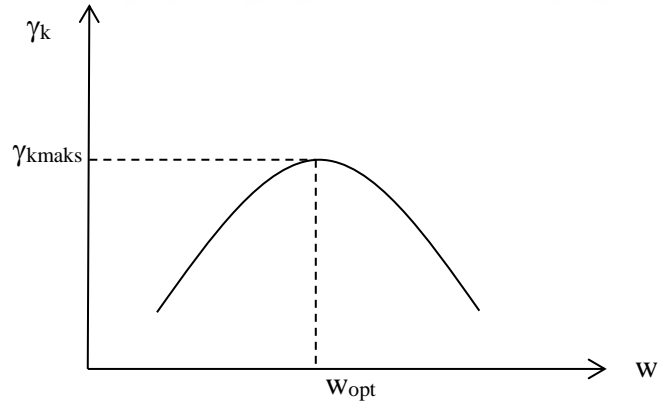
sebebiyle kompaksiyon yapılamaz. Zemin yapısında yeterli miktarda su bulunmuyorsa zemin daneleri arasında sürtünme ve kapiler gerilmeler artarak zeminde elektriksel çekim kuvvetleri meydana gelir. Zemin içinde yeterli miktarda su bulunuyorsa, zemin daneleri arasında sürtünme ve kapiler gerilmeler azalarak, elektriksel itki kuvvetleri meydana gelir. Zeminin daha kolay ve daha az enerji ile sıkıştırılması için optimum miktarda su muhtevası ile sıkıştırılması gerekir (Özaydın, 1989). Kompaksiyon uygulanan zeminde, kompaksiyon derecesi o zemine ait kuru birim hacim ağırlığıdır. Kuru birim hacim ağırlık ne kadar fazla ise zemin o kadar iyi sıkışmıştır.

Bu çalışmada, ASTM D-698 standartlarına uygun olarak standart proktor deneyleri yapılmıştır (Fotoğraf 5.3). Deneylerden tüm karışımlar için kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerleri tespit edilmiştir. Kompaksiyon deneyleri esas olarak iki farklı amaç için yapılmıştır. İlk olarak stabilizasyonun sıkışma üzerindeki etkisi araştırmak, ikinci olarak da yapılacak konsolidasyon deneyleri için karışımların  $\gamma_k$  ve  $w_{opt}$  değerlerini tespit etmektedir. Yapılan proktor deneylerinin prosedürü aşağıda kısaca anlatılmıştır.

40 nolu elekten geçirilen zemin numunesinden bir miktar alınarak karıştırma kabı içine alınır. Üzerine bir miktar su ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılır. Numune proktor molduna eşit 3 tabaka halinde ve her tabakaya 25 vuruş olacak şekilde sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemleri sonrasında numunenin doğal birim hacim ağırlığı ve su içeriğinin tespiti yapılarak  $\gamma_k$  değerine geçilir. Deney tamamlandıktan sonra kullanılan aynı malzemeye artan su muhtevaları ve aynı sıkıştırma prosedürü kullanarak deney beş kez daha tekrarlanır. Elde edilen su muhtevası ve birim hacim ağırlık değerlerinden eğri çizilerek  $\gamma_k$  ve  $w_{opt}$  değerleri tespit edilir. (Şekil 5.2)



**Fotoğraf 5.3.** Standart proktor deney aşamaları



**Şekil 5.2.** Standart proktor deneyi sıkışma eğrisi

### 5.1.5 Konsolidasyon deneyi

Zeminlerde üzerine uygulanan gerilmelere bağlı olarak oturmalar meydana gelir. Bu gerilmelerde meydana gelebilecek azalma durumunda ise zeminin su içeriğine bağlı olarak şişmeler meydana gelebilmektedir. Oturma ve şişme problemlerinden dolayı da yapının taşıyıcı sistemi etkilenip hasar görebilir. Zeminle ilgili projeler tasarım

aşamasında iken zeminin oturma ve şişme özelliklerinden kaynaklı oluşacak kitlesel hacim değişiklikleri, en önemli faktörler arasında yer alır. Bu nedenden dolayı zeminde meydana gelebilecek oturma ve şişme miktarları, zemin mekaniği için büyük bir öneme sahiptir (Yılmaz ve Çelik, 2012). Zemin içindeki boşluklarda yer alan su (boşluk suyu), ince daneli zeminlerde geçirimsizliğin az olmasında dolayı yüklenme sonucu hemen drene olamaz. Bu durum boşluk suyu basıncının artmasına yol açar. Artan boşluk suyu basınçları dolayısı ile zeminde bir su akımı meydana gelir ve boşluk suyu zamanla drene olur. Bu olaya konsolidasyon adı verilmektedir.

Bu çalışmada, konsolidasyon deneyleri ASTM D 2435-96 standartlarına uygun olarak yapılmıştır (Fotoğraf 5.4). Yapılan konsolidasyon deneylerinin prosedürü aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Konsolidasyon deney numuneleri önceki bölümde de bahsedildiği gibi her bir karışım için yapılan proctor deneyleri ile tespit edilmiş yoğunluk ve su içeriğine uygun olarak hazırlanmıştır. Proktor moldunda hazırlanan numune, standart konsolidasyon ringine numune çıkarıcı cihaz yardımıyla yerleştirilir. Dikkatli bir şekilde ringe aktarılan numune konsolidasyon hücresine yerleştirilerek deney başlatılır. Deney başladıktan sonra ilk 24 saat içinde ve sonunda standartta yer alan sürelerde okumalar yapılarak deney tamamlanır (Fotoğraf 5.5). Bu tez çalışmasında konsolidasyon için beş yüklenme iki boşaltma yapılmıştır.



**Fotoğraf 5.4.** Konsolidasyon deney aletleri



**Fotoğraf 5.5.** Konsolidasyon deney numunesinin hazırlanması

### 5.1.6 Şişme yüzdesi deneyleri

Şişme potansiyeli zeminin şişme yeteneği olarak ifade edilen bir kavramdır. Ayrıca bu kavram, zeminin su içeriği ve gerilme koşullarındaki değişimler sonucu meydana gelen hacimsel artışları ifade eder. Şişme potansiyeli, genel olarak zeminin hem şişme yüzdesi hem de şişme basıncını ifade eden bir terim olarak kullanılmaktadır (Sıridharan vd., 1986). Şişme potansiyelinin belirlenmesi için birçok yöntem olmasına rağmen, bu yöntemler uluslararası düzeyde farklılıklar göstermektedir. Bu durum, farklı değerlendirmelere ve hatalara sebep olabilmektedir. Şişme potansiyeli belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan iki farklı yöntem vardır. Bunlardan ilki, zeminin özelliklerine (birim hacim ağırlık, kıvam limitleri, kolloid içerikleri vb.) bağlı bir yöntem olup, yöntemde zemin parametreleri ile çeşitli korelasyonlar kurularak zeminin şişme potansiyeli, çok yüksek, yüksek, orta yüksek ve düşük olarak tanımlanmaktadır. İkinci yöntemde ise, ödometre deneyi kullanılarak zeminin tek eksenli şişme miktarları hesaplanır (Demir ve Kılıç, 2010). Ödometre deneyi, örselenmemiş zemin numuneleri veya herhangi bir başlangıç koşulunda sıkıştırılarak hazırlanan numuneler için

yapılabilir. Suya doymun koşullarda gerçekleştirilen deneylerde, suda bekletilen numunelerde tespit edilen hacim artışının numunenin başlangıç hacmine bölünmesi ile tespit edilir. Zeminde meydana gelen şişme miktarı, kilin mineral yapısı ve kimyasal özeliklerine bağlı olmakla birlikte zeminin dane dağılımı, başlangıç su içeriği ve zeminin maruz kalacağı gerilmelere bağlı olarak değişim göstermektedir. şişme potansiyeli, zeminin plastisite özelikleri ile ilişkili olup, plastisite değeri ne kadar fazla ise zeminin şişme potansiyeli de o kadar yüksek olur. (Mitchell, 1976).

Bu tez çalışması kapsamında şişme yüzdesinin belirlenmesi için ikinci yöntem olan ödometre deney yöntemi kullanılmıştır. Yapılan şişme yüzdesi deneylerinin prosedri aşağıda kısaca anlatılmıştır.

şişme yüzdesi hesaplanacak deney numuneleri, konsolidasyon deney numuneleri gibi her bir karışım için proktor deneyleri ile tespit edilmiş yoğunluk ve su içeriğine uygun olarak hazırlanmıştır. Suya doymun koşullarda hücre içine yerleştirilen numunenin serbest şişmesine izin verilerek meydana gelen hacimsel değişiklik belirli aralıklarla llmüştr. Bu lmler değişim bitene kadar alınmaya devam edilerek şişme yüzdesi hesaplanır.

### 5.1.7 Su ve nano SiO<sub>2</sub> solüsyonunun hazırlanması

Nano-SiO<sub>2</sub> zemine ilave edilmeden önce kullanılan ağırlık oranlarında (%1 ve %1.5) su ile solüsyon hazırlanmıştır. Bu işlem ultrasonik banyo ile gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 5.6). Bu şekilde nano malzemenin zemin ile homojen olarak karıştırılması kolaylaşmıştır.



**Fotoğraf 5.6.** Ultrasonik banyo

## 5.2 Deneysel Sonuçlar

### 5.2.1 Deneyde kullanılan malzemelerin zellikleri

Deneylerde kullanılan ve doğal zemin olarak adlandırılan zemin, iki farklı öğütülmüş haldeki malzemenin karışımı şeklinde yapay olarak oluşturulan yüksek plastisiteli bir zemindir. Bu karışım ağırlıkça %25 Na bentonit ve %75 kaolenden oluşmaktadır. Na bentonit, kaolen ve yüksek fırın cürufu (YFC) ve nano-SiO<sub>2</sub> ticari firmalardan temin edilmiştir (Fotoğraf 5.7).



**Fotoğraf 5.7.** Deney malzemeleri; Na bentonit (a), kaolen (b), doğal zemin (c), YFC (d) ve nano-SiO<sub>2</sub> (e)

Deneyde kullanılan tüm malzemelerin kimyasal, fiziksel ve bazı endeks özelliklerinin tespiti için Niğde Ömer Halisdemir niversitesi merkezi laboratuvarında ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnaaat Mühendisliği Geoteknik laboratuvarında deneyler yürütülmüş, tespit edilen malzeme özellikleri farklı başlıklar altında aşağıda sunulmuştur.

### Doğal zemin ve yüksek fırın cürufunun kimyasal özellikleri

Na bentonit, kaolen, doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriğinin tespiti için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi merkezi laboratuvarında XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.4 de verilmiştir.

**Çizelge 5.4.** Na bentonit, kaolen, doğal zemin ve YFC'nin kimyasal içeriği

	Na bentonit	Kaolen	Doğal zemin	YFC
	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO <sub>2</sub>	64.704	80.612	77.186	36.824
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.764	15.530	15.928	13.314
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.892	0.624	1.646	0.727
CaO	4.299	1.837	2.504	38.834
MgO	2.221	0.305	0.715	5.648
K <sub>2</sub> O	1.362	0.390	0.647	0.777
TiO <sub>2</sub>	0.444	0.292	0.337	0.761
SO <sub>3</sub>	0.047	0.155	0.142	0.562
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.125	0.004	0.039	1.87
Na <sub>2</sub> O	2.764	0.060	0.616	-
ZnO	-	-	-	0.001
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0.005
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0.018
BaO	0.088	0.078	0.084	0.650
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.187	0.085	0.111	0.009
SrO	0.103	0.028	0.045	-

### Nano-SiO<sub>2</sub>'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Nano-SiO<sub>2</sub> de ticari bir firmadan temin edilmiş olup kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6'de sunulmuştur.

**Çizelge 5.5.** Nano-SiO<sub>2</sub>'nin kimyasal içeriği

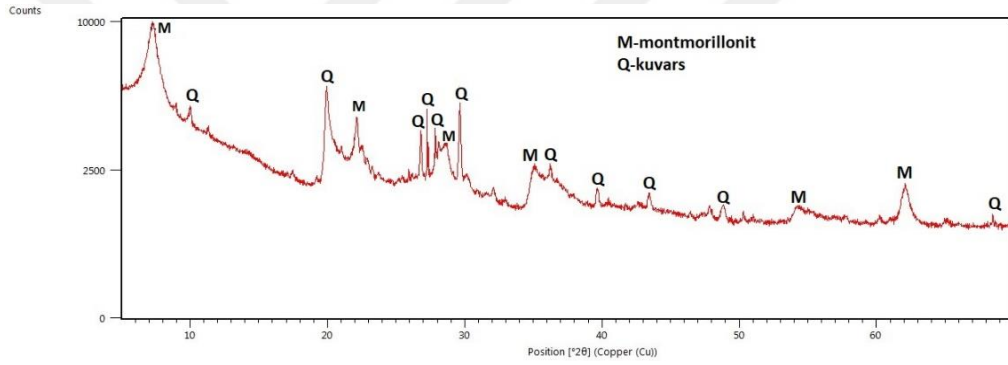
	(%)
Si	>97
Fe	0.002
Ca	0.007
Ti	0.012
Na	0.003
Diğer	<0.01

**Çizelge 5.6.** Nano-SiO<sub>2</sub>'nin fiziksel özellikleri

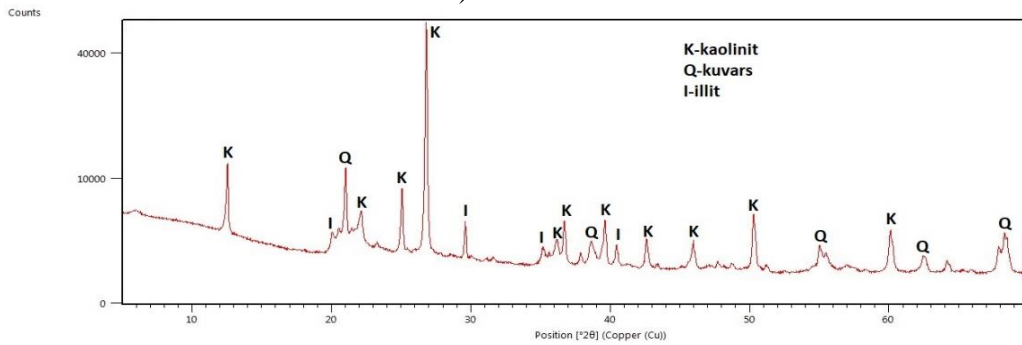
Nano Türü	Silikon Dioksit (SiO <sub>2</sub> )
Saflık (%)	99.5
Renk	Beyaz
Kitle yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	<0.1
Gerçek yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.2
Dane boyutu (nm)	28
Özgül yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	150-550

X-Işınları Kırınımı (XRD) analizleri sonuçları

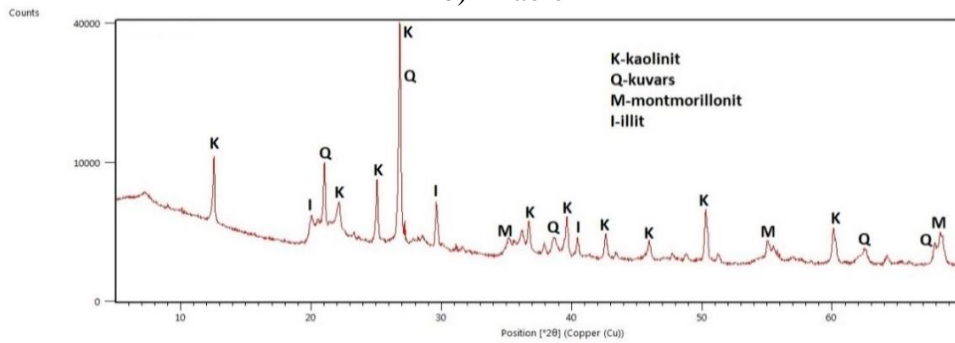
Na bentonit, kaolen, doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub>'nin için X-Işınları Kırınımı (XRD) analizleri yapılarak ayrıca mineral tanımlamaları yapılmıştır (Şekil 5.3).



