



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

NANO-SiO₂'NİN KOHEZYONLU ZEMİNLERİN MUKAVEMETİNE ETKİSİ

RESUL MUT

Ağustos 2022

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

NANO-SİO₂'NİN KOHEZYONLU ZEMİNLERİN MUKAVEMETİNE ETKİSİ

RESUL MUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman

Doç. Dr. Firdevs Uysal

Ağustos 2022

Resul MUT tarafından **Doç. Dr. Firdevs UYSAL** danışmanlığında hazırlanan “**Nano-SiO₂'nin Kohezyonlu Zeminlerin Mukavemetine Etkisi**” 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 : Doç. Dr. Firdevs UYSAL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Baki BAĞRIAÇIK, 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 GÖKÇEK
MÜDÜR V.

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.



Resul MUT

ÖZET

NANO-SiO₂'NİN KOHEZYONLU ZEMİNLERİN MUKAVEMETİNE ETKİSİ

MUT, Resul

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: : Doç. Dr. Firdevs Uysal

Ağustos 2022, 61 sayfa

Bu tezin amacı, yüksek fırın cürufu ve nano-SiO₂ ile stabilize edilmiş yüksek plastisiteli ince daneli zeminin kompaksiyon parametreleri ve serbest basınç dayanımını (q_u) değerlendirmektir. Stabilize edilecek yüksek plastisiteli ince taneli zemini temsil etmek için kaolin (%75) ve bentonit killeri (%25) karıştırılmıştır. Sırasıyla, yüksek fırın cürufu miktarı kuru ince daneli zeminin toplam ağırlığına göre %0, %10, %20, %30 ve %40, nano-SiO₂ miktarı kuru ince daneli zeminin ağırlığına göre %1 ve %2 olarak seçilmiştir. Laboratuvar deneyleri için toplam on beş farklı cüruf ve nano karışım hazırlanmıştır. Deney malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için XRF (X-Ray Fluorescence), XRD (X-Işınları Kırınımı), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve lazer kırınım testleri yapılmıştır. Stabilize zeminlerin kompaksiyon ve mukavemet parametrelerini değerlendirmek için bir dizi laboratuvar testi (Atterberg limit, proctor ve serbest basınç dayanımı testleri) yapılmıştır. Kürleme etkisini değerlendirmek için 7, 30 ve 60 kür gününden sonra stabilize edilmiş zeminin serbest basınç dayanımı testleri de yapılmıştır. Test sonuçları, cüruf ve cüruf ile birlikte nano-SiO₂ kullanımının ince daneli zeminin yoğunluğunu arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, nano-SiO₂, cüruf ve cüruf ile birlikte nano-SiO₂ kullanımı zeminin mukavemet davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Anahtar sözcükler: Zemin stabilizasyonu, Nano-SiO₂, Yüksek fırın cürufu, Kohezyonlu zemin, Serbest basınç deneyi

SUMMARY

EFFECT OF NANO-SiO₂ ON THE STRENGTH OF COHESIVE SOIL

MUT, Resul
Niğde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Advisor: : Assoc. Prof. Dr. Firdevs UYSAL

August 2022, 61 pages

The aim of this thesis was to evaluate compaction parameters and the unconfined compressive strength (q_u) of stabilized high plasticity fine grained soil by blast furnace slag and nano-SiO₂. The kaolin (%75) and bentonite clays (%25) were mixed to represent the high plasticity fine-grained soil to be stabilized. The amount of blast furnace slag was chosen as 0, 10, 20, 30 and 40% by total weight of dry fine-grained soil and the amount of nano-SiO₂ was chosen as 0, 1 and 2% by weight of dry fine-grained soil, respectively. Totally, fifteen different slags and nano mixtures were prepared for laboratory tests. The XRF (X-Ray Fluorescence), XRD (X-Ray Diffraction), SEM (Scanning Electron Microscopy), and laser diffraction tests were performed to determine the physical and chemical properties of test materials. A series of laboratory tests (Atterberg limit, proctor, and unconfined compression strength tests) were examined to evaluate the compaction and strength parameters of stabilized soils. Unconfined compression strength tests of stabilized soil after 7, 30, and 60 curing days were also conducted to evaluate the curing effect. The results of the tests indicated that the use of slag and slag with nano-SiO₂ increased density of the fine grained soil. Also, the use of nano-SiO₂, slag and slag with nano-SiO₂ significantly improved the strength behavior of the soil.