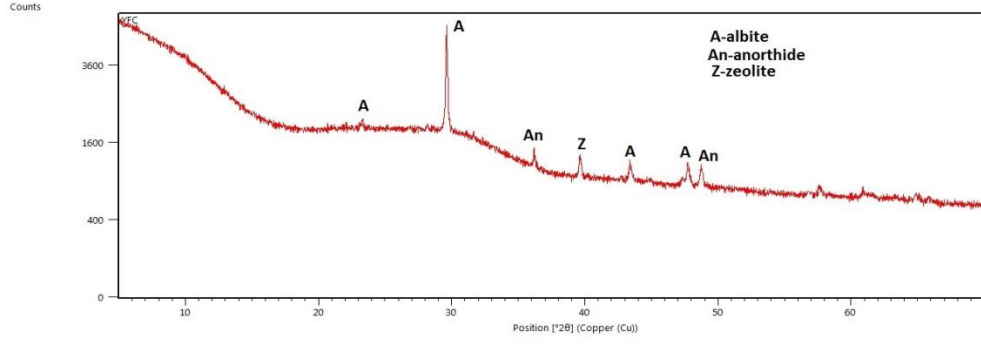
a) Na bentonit



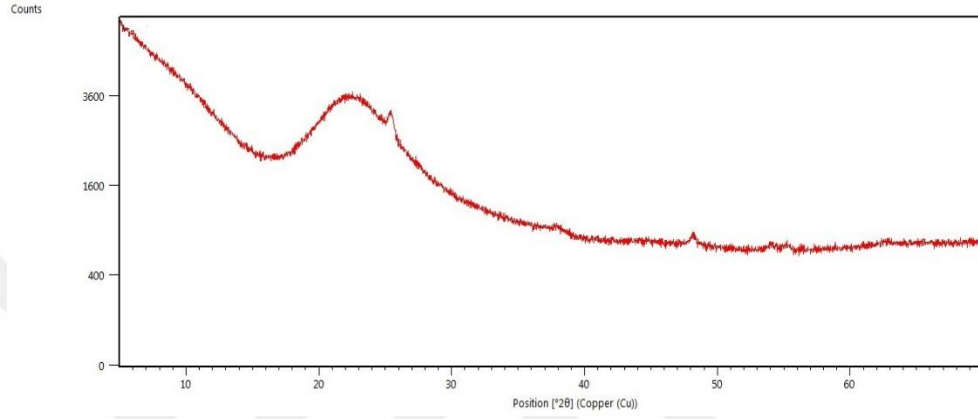
b) Kaolen



c) Doğal zemin



d) YFC



e) Nano- SiO<sub>2</sub>

**Şekil 5.3.** XRD analiz sonuçları; Na bentonit (a), kaolen (b), doğal zemin (c), YFC (d) ve nano-SiO<sub>2</sub> (e)

### Malzeme yoğunlukları

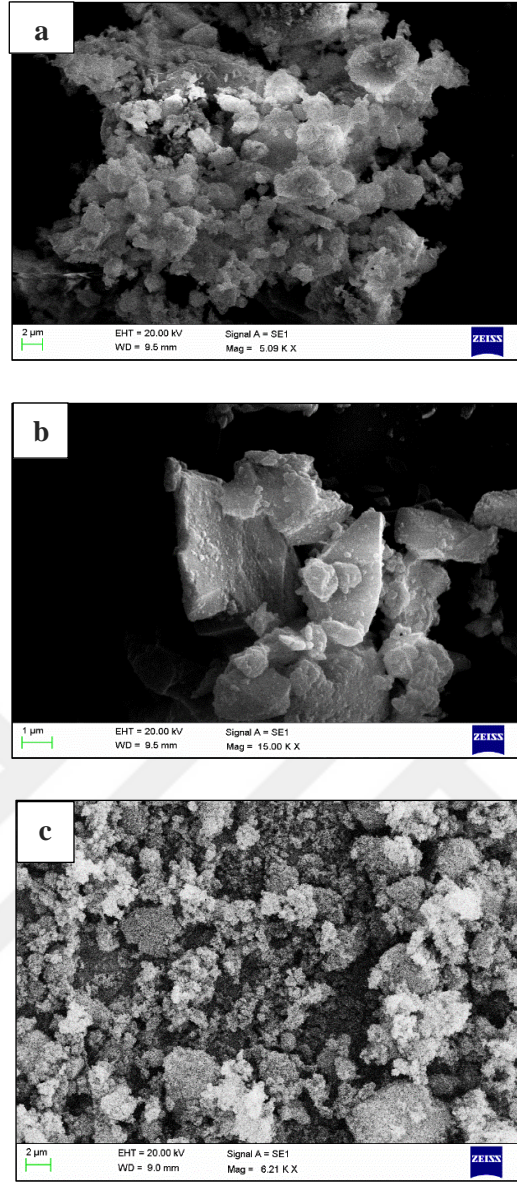
Laboratuvarda yapılan piknometre deneyleri ile elde edilen yoğunluk değerleri Çizelge 5.7’te verilmektedir. Ayrıca YFC’nin özgül ağırlık değeri 2.85 olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 5.7.** Malzeme yoğunluk değerleri

$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	
Malzeme	kN/m <sup>3</sup>
Na bentonit	23.93
Kaolen	25.33
Doğal zemin	25.18

### SEM görüntüleri sonuçları

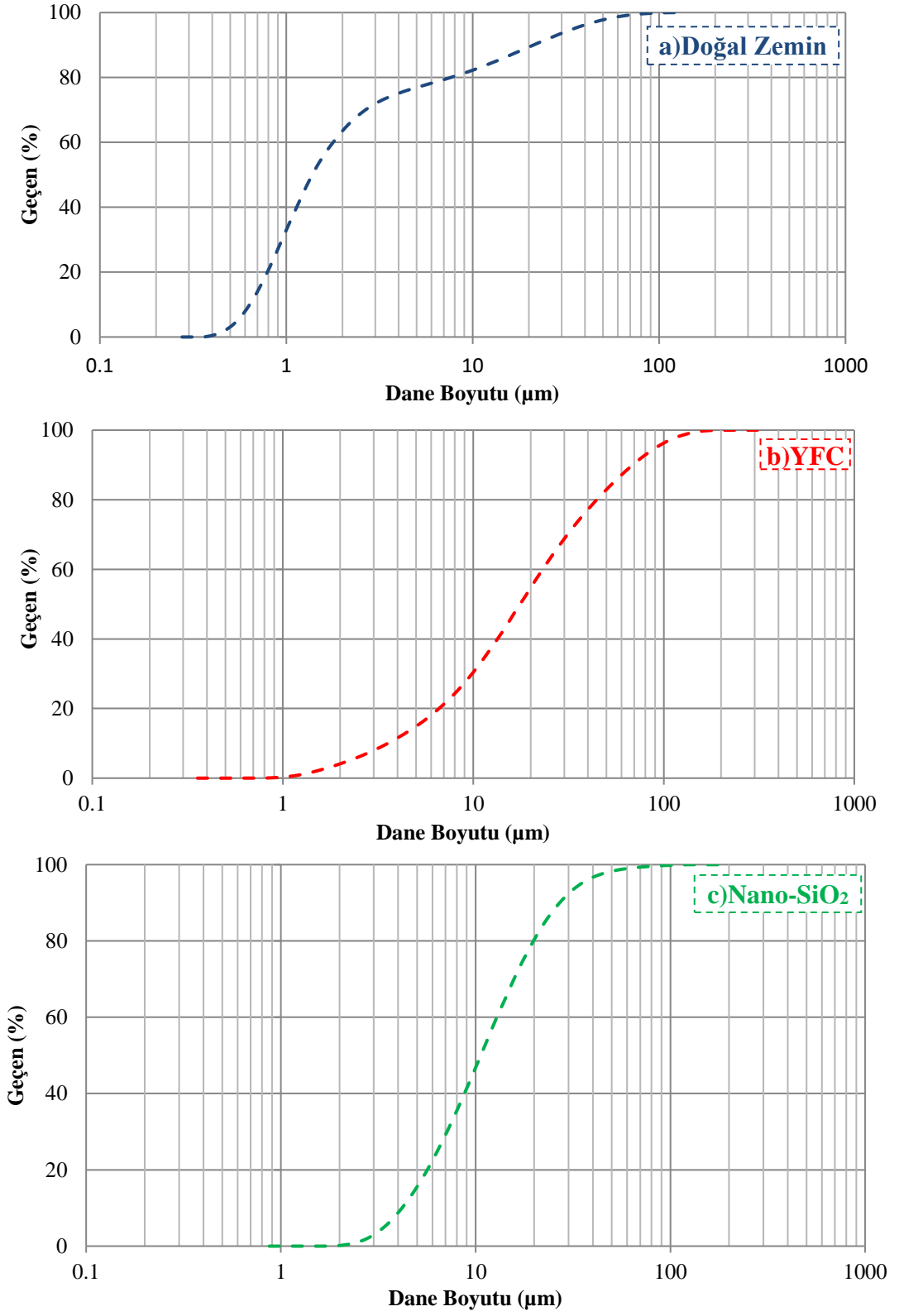
Deneylerde kullanılan doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub>’nin mikro yapısını tespit etmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. (Şekil 5.4)



**Şekil 5.4.** SEM Görüntüleri; doğal zemin (a), YFC (b) ve nano-SiO<sub>2</sub> (c)

### Malzemelerin Dane Dağılımının Tespiti

Doğal zemin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub>'nin dane dağılımlarının tespiti için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi merkezi laboratuvarında lazer kırınım yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen dane dağılım eğrileri Şekil 5.5'te verilmiştir.



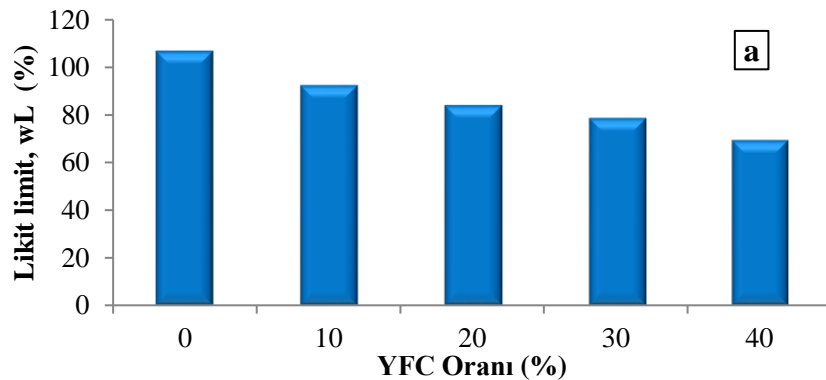
Şekil 5.5. Deney dane dağılım eğrileri; doğal zemin (a), YFC (b) ve nano-SiO<sub>2</sub> (c)

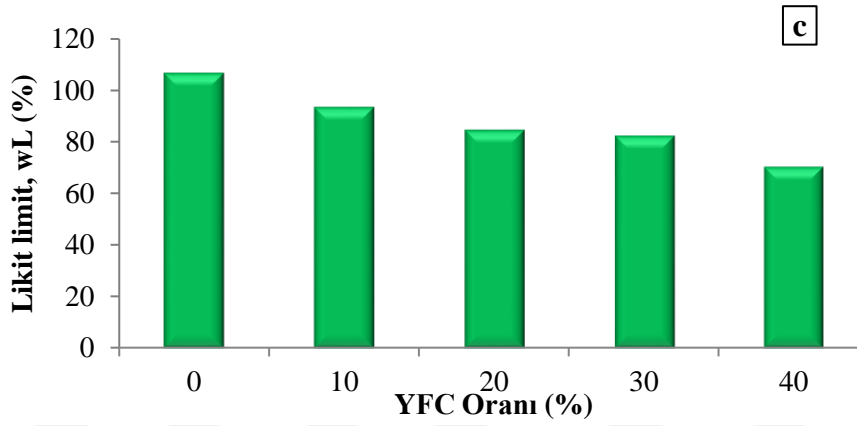
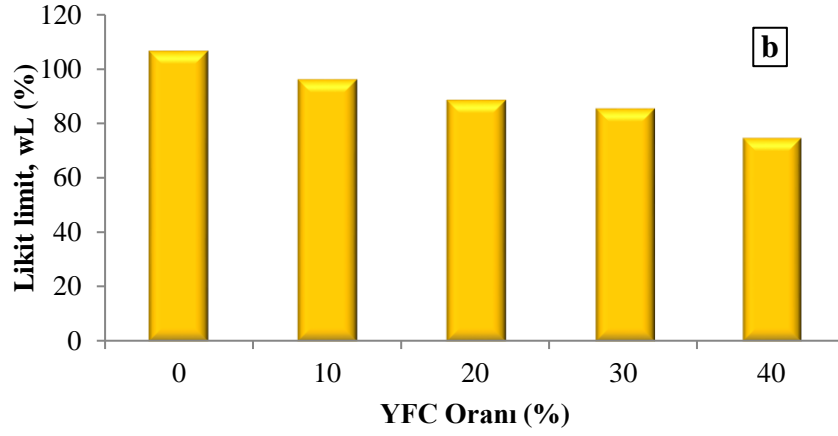
## 5.2.2 Kıvam (Atterberg) limitleri

Bu bölümde, YFC ve YFC ile birlikte kullanılan nano-SiO<sub>2</sub>'nin kıvam limitleri (likit ve plastik limit) ve plastisite değerlerinin değişimine etkisi araştırılmıştır. Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi parametreleri ayrı başlıklar altında değerlendirilerek sunulmuştur.

### Likit Limit Deneyle (w<sub>L</sub>)

Likit limit deneyi ilk olarak doğal zemine yapılmış ve doğal zeminin likit limiti %106.61 olarak tespit edilmiştir. Sonraki deneylerde ise doğal zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ilave edilmiştir. Son olarak da doğal zemine aynı oranlarda YFC ile birlikte ağırlıkça %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek likit limit değerleri tespit edilmiştir. Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiğinde likit limit değerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.6.a). Likit limit değerindeki en büyük azalma %40 YFC oranında, %37.36 (%106.61 dan %69.25'e) olarak gerçekleşmiştir. Likit limitin azalması literatürde yer alan Wild vd. (1996), Cokca vd. (2009), Preetham ve Nayak (2019) ve Rind vd.(2020) gibi birçok çalışmada da karşımıza çıkmaktadır. Sadece YFC kullanımına benzer şekilde, doğal zemine YFC ile birlikte iki farklı oranda nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi durumunda da likit limit değerlerinde azalma görülmektedir (Şekil 5.6.b ve c). Bu azalmaların en büyük değerleri %40 YFC ile %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %32 (%106.61 dan %74.61'e) ve %40 YFC ile %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %36.41 (%106.61 dan %70.2'ye) olarak tespit edilmiştir.

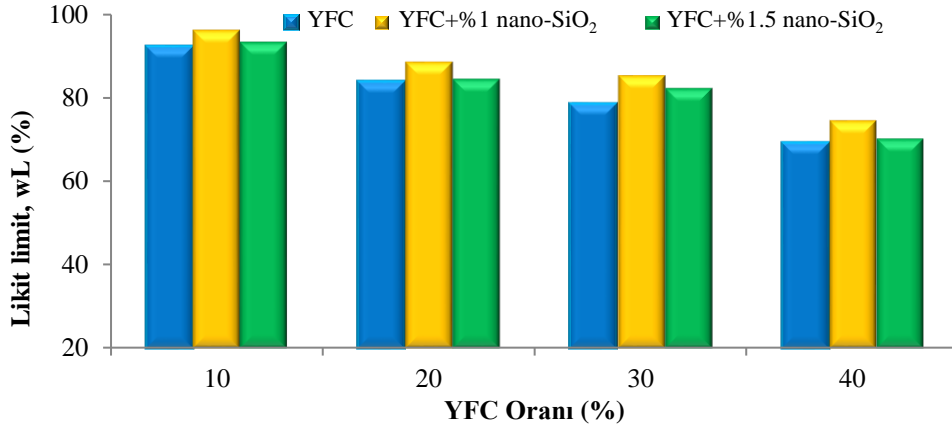




**Şekil 5.6.** Likit limit değerleri; YFC (a), YFC+%1 nano-SiO<sub>2</sub> (b) ve YFC+%1.5 nano-SiO<sub>2</sub> (c)

Sadece YFC ve YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımları sonucu elde edilen likit limit değerleri karşılaştırılarak YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının etkisi ayrıca ayrılmıştır (Şekil 5.7). YFC ile %1 ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının sadece YFC kullanımına göre likit limit değerlerini bir miktar attırdığı tespit edilmiştir. Malik vd. (2019) %15 nano-SiO<sub>2</sub> oranına kadar likit limit değerlerinde artış görürken bu orandan sonra azalma tespit etmiştir. Ghasabkolaei vd. (2016) çimento ile farklı oranlarda nano-SiO<sub>2</sub> kullanarak likit limit deneyleri yapmış ve artan nano-SiO<sub>2</sub> ile likit limitin de arttığını belirlemiştir.

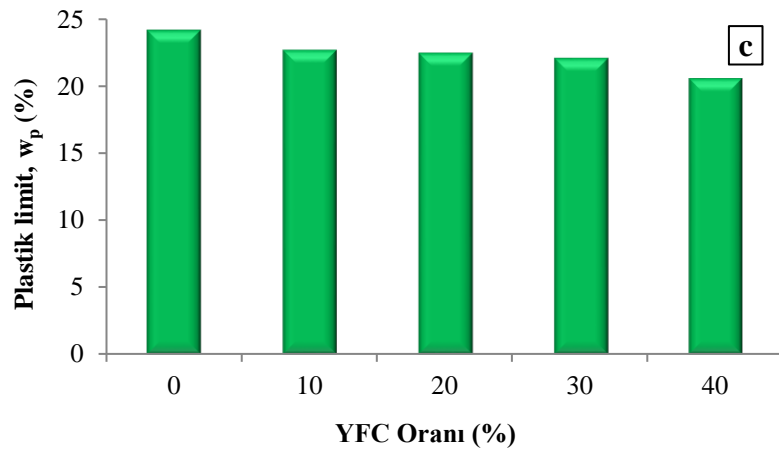
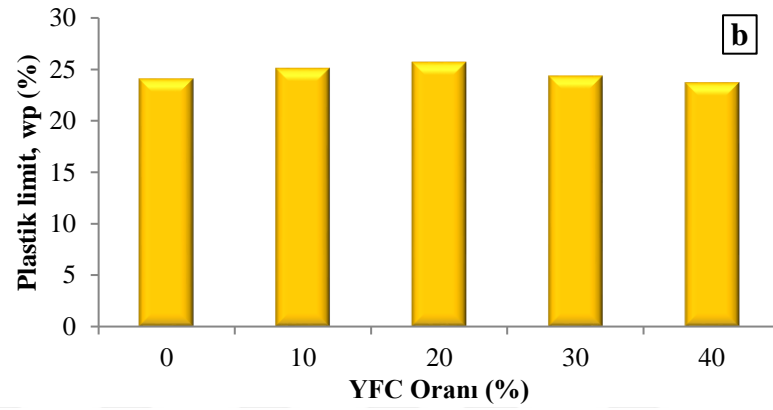
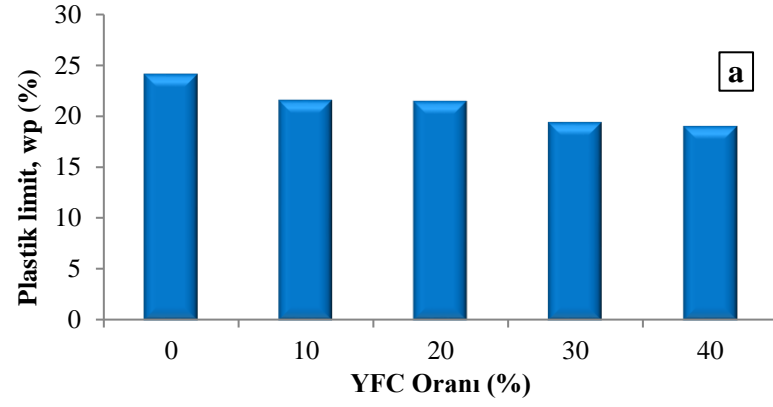
Likit limitin yüksek olması zeminin büyük hacimsel değişimler yapabilmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle bu değer azaltılması yapılan stabilizasyonun etkinliğinin göstergesidir. Yapılan tüm deneyler sonucunda sadece YFC ve YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımlarının likit limit değerlerini azalttığı, ancak YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının ayrıca likit limitin azaltılmasında katkı sağlamadığı tespit edilmiştir.



**Şekil 5.7.** Likit limit (wL) değişimleri

#### Plastik Limit Deneyleri ( $w_p$ )

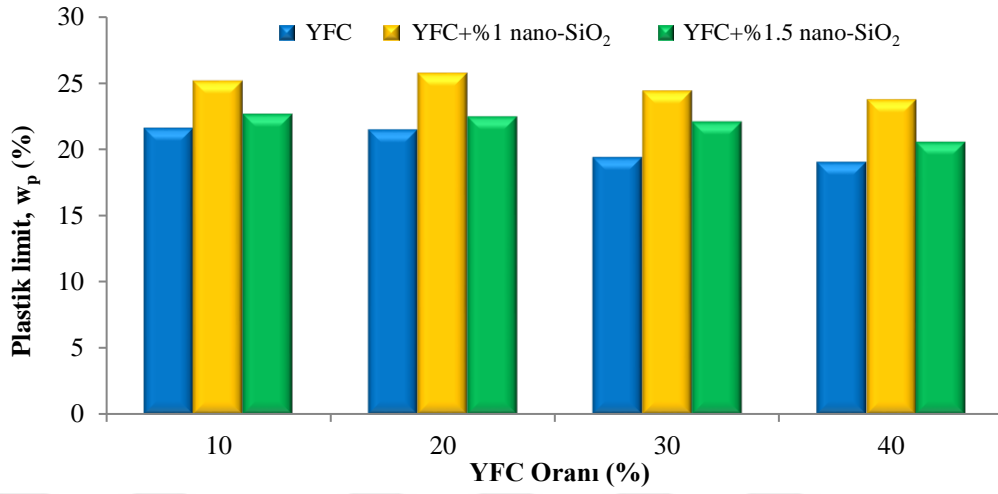
Plastik limit deneyleri, likit limit deneylerine benzer şekilde, ilk aşamada doğal zemine yapılmıştır. Doğal zeminin plastik limit değeri %24.13 olarak tespit edilmiştir. Ardından doğal zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ilave edilmiştir (Şekil 5.8.a). Son olarak da doğal zemine aynı YFC oranları ile birlikte ağırlıkça %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek plastik limit değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5.8.b ve c). Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiğinde plastik limit değerinin azaldığı, bu azalmanın en büyük değerinin % 19.02 olduğu ve %40 YFC oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu azalma, Yadu ve Tripathi (2013) tarafından da tespit edilmiştir. YFC ile %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında likit limit değerlerinde azalma görülürken, %20 YFC oranına kadar plastik limit değerlerinde bir miktar artış gerçekleşmiş, ardından azalmaya meydana gelmiştir (Şekil 5.8.b). YFC ile %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında da likit limite benzer şekilde artan YFC oranları ile azalma tespit edilmiştir (Şekil 5.8.c). YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile gerçekleşen bu farklı davranış plastisite değerlerindeki azalmaya engel olmamıştır.



**Şekil 5.8.** Plastik limit değerleri; YFC (a), YFC+%1 nano-SiO<sub>2</sub> (b) ve YFC+%1.5 nano-SiO<sub>2</sub> (c)

Sadece YFC ve YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımları sonucu elde edilen plastik limit değerleri karşılaştırılarak YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının etkisi ayrıca ayrılmıştır (Şekil 5.9). YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı plastik limit değerlerinde bir miktar artışa neden olmuştur. Bu artış özellikle %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında daha belirgindir. Malik vd. (2019) de artan nano-SiO<sub>2</sub> oranları ile plastik limitte artış tespit etmiştir.

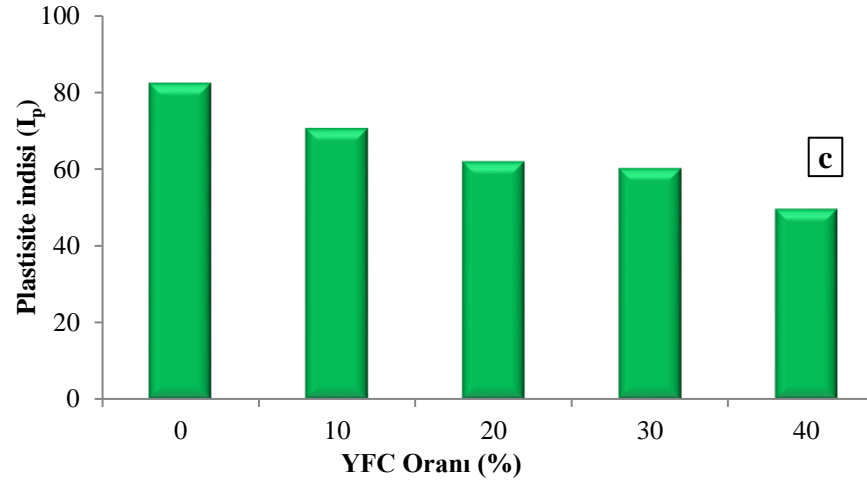
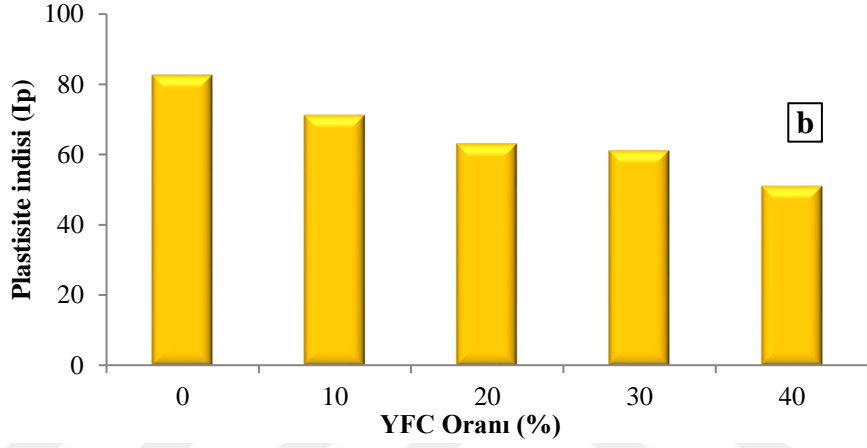
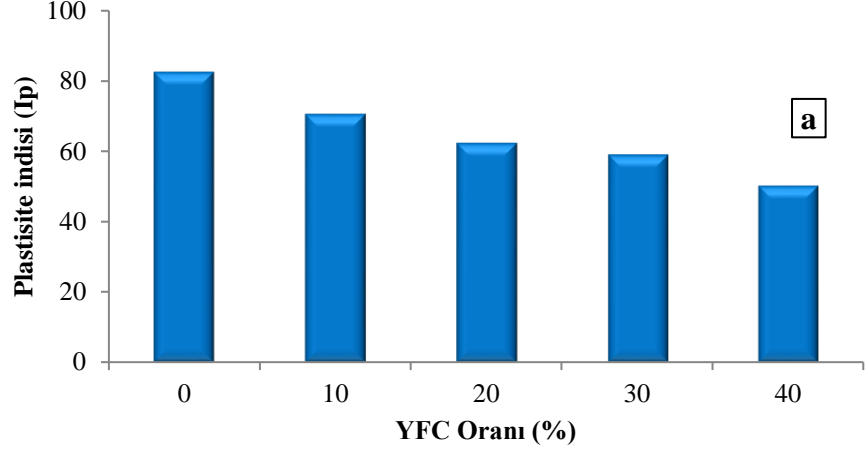
Ghasabkolaei vd. (2016) artan nano-SiO<sub>2</sub> miktarları ile plastik limit değerlerinde göze çarpan bir değişim olmadığını belirlemiştir.



Şekil 5.9. Plastik limit (w<sub>p</sub>) değişimleri

#### Plastisite İndisi (I<sub>p</sub>)

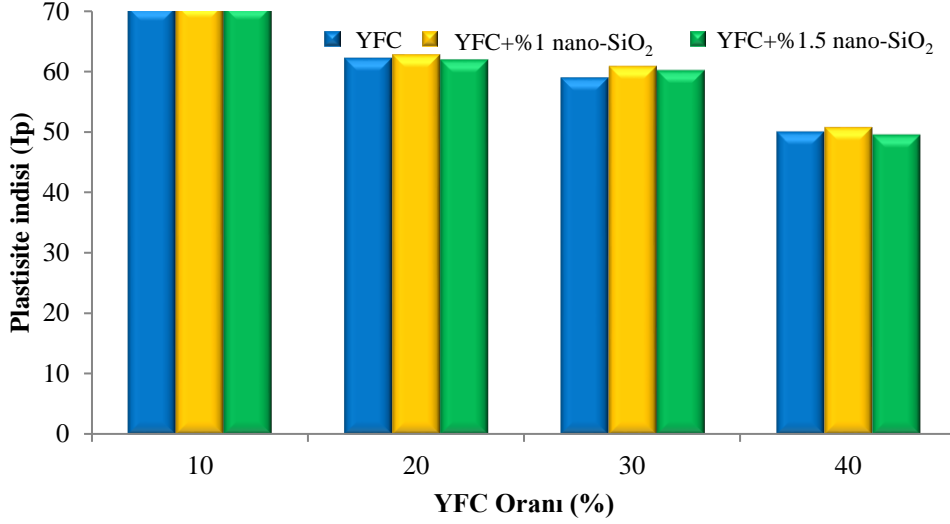
Likit ve plastik limit değerleri kullanılarak plastisite indisinin YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> etkisi ile değişimi araştırılmıştır (Şekil 5.10). Bu değerler ayrıca zeminlerin sınıflandırılmasında da kullanılmıştır. Doğal zeminin plastisite indisi değeri 82.48 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiğinde likit ve plastik limit değerlerinin her ikisinde de azalma olmasına rağmen plastik limit değerlerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.10.a). Bu azalma en çok %40 YFC oranında görülmekte olup değeri % 39 mertebesindedir. Plastisite değerlerindeki benzer azalma, Wild vd. (1996), Al-Rawas vd. (2002), Cokca vd. (2008), Preetham ve Nayak (2019) ve Rind vd.(2020) gibi birçok çalışmada da görülmektedir. Plastisite indisindeki azalma yüksek plastisiteli doğal zemine YFC ilave edilerek doğal zeminin kil miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır. YFC ile %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının da plastisite indisi değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir (Şekil 5.10.b). Bu azalmanın en büyük değerleri %40 YFC ve %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %38, %40 YFC ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %40 olarak tespit edilmiştir.



**Şekil 5.10.** Plastisite indisi değerleri; YFC ( a), YFC+% 1 nano-SiO<sub>2</sub> (b) ve YFC+%1.5 nano-SiO<sub>2</sub> (c)

Elde edilen tüm plastisite indisi değerleri karşılaştırılarak YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının plastisite indisi değerlerini nasıl etkilediği ayrıca araştırılmıştır (Şekil 5.11). YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının plastisite indisi değerlerinin azaltılmasında çok da etkili olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının sadece YFC

kullanımına göre plastisite indisi değerlerini az miktarda arttırdığı, bu artışın %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Ghasabkolaei vd. (2016) de artan nano-SiO<sub>2</sub> miktarları ile plastisite indisinde artış tespit etmiştir.



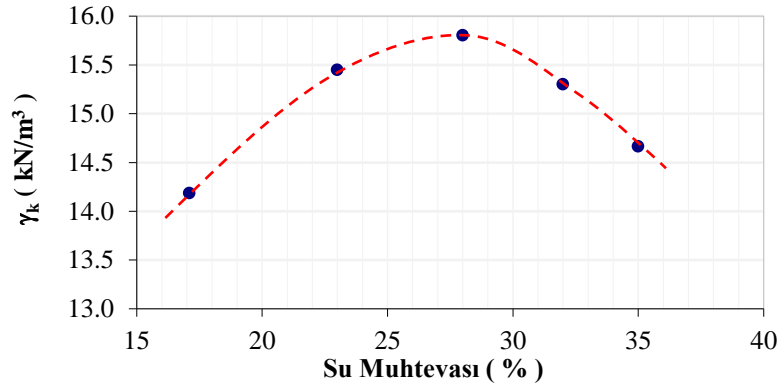
Şekil 5.11. Plastisite indisi ( $I_p$ ) değişimleri

Plastisite indisi değeri zemin davranışını büyük ölçüde etkilemektedir. Bir zeminin plastisite indisi ve likit limit değerlerinin yüksek olması, zemindeki hacimsel değişimlerin ve zeminin büzülme kapasitesinin yüksek olduğunu gösterir (Öser, 2020). Ayrıca, Naderi ve Naeini (2009) plastisite indisinin zemin mukavemetinde oldukça etkili olduğunu, artan plastisite ile zemin mukavemetinin azaldığını belirtmiştir. Sonuç olarak likit limit ve plastisite indisi değerlerinde meydana gelen azalma yapılan zemin stabilizasyonunun etkinliğini göstermektedir. Yapılan deney sonuçları karşılaştırılıp değerlendirildiği zaman sadece YFC kullanımının hem likit limit hem de plastisite indisinin azaltılmasında oldukça etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının hem likit limit hem de plastisite indisi değerlerini az miktarda da olsa arttırdığı görülmektedir. Bu nedenle YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı kıvam limitlerinin iyileştirilmesine katkı sağlamadığı tespit edilmiştir.

### 5.2.3 Kompaksiyon (Proktor) deneyleri

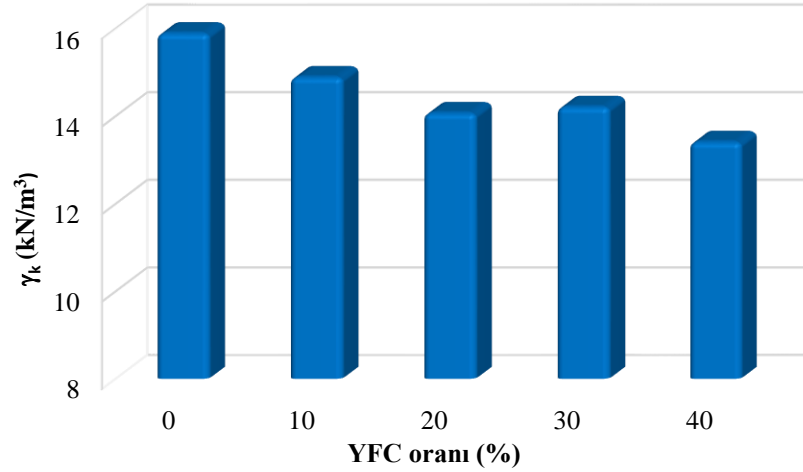
Kompaksiyon (proktor) deneyleri iki farklı amaç için gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tez kapsamında iyileştirmeye etkisi araştırılan YFC ve YFC ile birlikte kullanılan nano-

SiO<sub>2</sub>'nin kompaksiyon (sıkışma) özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İkinci olarak, tez kapsamında yapılan konsolidasyon deney numuneleri kompaksiyon deneyleri sonucu belirlenen  $\gamma_k$  ve  $w_{opt}$  değerleri esas alınarak hazırlanmıştır. İlk amaca yönelik çalışmalarda, doğal zemine ağırlıkça farklı oranlarda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ilave edilerek kompaksiyon deneyleri yapılmış ve YFC'nin kompaksiyon parametreleri olan kuru birim hacim ağırlık ( $\gamma_k$ ) ve optimum su içeriği ( $w_{opt}$ ) değerleri tespit edilerek bu parametrelerdeki değişimler araştırılmıştır. Ardından, doğal zemine YFC ile birlikte ağırlıkça %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek kompaksiyon parametreleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda ilk olarak doğal zemine hiçbir katkı ilave edilmeden kompaksiyon deneyi yapılmış ve deney sonucu örnek sıkışma eğrisi olarak sunulmuştur (Şekil 5.12).



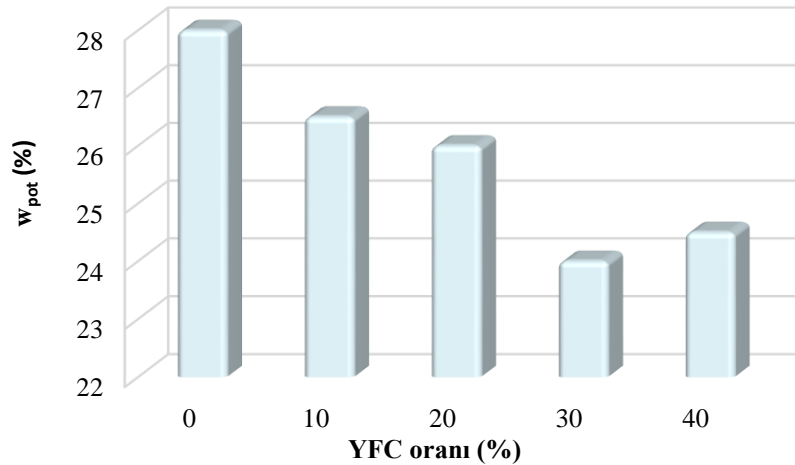
**Şekil 5.12.** Doğal zeminin sıkışma eğrisi

YFC'nin artan oranları ve  $\gamma_k$  değişimi incelendiği zaman genel eğilim olarak kuru birim hacim ağırlık değerinde azalma olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 5.13). Optimum su içeriğinde de benzer şekilde artan YFC oranları ile azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 5.14). YFC'nin %30 oranında  $\gamma_k$  bir miktar artarken, aynı orandaki  $w_{opt}$  değeri de düşüş göstermektedir. Sharma ve Sivapullaiah (2012) artan oranlarda YFC ile hem  $\gamma_k$ , hem de  $w_{opt}$  değerlerinde düşüş elde etmiştir. Araştırmacılar, bu çalışmada %30 YFC oranında meydana gelen  $\gamma_k$  değerindeki artışı kendi çalışmalarında %20 ve %50 YFC oranlarında tespit etmiştir.



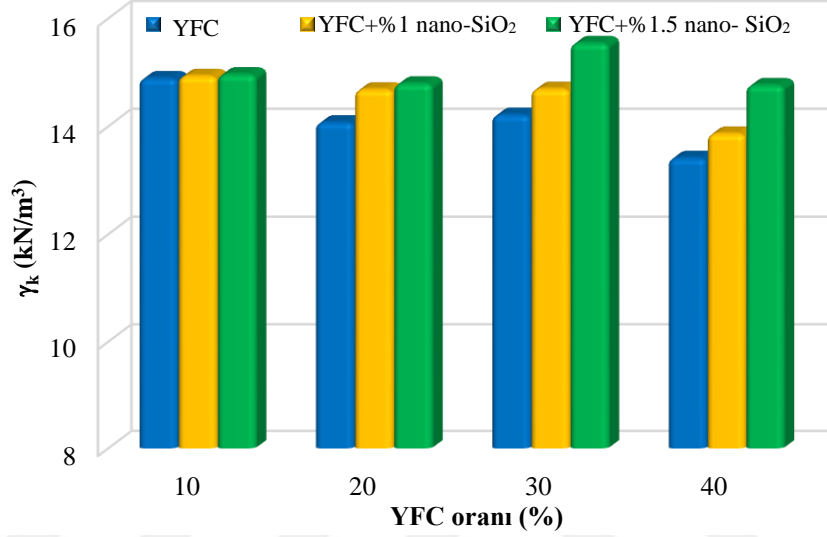
**Şekil 5.13.** Artan YFC oranları ile  $\gamma_k$  değişimi

Bu çalışmada kullanılan YFC ve doğal zeminin dane dağılımları incelendiği zaman YFC'nin doğal zemine göre daha kaba daneli olduğu görülmektedir. Görece daha kaba daneli olan YFC'nin doğal zemine artan oranlarla eklenmesi, plastisitesi yüksek olan doğal zemin içeriğindeki ince dane yüzdesini azaltmaktadır. Bu durum da zeminin su tutma kapasitesini azaltarak  $w_{opt}$  değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca  $w_{opt}$  değerindeki bu azalma %30 YFC oranında daha belirgin bir hal almaktadır. Sharma ve Sivapullaiah (2012) da  $w_{opt}$  değerindeki azalmanın nedenini karışımın su tutma kapasitesindeki azalmadan kaynaklandığını belirtmiştir.  $w_{opt}$  değerindeki azalmaya rağmen  $\gamma_k$  değerlerinde de %30 YFC oranına kadar düzenli bir azalma tespit edilmiştir. Bu durum, görece daha kaba daneli olan YFC'nin sürtünme direncinden dolayı sıkışmayı zorlaştırması olarak yorumlanmıştır.



**Şekil 5.14.** Artan YFC oranları ile  $w_{opt}$  değişimi

İkinci seri deneylerde, YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub>'nin kompaksiyon parametrelerine etkisini araştırmak için literatürden seçilen ağırlıkça %1 ve %1.5 oranlardaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları birinci seride kullanılan YFC oranları (%10, %20, %30 ve %40) ile ayrı ayrı karıştırılarak ince daneli zemine ilave edilmiş ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır (Şekil 5.15 ve 5.16).

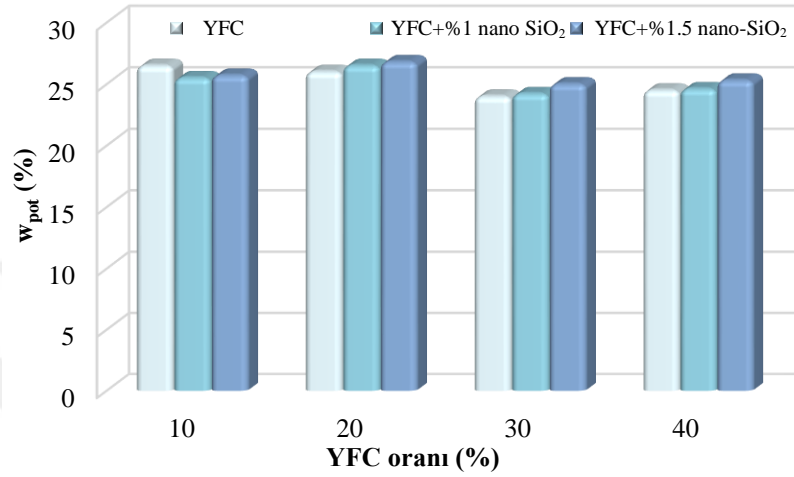


Şekil 5.15. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin  $\gamma_k$  değişimine etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda tüm YFC oranları için, %1 ve %1.5 SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının YFC ile birlikte kullanılması durumunda  $\gamma_k$  değerlerinin bir miktar arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5.15). Bu artış YFC oranının artması ve %1.5 oranında nano-SiO<sub>2</sub> eklenmesi ile daha belirgin olmaktadır. Bu durumun dane boyutu oldukça küçük olan nano parçacıkların sıkıştırma esnasında matrislerdeki boşlukları doldurması olarak yorumlanabilir. Aynı durum Choobbasti vd. (2015) çalışmasında da görülmüş olup, bu durumun nedeni benzer şekilde açıklanmıştır.

Aynı seri deneylerde, her bir YFC oranı kendi arasında değerlendirildiği zaman  $w_{opt}$  değerlerinde artan nano-SiO<sub>2</sub> ile az miktarlarda artışlar gözlemlenmiştir (Şekil 5.16). Bu durum, yüksek özgül yüzeye sahip nano parçacıkların su tutma kapasitesini arttırdığını göstermektedir. Benzer artış Ghavami vd. (2018) tarafından da tespit edilmiştir. Bu durum doğal zemine nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesiyle zeminin yüzey alanının arttığı ve bu nedenle sıkıştırma yapmak için daha fazla suya ihtiyaç duyulduğu şeklinde açıklanmıştır. Nano-SiO<sub>2</sub> ile  $w_{opt}$  değerindeki artış Gelsefidi vd. (2013) çalışmasında da

görülmüştür. Bu durum, nano-SiO<sub>2</sub>'nin zemine ilave edilmesi ile kimyasal puzolonik sürecin artarak hızlandığı, zemin karışımındaki suyun bu reaksiyonlara katıldığı ve sonuç olarak sıkıştırmanın tamamlanabilmesi için daha fazla su gerektiği şeklinde açıklanmıştır. Sonuç olarak, nano-SiO<sub>2</sub>'nin çok küçük miktarlarda kullanımının bile zeminin kompaksiyon özelliklerinin değişiminde etkili olduğu görülmektedir.



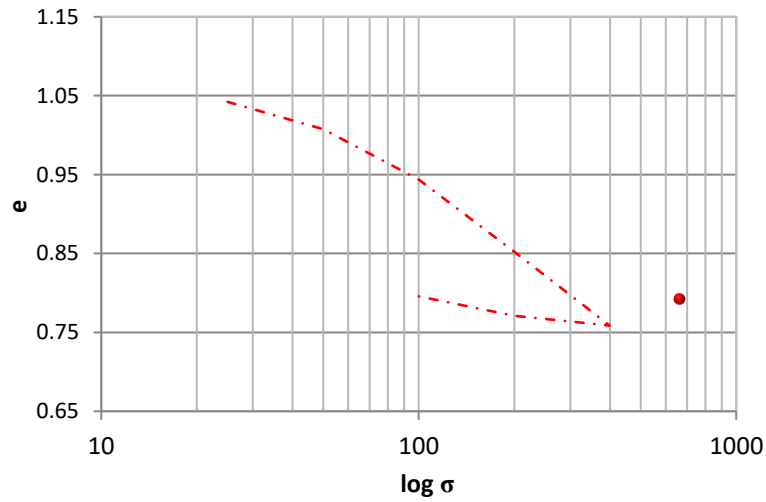
Şekil 5.16. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin w<sub>opt</sub> değişimine etkisi

#### 5.2.4 Konsolidasyon deneyleri

Konsolidasyon deneyleri doğal zemini stabilize etmek için ağırlıkça dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ve aynı YFC oranları ile birlikte ağırlıkça iki farklı oranda (%1 ve %1.5) nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek yapılmıştır. Konsolidasyon deneyleri beş yükleme, iki boşaltma kademesinden oluşmaktadır. Yapılan deneylerden örnek olarak doğal zemin için yapılan konsolidasyon deney sonuçları Çizelge 5.8 ve bu deneyin sıkışma eğrisi Şekil 5.17'de verilmiştir. Bu kısımda belirtilen YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> oranlarında gerçekleştirilmiş olan konsolidasyon deneyleri neticesinde elde edilen bazı zemin parametrelerinin (permeabilite, hacimsel sıkışma katsayısı, sıkışma ve şişme indisi vb.) değişimi araştırılarak ayrı ayrı sunulmuştur. Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm konsolidasyon deney sonuçlarının sunulması tezde yoğunluk yaratacağı için, stabilizasyon ile değişimi araştırılan tüm parametreler için en yüksek iki basınç kademeleri (200kPa ve 400kPa) değerlendirilerek sunulmuştur.

**Çizelge 5.8.** Doğal zeminin konsolidasyon deney sonuçları

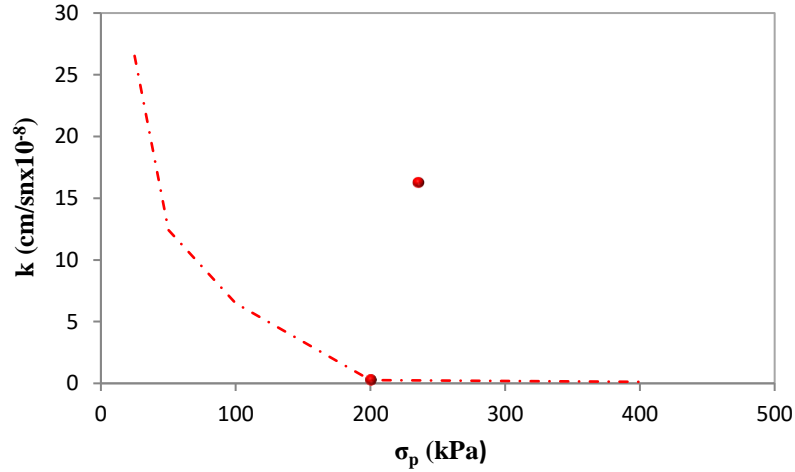
P (kPa)	Okuma (1/100)	H <sub>0</sub> -ΔH (mm)	ΔP (kg/cm <sup>2</sup> )	ΔH/H	m <sub>v</sub>	Δe	e	a <sub>v</sub>
0	-	20.00		0.000	0.000	0.000	1.061	-
25	17.9	19.82	25	0.009	0.035	0.018	1.042	0.072
50	51.7	19.48	25	0.017	0.068	0.035	1.007	0.137
100	113.5	18.86	50	0.032	0.063	0.064	0.944	0.125
200	202.2	17.98	100	0.048	0.047	0.091	0.852	0.090
400	293.0	17.07	200	0.052	0.025	0.094	0.759	0.046
200	281.2	17.19	-200	-0.007	0.003	-0.012	0.771	0.006
100	257.0	17.43	-100	-0.014	0.014	-0.025	0.796	0.024



**Şekil 5.17.** Doğal zeminin sıkışma eğrisi

Permeabilite katsayıları (k), konsolidasyon deneyinden Eşitlik 5.1'te yer alan bağıntı yardımıyla elde edilmiştir. Bu eşitlik kullanılarak deneyin her basınç kademesi için permeabilite değerleri tespit edilebilir. Şekil 5.18'de doğal zeminin artan basınç kademelerinde elde edilen k değerleri verilmiştir. Artan basınç kademeleri ile k değerinin azaldığı görülmektedir.

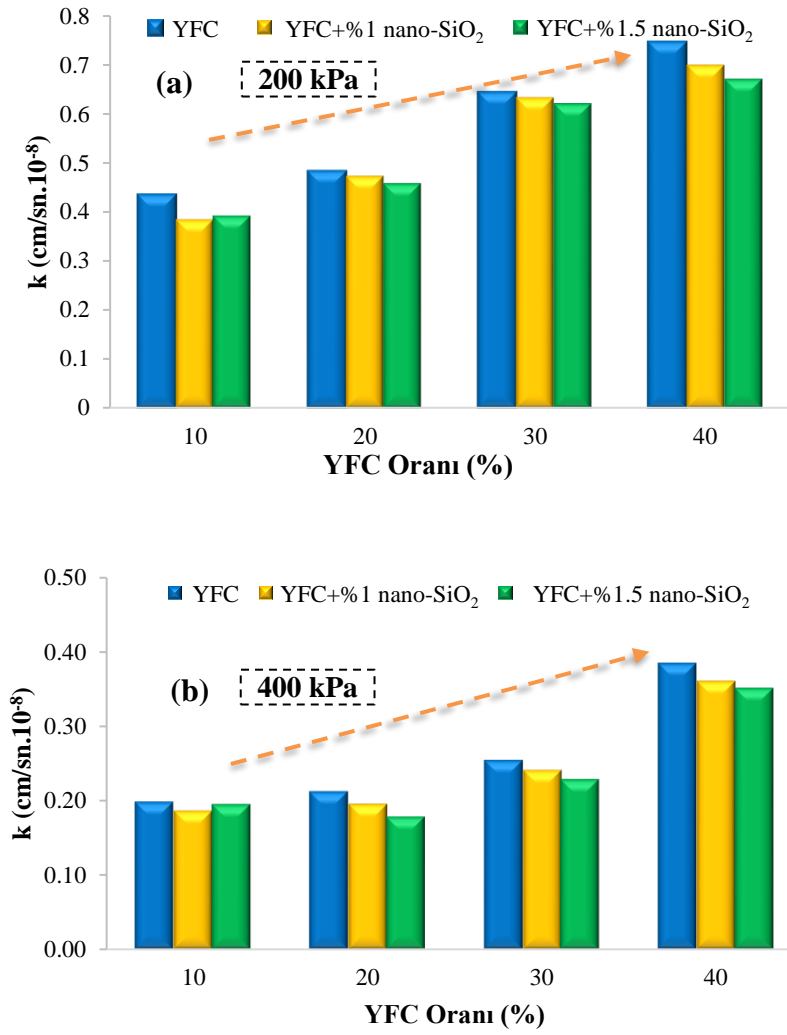
$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (5.1.)$$



**Şekil 5.18.** Doğal zeminin permeabilitesinin basınç kademeleri ile değişimi

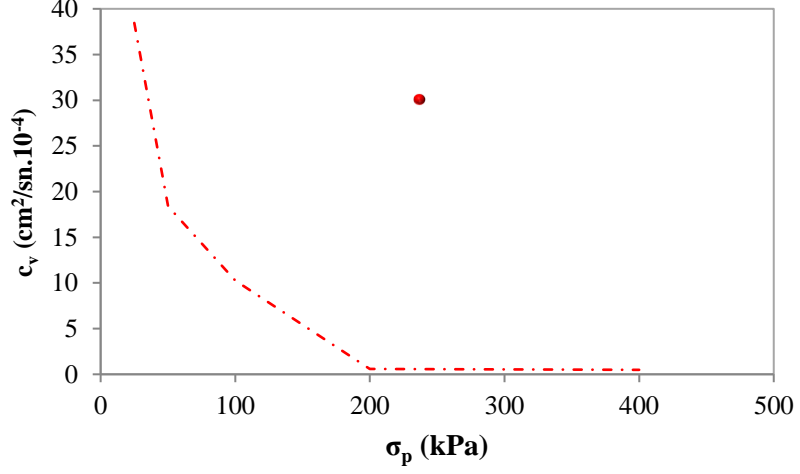
Doğal zeminin 200kPa ve 400kPa basınç kademelerindeki permeabilite değerleri sırasıyla,  $0.271 \times 10^{-8}$  ve  $0.124 \times 10^{-8}$ 'dir. Her bir karışım için 200kPa ve 400kPa basınç kademelerindeki permeabilite değerleri karşılaştırıldığı zaman, basınç kademesinin artması ile permeabilite değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Başka bir ifade ile permeabilite değeri uygulanan basınç değerinden belirgin bir şekilde etkilenmektedir.

Görece daha kaba daneli olan YFC'nin doğal zemine artan oranlarla eklenmesi permeabilitenin artmasına neden olmuştur (Şekil 5.19). Permeabilitenin artması konsolidasyon süresini azaltmaktadır. YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranlardaki  $\text{SiO}_2$  nanoparçacıklarının kullanılması durumunda da permeabilite değerlerinde bir miktar azalma görülmüştür. Bu azalmanın nedeninin YFC arasındaki boşlukların nano malzeme ile doldurulması olduğu düşünülmektedir. Bu azalma nano miktarı arttıkça belirginleşmiştir. Nano- $\text{SiO}_2$  ilave edilmesi ile permeabilitedeki azalma Ochepe ve Kanyi (2020) tarafından da tespit edilmiştir. Cheng vd. (2020), nano-bentonit kullanarak yaptığı deneylerde 500 kPa basınç kademesine kadar artan nano-bentonit oranlarının permeabiliteyi azalttığı, ancak 500 kPa'dan daha büyük basınç kademelerinde arttırdığını tespit etmiştir.



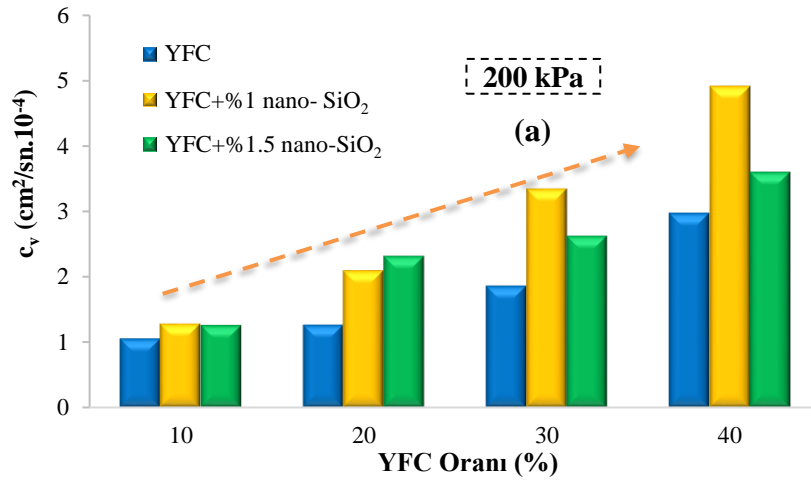
Şekil 5.19. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin  $k$  (permeabilite) değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400 kPa (b)

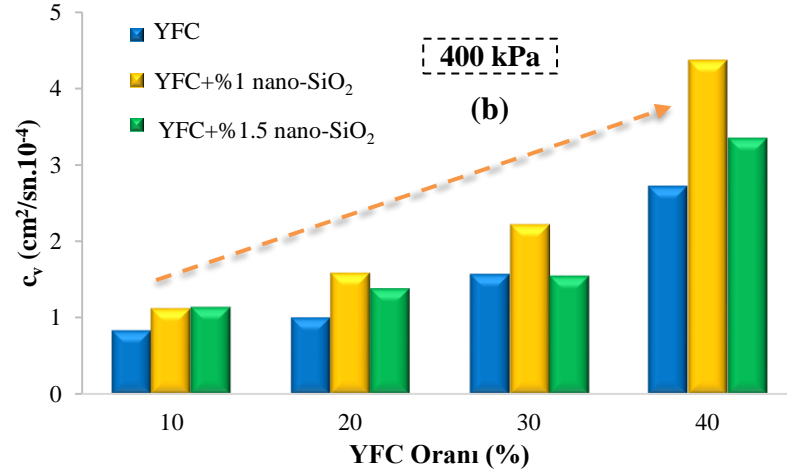
Konsolidasyon deneylerinde, konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) karekök zaman yöntemi ile hesaplanmıştır.  $c_v$  belirli miktar konsolidasyonun ne kadar sürede gerçekleşeceği ile ilgili bir parametredir. Konsolidasyon katsayısı, permeabilitede olduğu gibi tüm basınç kademeleri için tespit edilebilir. Şekil 5.20'de doğal zeminin artan basınç kademelerinde elde edilen  $c_v$  değerleri verilmiştir. Artan basınç kademeleri ile  $c_v$  değerinin azaldığı görülmektedir.



**Şekil 5.20.** Doğal zeminin  $c_v$  değerinin basınç kademeleri ile değişimi

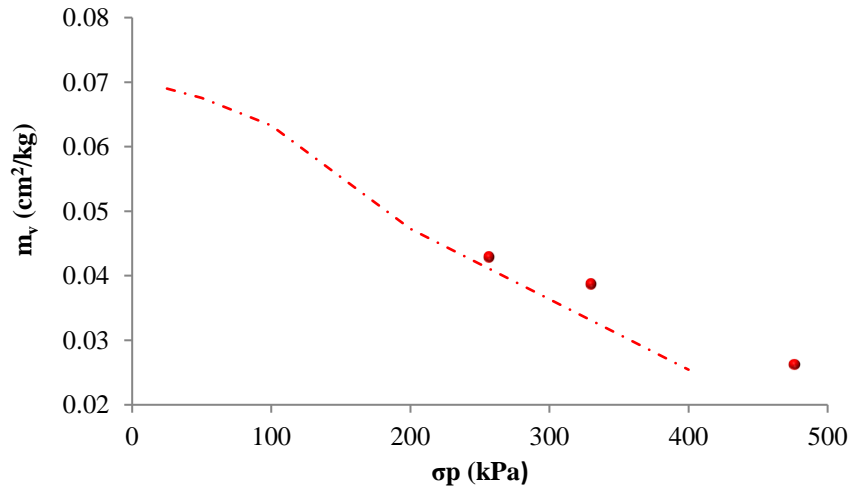
Doğal zeminin 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $c_v$  değerleri sırasıyla,  $0.574 \text{ cm}^2/\text{sn} \cdot 10^{-4}$  ve  $0.489 \text{ cm}^2/\text{sn} \cdot 10^{-4}$ 'tür. Tüm karışım oranları için 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $c_v$  değerleri karşılaştırıldığı zaman, basıncın artması ise  $c_v$  değerlerinin bir miktar azaldığı görülmüştür (Şekil 5.21). Doğal zeminde hem YFC hem de YFC ile birlikte % 1 ve % 1.5 oranlardaki  $\text{SiO}_2$  nanoparçacıklarının kullanımı  $c_v$  değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu durumda oluşacak konsolidasyon süresinin daha az olacağı anlamına gelmektedir. Bu durum permeabilitede meydana gelen değişime paraleldir. Her iki basınç kademesi için de genel olarak %1 nano- $\text{SiO}_2$  ile daha yüksek  $c_v$  değerleri tespit edilmiştir. Bu durumda konsolidasyon süresinin daha az olacağını göstermektedir.





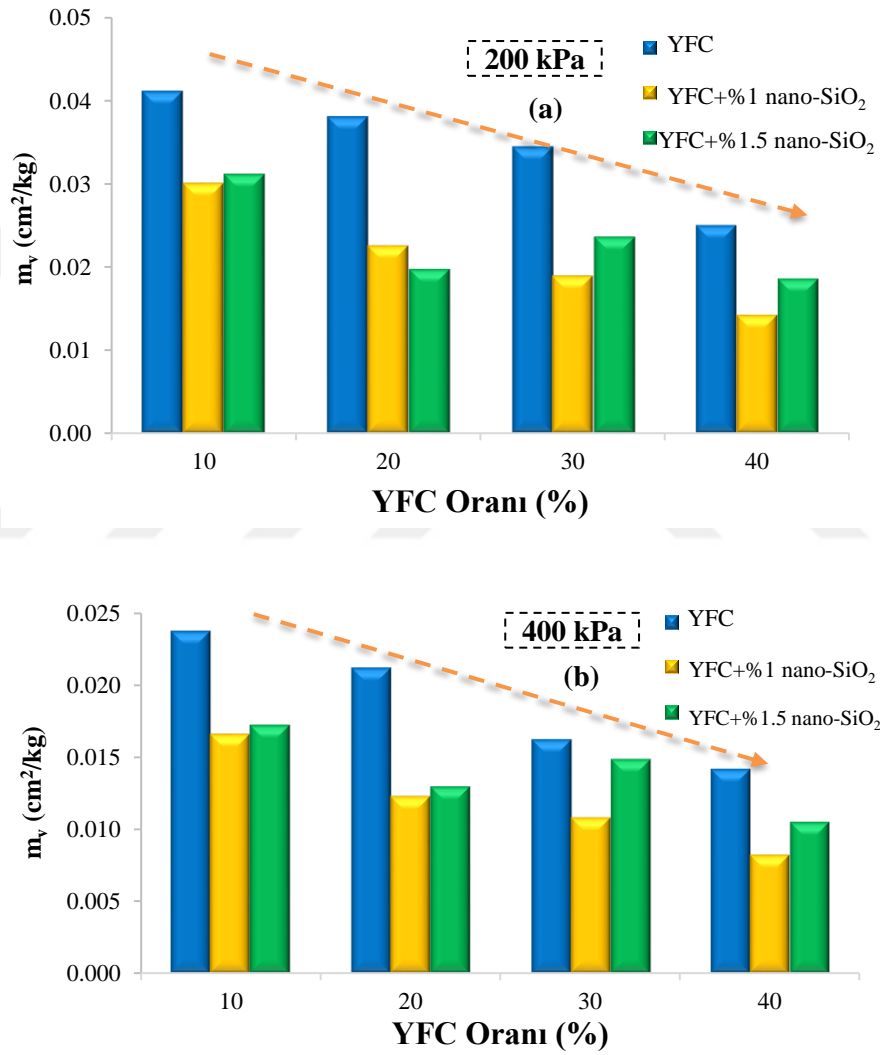
Şekil 5.21. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin  $c_v$  değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b)

Konsolidasyon deneylerinden elde edilen bir diğer önemli parametre de hacimsel sıkışma katsayısıdır ( $m_v$ ). Bu parametrenin büyüklüğü zeminde meydana gelen oturmalar ile doğrudan ilişkili olup,  $m_v$  değerinin büyük olması zeminde daha fazla oturmaların meydana geleceği anlamını taşır. Bahsi geçen önceki konsolidasyon parametreleri gibi konsolidasyon deneylerinin her basınç kademesi için  $m_v$  hesaplanabilir. Şekil 5.22'de doğal zeminin artan basınç kademelerinde elde edilen  $m_v$  değerleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi artan basınç kademeleri ile  $m_v$  değeri azalmaktadır.



Şekil 5.22. Doğal zeminin  $m_v$  değerlerinin basınç kademeleri ile değişimi

Doğal zeminin 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $m_v$  değerleri sırasıyla, 0.0473  $\text{cm}^2/\text{kg}$  ve 0.0254  $\text{cm}^2/\text{kg}$ 'dır. Doğal zeminde hem YFC hem de YFC ile birlikte % 1 ve % 1.5 oranlardaki  $\text{SiO}_2$  nanoparçacıklarının kullanımı  $m_v$  değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Sonuç olarak YFC ve nano- $\text{SiO}_2$  kullanımı ile oturmaların azaltılacağı tespit edilmiştir (Şekil 5.23). Genel olarak, bu işlemden %1 nano- $\text{SiO}_2$  kullanımının daha etkili olduğu söylenebilir.



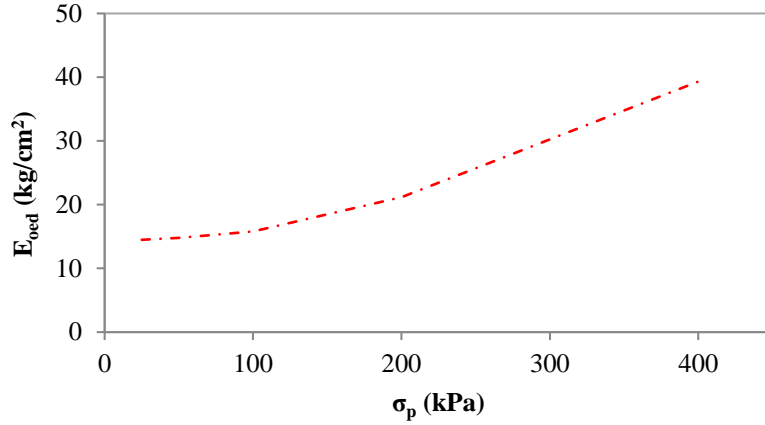
**Şekil 5.23.** YFC ile nano- $\text{SiO}_2$ 'nin  $m_v$  değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b)

Konsolidasyon deneylerinde her basınç kademesi için odometre rijitliği ( $E_{\text{od}}$ ) Eşitlik 5.2 yardımı ile hesaplanabilir. Doğal zeminin  $E_{\text{od}}$  değerinin artan basınç kademelerindeki değişimi Şekil 5.24'de verilmiştir. Doğal zeminin artan basınç kademeleri ile  $E_{\text{od}}$  değerinde artışlar gözlemlenmiştir.

$$E_{oed} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon} \quad (5.2.)$$

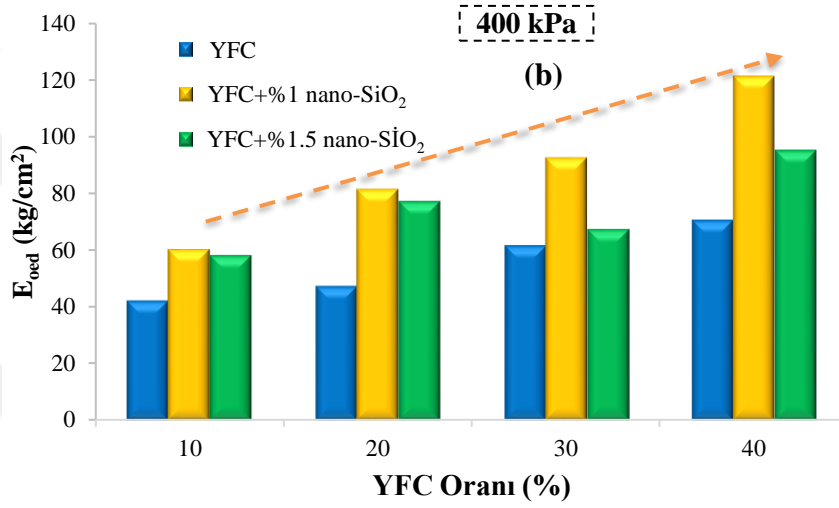
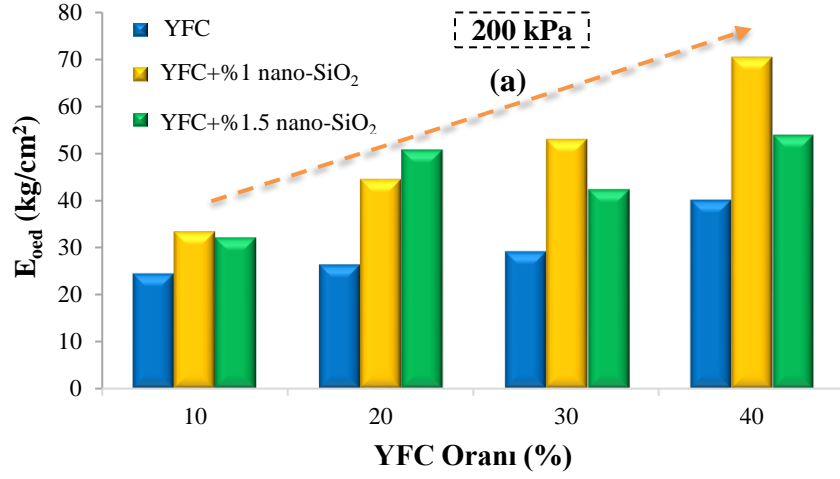
$\Delta\sigma'$  : Efektif gerilme değişimi

$\Delta\varepsilon$  : Eksenel deformasyon



**şekil 5.24.** Doğal zeminin  $E_{oed}$  değerinin basınç kademeleri ile değişimi

Doğal zeminin 200kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $E_{oed}$  değerleri sırasıyla, 21 ve 39 kg/cm<sup>2</sup>'dir. Doğal zemine hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi ile doğal zeminin odömetre rijitliğinde artış görölmektedir (şekil 5.25).  $E_{oed}$  değerleri uygulanan basınç değerine göre artış gösterdiği için tüm karışımlarda 400 kPa basınç kademesinde daha büyük odömetre rijitliği tespit edilmiştir. Artan YFC oranı ile  $E_{oed}$  değerlerinde artış tespit edilmiştir. Ancak, hem 200 kPa hem de 400 kPa basınç kademelerinin her ikisinde de genel olarak YFC %1 nano-SiO<sub>2</sub>'nin odömetre rijitliğinin artırılmasında daha etkili olduğu görölmektedir.



**Şekil 5.25.** YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin E<sub>oed</sub> değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b)

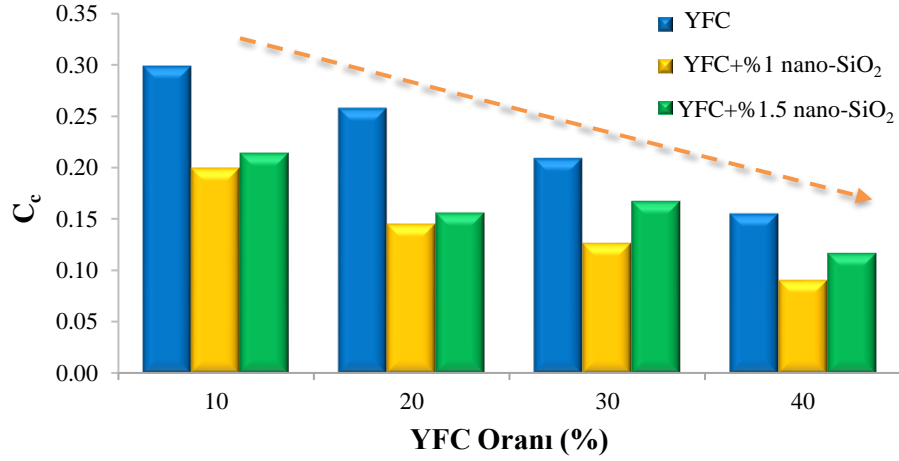
E<sub>oed</sub> ve Elastisite modülü (E) arasında Eşitlik 5.3'de verilen bir ilişki vardır. Bu şekilde konsolidasyon deneyinden zeminin elastisite modülü de hesaplanabilir. Elde edilen E<sub>oed</sub> değerleri ve  $\nu=0.3$  alınarak hesaplanan elastisite modülü değerleri Çizelge 5.9'da verilmiştir. E değeri, E<sub>oed</sub> değerine bağlı olarak hesapladığı için hem YFC hem de nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile elde edilecek elastisite modülü değişim trendleri yukarıda bahsedilen E<sub>oed</sub> ile aynı olacaktır. Sonuç olarak, tüm YFC oranlarında %1 nano-SiO<sub>2</sub> ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı rijitliğin artmasına neden olurken, rijitliğin arttırılmasında %1 nano-SiO<sub>2</sub> %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanıma göre daha etkili sonuç vermiştir Changizi ve Haddad (2017). tek eksenli basınç dayanımı deneylerinden zemine nano-SiO<sub>2</sub> eklenmesi ile E değerinde artış tespit etmiştir.

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (5.3)$$

**Çizelge 5.9.**  $E_{oed}$  değerine bağlı hesaplanan E değerleri

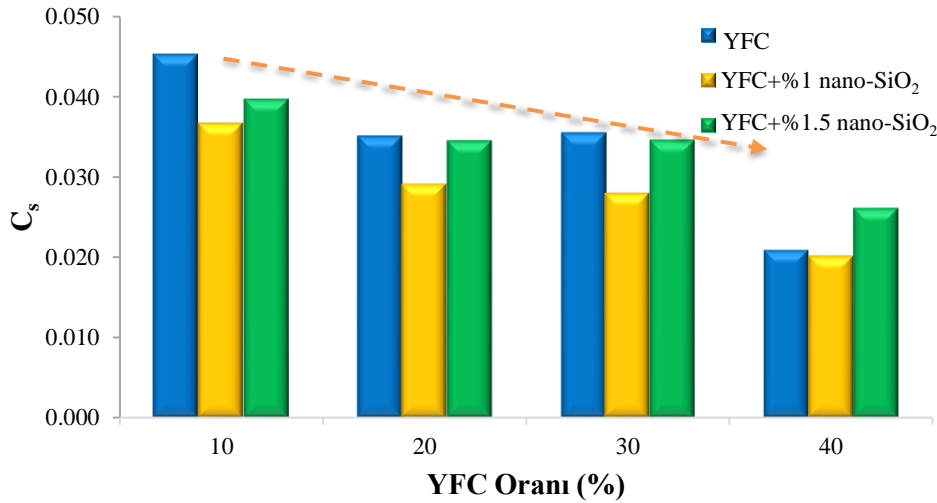
YFC Oranı (%)	Basınç Kademeleri			
	200 kPa		400 kPa	
	$E_{oed}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{oed}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )
0	21	16	39	29
10	24	18	42	31
20	26	20	47	35
30	29	22	62	46
40	40	30	70	52
10+% 1 nano-SiO <sub>2</sub>	33	25	60	45
20+% 1 nano-SiO <sub>2</sub>	44	33	81	61
30+% 1 nano-SiO <sub>2</sub>	53	39	92	69
40+% 1 nano-SiO <sub>2</sub>	70	52	121	90
10+% 1.5 nano-SiO <sub>2</sub>	32	24	58	43
20+% 1.5 nano-SiO <sub>2</sub>	51	38	77	57
30+% 1.5 nano-SiO <sub>2</sub>	42	31	67	50
40+% 1.5 nano-SiO <sub>2</sub>	54	40	95	71

Konsolidasyon deneylerinden elde edilen en önemli parametrelerden biri de bakır sıkışma eğrisinin eğimi olan sıkışma indisidir ( $C_c$ ).  $C_c$  değerinin artması daha yüksek oturmaların elde edileceği anlamına gelmektedir. Doğal zeminin konsolidasyon deneyi sonucunda  $C_c$  değeri 0.308 olarak tespit edilmiştir. YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile  $C_c$  değerinde tespit edilen değişimler Şekil 5.26'da sunulmuştur. Doğal zemine hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile  $C_c$  değerinde genel olarak bir azalma tespit edilmiştir. Bu durum hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının uygulanan basınca karşı daha fazla direnç göstereceği, başka bir ifade ile oturmaların azaltılmasında etkili olacağı anlamına gelmektedir. %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile  $C_c$  değerinde görülen azalma %1.5 oranına göre daha fazla olduğu için, %1 nano-SiO<sub>2</sub> oturmaların azaltılmasında daha etkili olacaktır. Changizi ve Haddad (2017)'de benzer şekilde %1 nano-SiO<sub>2</sub> oranına kadar  $C_c$  değerinde azalma tespit etmiştir.



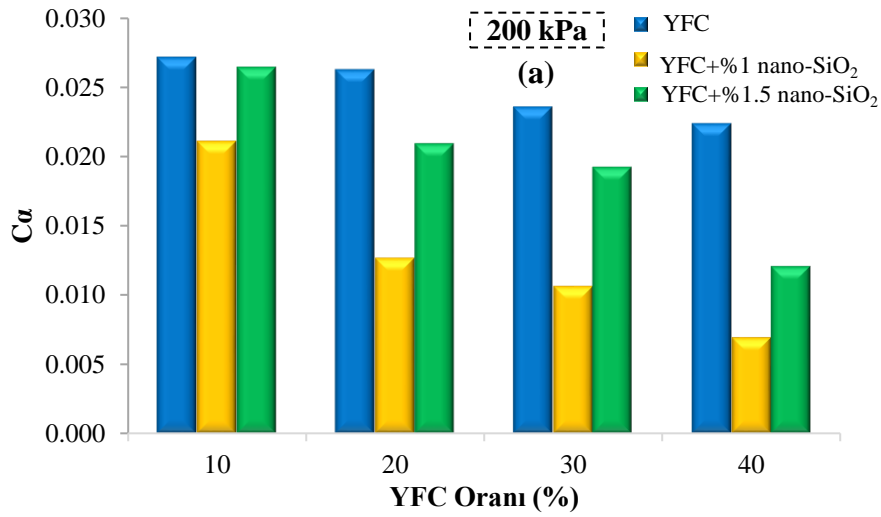
Şekil 5.26. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin C<sub>c</sub> değişimine etkisi

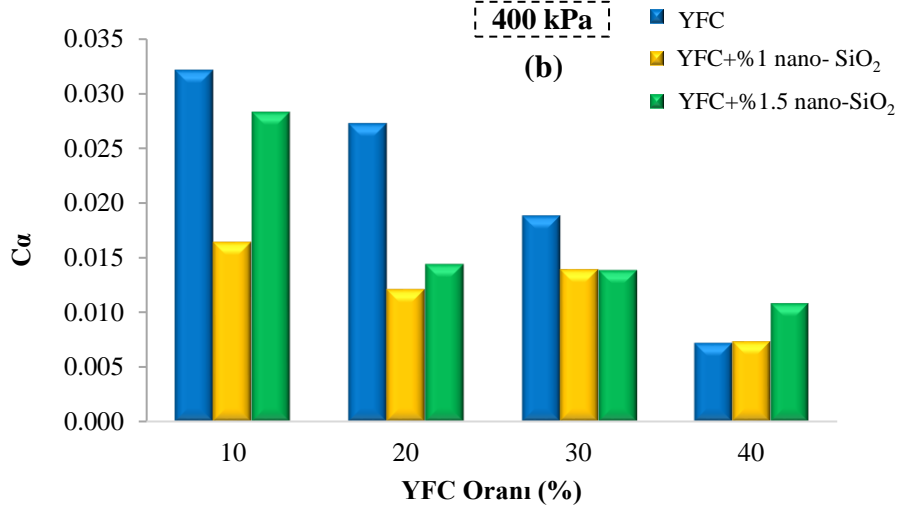
Konsolidasyon deneylerinden elde edilen başka bir önemli parametre de boşaltma eğrisinin eğimi olan yeniden sıkışma indisidir (C<sub>s</sub>). C<sub>c</sub> değerine benzer olarak C<sub>s</sub> değerinin artması da oturmaların artacağı anlamına gelmektedir. Doğal zeminin konsolidasyon deneyi sonucunda C<sub>s</sub> değeri 0.0616 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi ile genel olarak C<sub>s</sub> değerinde azalma görülmüştür (Şekil 5.27). Bu durum stabilizasyonla birlikte oturmaların azaltılacağı anlamını taşımaktadır. Ayrıca, %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının stabilizasyonda daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.27. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin C<sub>s</sub> değişimine etkisi

İkincil konsolidasyon (krip) kil zeminlerde büyük oturmalara neden olabilmektedir. Uzun süreli meydana gelen oturmalarda ikincil konsolidasyon ihmal edilmemelidir. İkincil konsolidasyon katsayısı ( $C_\alpha$ ), konsolidasyon deneyinden e-logt eğrisi yardımı ile her basınç kademesi için hesaplanabilen bir parametredir. YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile  $C_\alpha$  değerinde tespit edilen değişimler Şekil 5.28’de sunulmuştur. Doğal zeminin 200 kPa ve 400 kPa basınç kademesindeki  $C_\alpha$  değerleri sırasıyla, 0.028 ve 0.035’tir. Doğal zemine YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesiyle  $C_\alpha$  değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu durum herhangi bir zaman periyodunda doğal zeminin ikincil konsolidasyonu esnasındaki hacim değişikliğinin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> ile stabilize edilmiş doğal zemine göre daha fazla olduğu anlamına gelir.  $C_\alpha$ ’da görülen azalma %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımda daha belirgindir. Sonuç olarak, hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ikincil konsolidasyon sırasında hacim değişimlerinin azaltılmasında etkilidir.





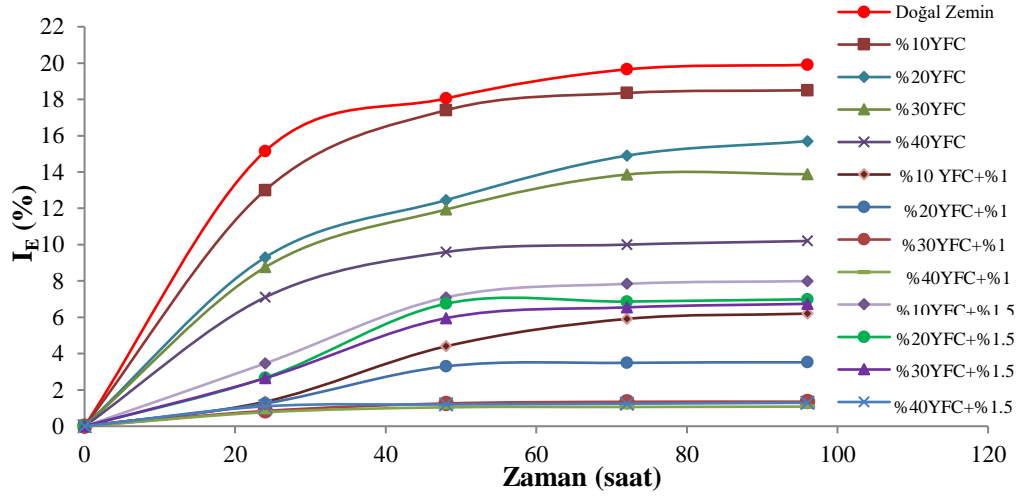
Şekil 5.28. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub>'nin C<sub>a</sub> değişimine etkisi; 200kPa (a) ve 400kPa (b)

### 5.2.5 Şişme yüzdesi deneyleri

YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> ile yapılan stabilizasyonun yüksek plastisiteli kilin şişme miktarındaki değişime etkisini araştırmak için konsolidasyon deneyleri ile şişme yüzdesi hesaplanarak değerlendirilmiştir. Deneyler, doğal zemine ağırlıkça dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ve aynı YFC oranları ile birlikte ağırlıkça iki farklı oranda (%1 ve %1.5) nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek yapılmıştır. Şişme yüzdeleri, şişme indisi (I<sub>E</sub>) hesaplanarak Eşitlik 5.4 (Day, 1993) yardımı ile hesaplanmıştır.

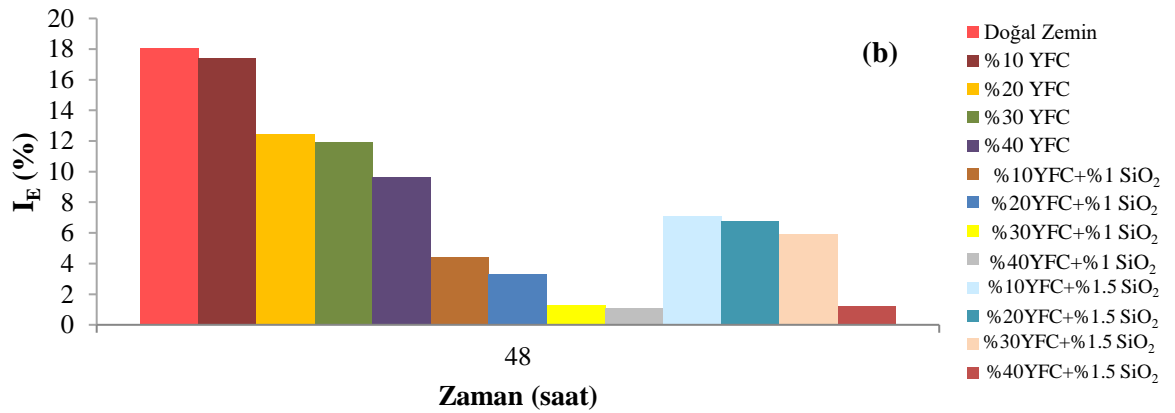
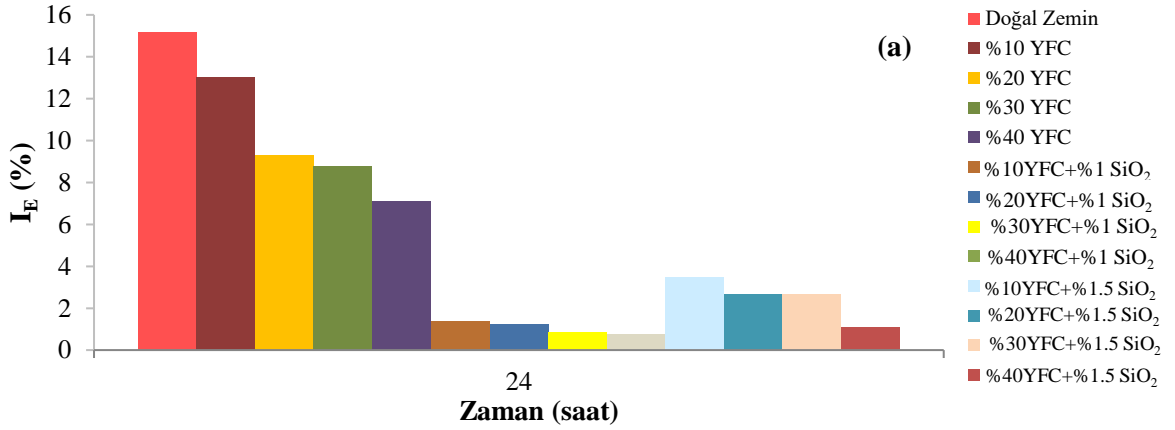
$$I_E = \frac{(h_p - h_0)}{(h_0)} \quad (5.4)$$

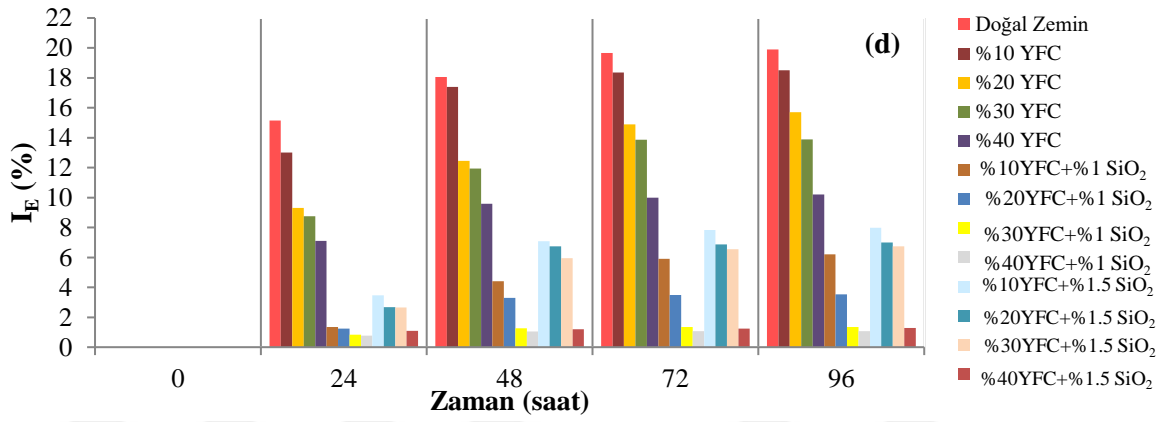
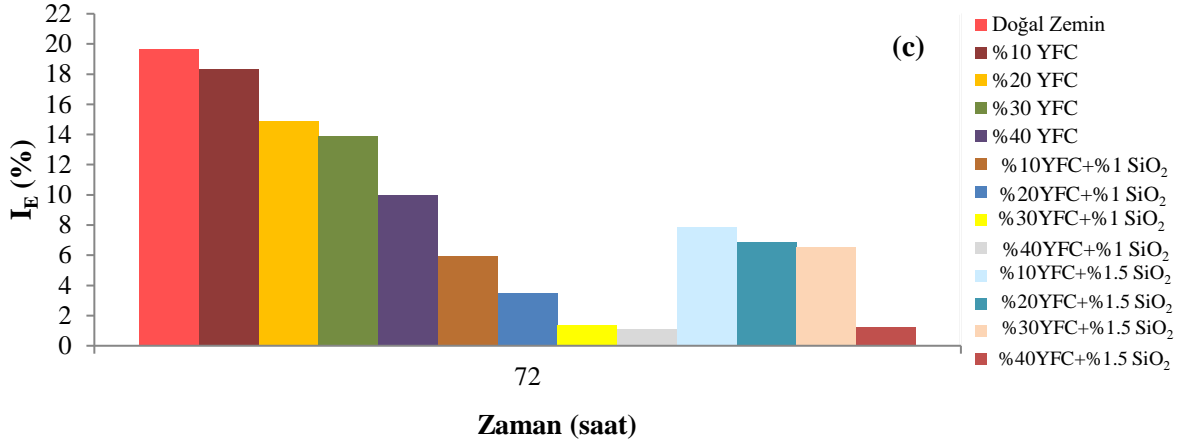
Bu kısımda belirtilen YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> oranlarında gerçekleştirilmiş olan şişme deneyleri neticesinde hesaplanan I<sub>E</sub> değerlerinin zamana bağlı değişimi karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur (Şekil 5.29). Okumalar 24, 48, 72 ve 96 saat sonrasında yapılarak meydana gelen şişme miktarları tespit edilmiştir. Okumalardan yaklaşık 72 saat sonra çoğu deneyde şişmenin yavaşlayarak azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.29. Şişme indisinin zamanla değişimi

Yapılan ölçümler saatlik olarak karşılaştırılarak malzemelerin şişme miktarının azaltılmasına etkisi zamana bağlı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.30).





**Şekil 5.30.** Şişme indisi değerlerinin karşılaştırılması; 24 saat (a), 48 saat (b), 72 saat (c) ve 96 saat (d)

Doğal zeminde 96 saat sonra meydana gelen  $I_E$  değeri %19.9 iken, bu şişme değeri yapılan stabilizasyon ile %1 mertebesine indirilmiştir. Doğal zemine sadece YFC ilave edilmesi ile artan YFC oranları ile tüm saatlik şişme ölçümlerinde azalma görülmüştür. Yüksek plastisiteli doğal zemin içine YFC ilave edilmesi ile plastisitede meydana gelen azalmaya paralel olarak şişme miktarında da paralel azalma meydana gelmiştir. YFC ile birlikte %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanılması durumunda artan YFC ile birlikte şişmede daha belirgin bir azalma görülmüştür. Bu oranda en iyi iyileşme %40 YFC ile gerçekleşmiştir. Nano-SiO<sub>2</sub>'nin %1.5 oranına artırılması durumunda, doğal zemine göre şişmede büyük oranda azalma görülürken, %1 nano-SiO<sub>2</sub>'ye göre daha fazla şişme meydana gelmiştir. Doğal zemine %1 nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesinin, %1.5 oranına göre şişmenin azaltılmasında daha etkili olduğu görülmektedir. Sonuç olarak her iki nano malzeme oranı içinde YFC oranının artması ile daha iyi stabilizasyon sağlanmıştır.

## BÖLÜM VI

### SONUÇ VE ÖNERİLER

- Likit limit deneyi ilk olarak doğal zemine yapılmış ve doğal zeminin likit limiti %106.61 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiğinde likit limit değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Likit limit değerindeki en büyük azalma %40 YFC oranında, %37.36 (%106.61 dan %69.25'e) olarak elde edilmiştir.
- Doğal zemine YFC ile birlikte iki farklı oranda nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi durumunda da likit limit değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu azalmaların en büyük değerleri %40 YFC ile %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %32 (%106.61 dan %74.61'e) ve %40 YFC ile %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %36.41 (%106.61 dan %70.2'ye) olarak tespit edilmiştir. YFC ile %1 ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının sadece YFC kullanımına göre likit limit değerlerini bir miktar attırdığı tespit edilmiştir.
- Likit limitin yüksek olması zeminin büyük hacimsel değişimler yapabilmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle bu değer azaltılması yapılan stabilizasyonun etkinliğinin göstergesidir. Yapılan tüm deneyler sonucunda sadece YFC ve YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımlarının likit limit değerlerini azalttığı, ancak YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının ayrıca likit limitin azaltılmasında katkı sağlamadığı tespit edilmiştir.
- Plastik limit deneyleri, likit limit deneylerine benzer şekilde, ilk aşamada doğal zemine yapılmıştır. Doğal zeminin plastik limit değeri %24.13 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiğinde plastik limit değerinin azaldığı, bu azalmanın en büyük değerinin % 19.02 olduğu ve %40 YFC oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- YFC ile %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında likit limit değerlerinde azalma görülürken, %20 YFC oranına kadar plastik limit değerlerinde bir miktar artış gerçekleşmiş, ardından azalmaya meydana gelmiştir. YFC ile %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında da likit limite benzer şekilde artan YFC oranları ile azalma tespit edilmiştir. YFC ile nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile gerçekleşen bu farklı davranış plastisite değerlerindeki azalmaya engel olmamıştır.

- Likit ve plastik limit değerleri kullanılarak plastisite indisinin YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> etkisi ile değişimi araştırılmıştır. Bu değerler ayrıca zeminlerin sınıflandırılmasında da kullanılmıştır. Doğal zeminin plastisite indisi değeri 82.48 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiğinde likit ve plastik limit değerlerinin her ikisinde de azalma olmasına rağmen plastik limit değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma en çok %40 YFC oranında görülmekte olup değeri % 39 mertebesindedir. Plastisite indisindeki azalma yüksek plastisiteli doğal zemine YFC ilave edilerek doğal zeminin kil miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır.
- YFC ile %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının da plastisite indisi değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu azalmanın en büyük değerleri %40 YFC ve %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %38, %40 YFC ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımında %40 olarak tespit edilmiştir.
- YFC'nin artan oranları ve  $\gamma_k$  değişimi incelendiği zaman genel eğilim olarak kuru birim hacim ağırlık değerinde azalma olduğu gözlemlenmektedir. Optimum su içeriğinde de benzer şekilde artan YFC oranları ile azalmalar tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan YFC ve doğal zeminin dane dağılımları incelendiği zaman YFC'nin doğal zemine göre daha kaba daneli olduğu görülmektedir. Görece daha kaba daneli olan YFC'nin doğal zemine artan oranlarla eklenmesi, plastisitesi yüksek olan doğal zemin içeriğindeki ince dane yüzdesini azaltmaktadır. Bu durum da zeminin su tutma kapasitesini azaltarak  $w_{opt}$  değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca  $w_{opt}$  değerindeki bu azalma %30 YFC oranında daha belirgin bir hal almaktadır.  $w_{opt}$  değerindeki azalmaya rağmen  $\gamma_k$  değerlerinde de %30 YFC oranına kadar düzenli bir azalma tespit edilmiştir. Bu durum, görece daha kaba daneli olan YFC'nin sürtünme direncinden dolayı sıkışmayı zorlaştırması olarak yorumlanmıştır.
- Yapılan deneysel çalışmalarda tüm YFC oranları için, %1 ve %1.5 SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının YFC ile birlikte kullanılması durumunda  $\gamma_k$  değerlerinin bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Bu artış YFC oranının artması ve %1.5 oranında nano-SiO<sub>2</sub> eklenmesi ile daha belirgin olmaktadır. Bu durumun dane boyutu oldukça küçük olan nano parçacıkların sıkıştırma esnasında matrislerdeki boşlukları doldurması olarak yorumlanabilir. Aynı seri deneylerde, her bir YFC oranı kendi arasında değerlendirildiği zaman  $w_{opt}$  değerlerinde artan nano-SiO<sub>2</sub> ile az

miktarlarda artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek özgül yüzeye sahip nano parçacıkların su tutma kapasitesini arttırdığını göstermektedir.

- Konsolidasyon deneyleri doğal zemini stabilize etmek için ağırlıkça dört farklı oranda (%10, %20, %30 ve %40) sadece YFC ve aynı YFC oranları ile birlikte ağırlıkça iki farklı oranda (%1 ve %1.5) nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilerek yapılmıştır. Konsolidasyon deneyleri beş yükleme, iki boşaltma kademesinden oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm konsolidasyon deney sonuçlarının sunulması tezde yoğunluk yaratacağı için, stabilizasyon ile değişimi araştırılan tüm parametreler için en yüksek iki basınç kademeleri (200kPa ve 400kPa) değerlendirilerek sunulmuştur.
- Doğal zeminin 200kPa ve 400kPa basınç kademelerindeki permeabilite değerleri sırasıyla,  $0.271 \times 10^{-8}$  ve  $0.124 \times 10^{-8}$ 'dir. Her bir karışım için 200kPa ve 400kPa basınç kademelerindeki permeabilite değerleri karşılaştırıldığı zaman, basınç kademesinin artması ile permeabilite değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Başka bir ifade ile permeabilite değeri uygulanan basınç değerinden belirgin bir şekilde etkilenmektedir.
- Görece daha kaba daneli olan YFC'nin doğal zemine artan oranlarla eklenmesi permeabilitenin artmasına neden olmuştur. Permeabilitenin artması konsolidasyon süresini azaltmaktadır. YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranlardaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kullanılması durumunda da permeabilite değerlerinde bir miktar azalma görülmüştür. Bu azalmanın nedeninin YFC arasındaki boşlukların nano malzeme ile doldurulması olduğu düşünülmektedir. Bu azalma nano miktarı arttıkça belirginleşmiştir.
- Doğal zeminin 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $c_v$  değerleri sırasıyla,  $0.574 \text{ cm}^2/\text{sn} \cdot 10^{-4}$  ve  $0.489 \text{ cm}^2/\text{sn} \cdot 10^{-4}$ 'tür. Tüm karışım oranları için 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $c_v$  değerleri karşılaştırıldığı zaman, basıncın artması ise  $c_v$  değerlerinin bir miktar azaldığı görülmüştür.
- Doğal zeminde hem YFC hem de YFC ile birlikte % 1 ve % 1.5 oranlardaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kullanımı  $c_v$  değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu durumda oluşacak konsolidasyon süresinin daha az olacağı anlamına gelmektedir. Bu durum permeabilitede meydana gelen değişime paraleldir. Her iki basınç kademesi için de genel olarak %1 nano-SiO<sub>2</sub> ile daha yüksek  $c_v$  değerleri tespit edilmiştir. Bu durumda konsolidasyon süresinin daha az olacağını göstermektedir.

- Doğal zeminin 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $m_v$  değerleri sırasıyla, 0.0473 cm<sup>2</sup>/kg ve 0.0254 cm<sup>2</sup>/kg'dır. Doğal zeminde hem YFC hem de YFC ile birlikte % 1 ve % 1.5 oranlardaki SiO<sub>2</sub> nanoparçacıklarının kullanımı  $m_v$  değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu parametrenin büyüklüğü zeminde meydana gelen oturmalar ile doğrudan ilişkili olup,  $m_v$  değerinin büyük olması zeminde daha fazla oturmaların meydana geleceği anlamını taşır. Sonuç olarak YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile oturmaların azaltılacağı tespit edilmiştir. Genel olarak, bu işlemde %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının daha etkili olduğu söylenebilir.
- Doğal zeminin 200kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $E_{oed}$  değerleri sırasıyla, 21 ve 39 kg/cm<sup>2</sup>'dir. Doğal zemine hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi ile doğal zeminin odömetre rijitliğinde artış tespit edilmiştir. Ancak, hem 200 kPa hem de 400 kPa basınç kademelerinin her ikisinde de genel olarak YFC %1 nano-SiO<sub>2</sub>'nin odömetre rijitliğinin artırılmasında daha etkili olduğu görülmektedir.
- E değeri,  $E_{oed}$  değerine bağlı olarak hesaplandığı için hem YFC hem de nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile elde edilecek elastisite modülü değişim trendleri  $E_{oed}$  ile aynı olacaktır. Sonuç olarak, tüm YFC oranlarında %1 nano-SiO<sub>2</sub> ve %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı rijitliğin artmasına neden olurken, rijitliğin artırılmasında %1 nano-SiO<sub>2</sub> , %1.5 nano-SiO<sub>2</sub> kullanıma göre daha etkili sonuç vermiştir.
- Doğal zeminin konsolidasyon deneyi sonucunda  $C_c$  değeri 0.308 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile  $C_c$  değerinde genel olarak bir azalma tespit edilmiştir. Bu durum hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının uygulanan basınca karşı daha fazla direnç göstereceği, başka bir ifade ile oturmaların azaltılmasında etkili olacağı anlamına gelmektedir. %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımı ile  $C_c$  değerinde görülen azalma %1.5 oranına göre daha fazla olduğu için, %1 nano-SiO<sub>2</sub> oturmaların azaltılmasında daha etkili olacaktır.
- Doğal zeminin konsolidasyon deneyi sonucunda  $C_s$  değeri 0.0616 olarak tespit edilmiştir. Doğal zemine YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> ilave edilmesi ile genel olarak  $C_s$  değerinde azalma tespit edilmiştir. Bu durum stabilizasyonla birlikte oturmaların azaltılacağı anlamını taşımaktadır. Ayrıca , %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının stabilizasyonda daha etkili olduğu söylenebilir.
- Doğal zeminin 200 kPa ve 400 kPa basınç kademelerindeki  $C_\alpha$  değerleri sırasıyla, 0.028 ve 0.035'tir. Doğal zemine YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> ilave

edilmesiyle  $C_a$  değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu durum herhangi bir zaman periyodunda doğal zeminin ikincil konsolidasyonu esnasındaki hacim değişikliğinin, YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> ile stabilize edilmiş doğal zemine göre daha fazla olduğu anlamına gelir.  $C_a$ 'da görülen azalma %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanımda daha belirgindir. Sonuç olarak, hem YFC hem de YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımını ikincil konsolidasyon sırasında hacim değişimlerinin azaltılmasında etkilidir.

- YFC ve nano-SiO<sub>2</sub> ile yapılan stabilizasyonun yüksek plastisiteli kilin şişme miktarındaki değişime etkisini araştırmak için konsolidasyon deneyleri ile şişme yüzdesi hesaplanarak değerlendirilmiştir. Doğal zeminde 96 saat sonra meydana gelen  $I_E$  değeri %19.9 iken, bu şişme değeri yapılan stabilizasyon ile %1 mertebesine indirilmiştir.
- YFC ile birlikte %1 nano-SiO<sub>2</sub> kullanılması durumunda artan YFC ile birlikte şişmede daha belirgin bir azalma grlmüştir. Bu oranda en iyi iyileşme %40 YFC ile gerçekleşmiştir. Nano-SiO<sub>2</sub>'nin %1.5 oranına arttırılması durumunda, doğal zemine göre şişmede büyük oranda azalma görülürken, %1 nano-SiO<sub>2</sub>'ye göre daha fazla şişme meydana gelmiştir. Sonuç olarak YFC ile birlikte nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının yüksek plastisiteli doğal zeminin şişme miktarını önemli ölçüde azaltmıştır.
- Tez sonucu elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak, YFC ile çok küçük miktarlarda nano-SiO<sub>2</sub> kullanımının zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde oldukça etkili olduğu grlmüştir. Tez alışması sonucunda öneri olarak, farklı nano malzeme türleri ve endüstriyel atıklar ile daha fazla karışım oranları kullanılarak bu alanda az miktarda yapılan çalışmalar zenginleştirilebilir. Bu uygulamaların büyük ölçekli denemeleri yapılarak uygulama yönergesi hazırlanabilir.

## KAYNAKLAR

Abhishek, A. and Ashwani J., “A review of geotechnical characteristics of nano-additives treated soils”, *Int J Adv Res Sci Eng*, 6.1: 838-43, 2017.

Ahnberg, H., Johansson, S. E., Pihl, H. and Carlsson, T., “Stabilising effects of different binders in some Swedish soils”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 7(1), 9-23, 2003.

Al, N., Zemin iyileştirme teknikleri: bir uygulama örneği, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s. 40-42, 2018.

Al-Rawas, A. A., Taha, R., Nelson, J. D., Al-Shab, T. B. and Al-Siyabi, H., “A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils”, *Geotechnical Testing Journal*, 25(2), 199-209, 2002.

Altun, S., “Zemin İyileştirme Yöntemleri, Derin Temeller ve Uygulama Örnekleri”, *İMO İzmir Şubesi*, İzmir, Eylül 2010.

Ansal, A., Zeminlerin Mühendislik Özellikleri, Lisans Üstü Eğitimi Ders Notları, *İTÜ İnşaat Müh. Fak., Geoteknik Müh.*, İstanbul, 1998.

Arslan, H., Yumuşak zeminler üzerine inşa edilen dolgulardaki problemler ve önleyici çözüm yolları, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, s. 3-4, 2006.

ASTM, D. 2435-96. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. *ASTM International*, 2000.

ASTM D 698, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, *Philadelphia PA.*, 2007.

Aydın, K., Mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kilin donma-çözülme davranışının ve kür sürelerinin tek eksenli basınç değeri üzerinde etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 20-21, 2018.

Aziz, A., Improvement of expansive soil using industrial wastes, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep, 91s., 2012.

Bilge, T., Yüksek fırın cürufu katkısının kil zeminlerin stabilizasyonuna etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 177s., 2011.

Bilgen, G. ve Çapar, Ö. F., “Devrek kilinin yüksek fırın cürufu ve kireç kullanılarak yol alt dolgusu olarak kullanımının araştırılması”, *Mersin Ulusal Çevre Sempozyumu*, 2007.

Bilgen, G., Öğütülmüş çelikhane cürufu, kireç ve deniz suyunun killerin iyileştirilmesinde kullanımı, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 278s., 2011.

Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, M., West, J. and Gordon, S. C., “Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations” *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 137-150, 2015.

Changizi, F. and Haddad, A., “Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on the geotechnical properties of cohesive soil”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(2), 725-733, 2016.

Changizi, F. and Haddad, A., “Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 170(2), 62-71, 2017.

Chen, F. H., Foundations on Expansive Soils, *Elsevier Science Pub. Co.*, Amsterdam, 1988.

Cheng, G., Zhu, H. H., Wen, Y. N., Shi, B. and Gao, L., “Experimental Investigation of Consolidation Properties of Nano-Bentonite Mixed Clayey Soil” *Sustainability*, 12(2), 459, 2020.

Choobbasti, A. J., Vafaei, A. and Kutanaei, S. S., “Mechanical properties of sandy soil improved with cement and nanosilica”, *Open Engineering*, 1(open-issue), 2015.

CIEL Publiaction, “Nanomaterials Definition Fact Sheet”, [http://www.ciel.org/wp-content/uploads/2015/07/Nano\\_definition\\_Nov2014.pdf](http://www.ciel.org/wp-content/uploads/2015/07/Nano_definition_Nov2014.pdf), 2014.

Coduto, D. P., Foundation Design Principles and Practices, *Prentice Hall*, New Jersey, 655-700, 1994.

Coduto, D. P., Geotechnical Engineering: Principles and Practices, *Prentice – Hall*, USA, 1999.

Coduto, D. P., Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar, Çeviri, Mahmutoğlu M., Kayabalı K., *Gazi Kitapevi*, 2006.

Cokca, E., Yazici, V. and Ozaydin, V., “Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement”, *Geotechnical and geological engineering*, 27(4), 489, 2008.

Çapar, O. F., Kavak, A. and Bilgen, G., "Stabilization of clay soils with lime and ground granulated blast furnace slag (GGBFS)", *The 24th International Conference on Solid Waste Technology and Management*. 2009.

Çetin, M., Değişik çevresel koşullar altında, şişen zeminlerin özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 2003.

Day, R. W., “Expansion potential according to Uniform building code”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(6), 1067-1071, 1993.

Demir, S. ve Kılıç, M., “Şişen zeminlerin tanımlanması ve zemin iyileştirme yöntemleri”, *GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(1), 95-104, 2010.

Demiröz, A. ve Karaduman, M., “Zemin iyileştirme metotları” *Selçuk-Teknik Dergisi*, 8.3: 176-192, 2009.

Ekinci A., “Zemin iyileştirme yöntemleri, zemin etüdü ve uygulama alanları”, *Department of Civil , Environmental & Geomatic Engineering*, University College London, UK, 2011.

Fell, R., Macgregor, P. and Stapledon, D., *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, **Rotterdam: A.A Balkema**, 675p., 1992.

Firat, S., Yılmaz G., Vural, İ., Khatib, J. ve Umu, S. U., “Çelikhane cürufu ile yol altyapı dolgusunun zemin özelliklerinin iyileştirilmesi”, *Mesleki Eğitimde I. Uluslararası Yapı ve Elektrik Uygulamaları Çalıştayı*, Eskişehir, ISBN 978-975-06-1861-1, s:215-223, 2016.

Gelsefidi, S., Alireza, S., Mohammad, M. S. and Hasan, B. M., “Application of nanomaterial to stabilize a weak soil”, *In Proceedings of 7th international conference on case histories in geotechnical engineering*, paper No. 6.10, pp. 1-8, 2013.

Ghasabkolaei, N., Janalizadeh, A., Jahanshahi, M., Roshan, N. and Ghasemi, S. E., “Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study”, *The European Physical Journal Plus*, 131(5), 134, 2016.

Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H. and Moghadas N. F., “Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay”, *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(2), 135-142, 2018.

Gücek, S., Mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 2011.

Güler, G., Nano malzeme içeren çimento esaslı kompozitlerin dayanıklılığının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2020.

Habiba, K., Bracho-Rincon, D. P., Gonzalez-Feliciano, J. A., Villalobos-Santos, J. C., Makarov, V. I., Ortiz, D. and Morell, G., “Synergistic antibacterial activity of PEGylated silver–graphene quantum dots nanocomposites”, *Applied Materials Today*, 1(2), 80-87, 2015.

Head, K. H., Manual of Soil Laboratory Testing, Soil Specification and Compaction Tests, *Published by John Wiley & Sons*, 2nd Edition, Vol. 1, London, 1992.

Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., An Introduction too Geotechnical Engineering, *Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs*, N.J., p. 67-78, 1981.

Iswarya, R. and Satheeskumar, V., “Influence of nano silica on the geotechnical properties of clayey soil stabilized with lime”, *Asian J Eng Appl Technol (Special Issue)*, 7(1), 28-32, 2017.

James, R., Kamruzzaman, A. H. M., Haque, A. and Wilkinson, A., “Behaviour of lime–slag-treated clay”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 161(4), 207-216, 2008.

Karakaya, M. Ç., Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri, *Bizim Büro Basımevi*, Ankara, 2006.

Karayolları Genel Müdürlüğü, “Kireç Stabilizasyonu Teknik Şartnamesi”, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, 2005.

Kavak, A., Bilgen, G. and Çapar Ö. F., “Using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) with seawater as soil additives in lime-clay stabilization”, *International Symposium on Testing and Specification of Recycled Materials for Sustainable Geotechnical Construction*, Baltimore, USA, 2011.

Khalid, N., Arshad, M. F., Mukri, M., Mohamad, K. and Kamarudin, F., “Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization”, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(2015), 731-738, 2015.

Kizirgil, M. E., Sivas demir- çelik fabrikası cürufunun yol stabilizasyonunda kullanılmasının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, s. 8-16, 2001.

Kolancılar, H., “Toprakten gelen katalizör: montmorillonit”, *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 14(1), 43-59, Edirne, 2013.

Kumar Sharma, A. and Sivapullaiah, P. V., “Improvement of strength of expansive soil with waste granulated blast furnace slag”, *In GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, (pp. 3920-3928). 2012.

Kumbasar, V. ve Kip, F., İnşaat Mühendisliğinde Zemin Mekaniği, (Capper PL ve Cassie WF çevirisi), *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul. 1984.

Malik, A., Puri, S. O., Singla, N. and Naval, S., “Strength characteristics of clayey soil stabilized with nano-silica”, *In Recycled Waste Materials*, Springer, Singapore, pp. 11-17, 2019.

Mitchell, J. K., “Stabilization of Soils for Foundations of Structures: Geotechnical Engineering”, *Department of Civil Engineering*, University of California, 1976.

Moayed, R. Z. and Rahmani, H., “Effect of Nano-SiO<sub>2</sub> solution on the strength characteristics of Kaolinite”, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Geotechnical and Geological Engineering*4., 2017.

Mostafa, A., Ouf, M. S. and Elgendy, M., “Stabilization of subgrade pavement layer using silica fume and nano silica”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(3), 573-81, 2016.

Muratoğlu, İ., Atık mermer tozu katkılı killi zeminlerin konsolidasyon ve permeabilite özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi*, Afyon, s. 8-16, 2010.

Murthy, V. N. S., Geotechnical Engineering – Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Marcel Dekker Inc*, 800- 816, 2002.

Naderi, N. and Naeini, S. A., “The influence of polymer inclusion and plasticity index on the unconfined compression strength of clays” *In Proc. of the 2nd International Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Nicosia, North Cyprus, 2009.

Neville, A. M., Properties of Concrete, *4th Edition, Longman*, London, 1999.

Nohani, E. and Alimakan, E., “The effect of nanoparticles on geotechnical properties of clay”, *International Journal of Life Sciences*, 9(4), 25-27, 2015.

Ochepo, J. and Kanyi, I. M., “Effect of nano-silica on consolidation and permeability properties of lateritic soil”, *Lautech Journal of Civil and Environmental Studies*, Volume 5, 2020.

Önalp, A., İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, Cilt II, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayın No: 3*, Trabzon, 1225s., 1983.

Önalp, A., Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2007.

Önalp, A. ve Sert S., Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri, *Birsen Yayıncılık*, ISBN: 978-975-511-465-1, İstanbul, 2010.

Öser, C., “Determining the plasticity properties of high plastic clays: a new empirical approach” *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 394, 2020.

Özaydın, K., Zemin Mekaniği, *Meya Yayıncılık*, İstanbul, 1989.

Özaydın, K., Zemin Mekaniği, *Birsen Yayınevi Ltd. Şti.*, İstanbul, 261s, 2000.

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

Pekdemir, Y., Silis dumanı, kırmızı çamur ve kireç ile muamele edilmiş mikronize bir kilin bazı geoteknik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, s. 7-8, 2013.

Preetham, H. K. and Nayak, S., “Geotechnical investigations on marine clay stabilized using granulated blast furnace slag and cement” *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(4), 28, 2019.

Priyadharshini, R. and Arumairaj P. D., “Improvement of bearing capacity of soft clay using nanomaterials”, *Int J Sci Res*, 4.6 : 218-21, 2015.

Raufi, H., Bitümlü bağlayıcı ve asfalt karışımlarının nano malzemelerle modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s. 6-11, 2018.

Rind, T. A., Karira, H., Mirani, S. A. and Mari, A. K., “Influence of ground granulated blast furnace slag on the index, compaction parameters and mechanical strength of khairpur mir’s natural soil”, *Journal of Applied Engineering Sciences*, 10(1), 83-88, 2020.

Sağlamer, A., Zemin İyileştirme Yöntemleri, *ZM11, Karadeniz Teknik Üniversitesi*, Trabzon, 2011.

Saravanan, R., Udhayakumar, T., Dinesh, S., Venkatasubramanian, C. and Muthu, D., “Effect of addition of GGBS and lime in soil stabilisation for stabilising local village roads in Thanjavur region”, *In IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 80, pp. 1-8, 2017.

Sarsılmaz, O. M., Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması, incelenmesi değerlendirilmesi ve anılan yöntemlerin seçilme kriterleri üzerine kapsamlı bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s. 8-9, 2017.

Savaş, H., Dolgu barajlar için dispersif killerin tanımlanmasında kullanılan iğne deliği deneyindeki gelişmeler ve karşılaştırmalı analizi, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 212 s., 2008.

Seyhan, İ., Kaolin, Bentonit, Kil ve Tuğla-Kiremit Toprakları Jeolojisi”, *MTA, Yayınları eğitim serisi 18*, 1972.

Sridharan, A., Rao, S. M. and Murthy, N. S., “Compressibility behaviour of homoionized bentonites”, *Geotechnique*, 36.4 : 551-564, 1986.

Şentürk, İ., Keskin, İ., Totiç, E. ve Ateş, A., “Kardemir Yüksek Fırın Cürüflarının Şişebilen Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanılabilirliği”, [http://Indexive.com/uploads/papers/pap\\_indexive/07/15941981912147483647.pdf](http://Indexive.com/uploads/papers/pap_indexive/07/15941981912147483647.pdf), 2004.

Şentürk, İ., Zemin iyileştirilmesinde cürüfların kullanılabilirliği ve performansının karşılaştırmalı analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 77s., 2019.

Tarhan, Ö., Gökmen, V. ve Harsa, Ş., “Nanoteknolojinin gıda bilim ve teknolojisi alanındaki uygulamaları”, *Gıda*, 35(3), 219-225, 2010.

Taşçı G., Problemlili kil zeminin geoteknik özelliklerine silis dumanı ve kireç katkısının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2011.

Tokay, M. ve Erdoğan, K., “Cürüflar ve Cürüflü Çimentolar”, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 2002.

Topçu, İ. B. ve Canbaz, M., “Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Atığı Silis Dumanının Hazır Betonda Kullanımı” , *Osmangazi Üniv., İnşaat Müh. Böl.*, <http://canakkale.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11145.pdf>, 2004.

TS 1900-1. “Methods of testing soils for civil engineering purposes in the laboratory- Part 1: Determination of physical properties”, 2006.

Tumluer, G., Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 71-74, 2006.

Tunç, A., Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamalar, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 2002.

Ural, N., “The Importance of Clay in Geotechnical Engineering”, *Current Topics in the Utilization of Clay in Industrial and Medical Applications*, 83, 2018.

URL-1 <https://nanoteknoloji.org/tag/nanomalzemelerin-siniflandirilmesi/>, Kasım, 2020.

Uzuner, B. A., Temel Zemin Mekaniği, *Teknik Yayın Evi*, Ankara, 1988.

Uzuner, B.A., Temel Zemin Mekaniği, *Teknik Yayınevi*, Ankara, 1997.

Ünver, E., Problemlerli zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, s. 55-56, 2015.

Varlıorpak, Ç., Tanyel, S. ve Eren, A., “Yol Üst Yapımında Cüruf Kullanımı”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, s:129-139, 1995.

Veith, G., "Essay competition: Green, ground and great: soil stabilization with slag." *Building Research & Information*, 28.1 s: 70-72, 2000.

Vural, P., Şişme ve dispersif karakteristikteki kil zeminlerin mühendislik özelliklerine çimento ve zeolitin(doğal puzolan) etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 139s., 2012.

Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B. and Humphreys, I., “Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates” *Clay Minerals*, 31(3), 423-433, 1996.

Yadu, L., and Tripathi, R. K., “Effects of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil”, *Procedia Engineering*, 125-131, 2009.

Yavaşcan, S., İnce daneli zeminlerin endüstriyel atık maddeleri ile iyileştirilme potansiyelinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 188s., 2010.

Yıldırım, B. ve Kuloğlu N., “Ergani bakır işletmeleri reverber cürufunun yol üst yapısının temel ve alt temel tabakalarında kullanımı üzerine bir araştırma”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, s:255-265, 1993.

Yılmaz, M. K., ve Çelik, S., “Kil zeminin şişme basıncı ve konsolidasyon özelliklerine öğütülmüş kumun etkisinin araştırılması”, *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 15(2), 2012.

Yılmaz, M., Çelikhane cürufunun yol üst yapısının iyileştirilmesinde kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 53s., 2018.

Yorulmaz, A., Mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kil zemin mukavemetinin, donma-çözülme etkisi ve zamana bağlı olarak değişiminin CBR (California taşıma oranı) deneyleri ile değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, s. 17-18, 2018.

Zamiri, G., Photoluminescent properties of TiO<sub>2</sub> nanostructures Prepared by hydrothermal method, PhD Thesis, *Universiti Putra Malaysia*, Selangor, 2013.

## ÖZ GEÇMİŞ

Vedat YILMAZ .../.../... tarihinde ....'de doğdu. İlk orta ve lise eğitimini Mardin'de tamamladı. 2014 yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2018'da mezun oldu. 2018-2019 eğitim öğretim yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimine devam etmektedir.



## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Uysal, F. ve Yılmaz, V., “Nano parçacık silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) ile yüksek fırın cürufu karışımının kompaksiyon özelliklerine etkisi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10: 307-311, 2021.