Keywords: Soil stabilization, Nano-SiO₂, Blast furnace slag, Cohesive ground, Unconfined pressure test

ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Firdevs UYSAL 'a en içten teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM II	4
KİLLİ ZEMİNLER VE KİLLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.1 Kil Minerali Türleri	7
2.1.1 Kaolen	7
2.1.2 Montmorillonit	8
2.2.3 İllit	10
BÖLÜM III	11
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
3.1 Literatürdeki Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilizasyonu Çalışmaları	11
3.2 Literatürdeki Nano Malzemeler ile Stabilizasyon Çalışmaları	15
BÖLÜM IV	19
ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ VE ZEMİN STABİLİZASYON YÖNTEMLERİ	19
4.1 Zeminlerin İyileştirilmesi	19
4.2 Katkı Malzemeleri ile Stabilizasyon	21

4.2.1 Çimento ile stabilizasyon.....	21
4.2.2 Kireç ile stabilizasyon.....	22
4.2.3 Uçucu kül ile stabilizasyon	23
4.2.4 Mermer tozu ile stabilizasyon	24
4.2.5 Bitüm ile stabilizasyon.....	25
4.2.6 Metal cürufu ile stabilizasyon.....	26
4.2.7 Pirinç kabuğu külü ile stabilizasyon	27
4.2.8 Silis dumanı ile stabilizasyon	28
4.2.9 Nano malzeme ile stabilizasyon	29
BÖLÜM V	31
LABORATUVAR ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ ..	31
5.1 Deney Malzeme Özelliklerinin Tespiti.....	31
5.2. Nano-SiO ₂ 'nin Deneye Hazırlanma Süreci	36
5.3 Deneysel Çalışmalar ve Deney Sonuçlarının Tespiti	37
5.3.1 Standart proktor deneyleri (kompaksiyon deneyleri)	38
5.3.2 Serbest basınç deneyi.....	42
BÖLÜM VI.....	53
SONUÇLAR VE YORUM.....	53
KAYNAKLAR	55
ÖZ GEÇMİŞ	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Kil mineralinin oluşumu (Keskin, 2022).....	5
Çizelge 2.2. Kil minerali türleri (Bilici, 2017)	7
Çizelge 4.1. Zemin iyileştirme tekniklerinin sınıflandırılması (Altun, 2010)	20
Çizelge 4.2. Zemin cinsine göre önerilen kireç miktarı (Argun, 2002).....	23
Çizelge 4.3. Nano parçacık üretiminde kullanılan yöntemler (Ateş ve Bahçeci, 2015). 30	
Çizelge 5.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal içeriği	33
Çizelge 5.2. Nano SiO ₂ 'nin kimyasal içeriği.....	33
Çizelge 5.3. Nano SiO ₂ 'nin fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 5.4. Deney malzemelerinin birim hacim ağırlık değerleri.....	35
Çizelge 5.5. Hazırlanan karışımlar ve kür süreleri	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Zemin daneleri boyutlarına göre sınıflandırılması (Keskin, 2022)	4
Şekil 2.2. Kil mineralinin flokülü (a) ve dispersif (b) yapısı (Gözütok, 2015)	6
Şekil 2.3. Tetrahedron (a) ve Silikat (b) tabakaları (Gülser, 2021)	6
Şekil 2.4. Oktahedral (a) ve Oktahedral yapı (b) (Gülser, 2021).....	7
Şekil 2.5. Kaolen mineralinin yapısı (Gözütok, 2015)	8
Şekil 2.6. Montmorillonit mineralinin yapısı (Gözütok, 2015)	9
Şekil 2.7. İllit mineralinin yapısı (Gözütok, 2015)	10
Şekil 4.1. Uçucu kül (Kayan vd., 2017).....	23
Şekil 4.2. Cüruf imalatı (Anonim, Aralık 2021).....	27
Şekil 4.3. Silis dumanı üretimi (Akçaözoğlu, 2007).....	28
Şekil 4.4. Nanomalzemelerde nanoskala (Beşergil, 2021)	29
Şekil 5.1. XRD analiz sonuçları: Doğal zemin (a), Na-Bentonit (b), Kaolen (c),	34
Şekil 5.2. Deney malzemelerinin dane büyüklüğü dağılım eğrileri	36
Şekil 5.3. Ultrasonik banyo cihazı	37
Şekil 5.4. Doğal zemin sıkışma eğrisi.....	39
Şekil 5.5. YFC ile w_{opt} değerlerinin değişimi	40
Şekil 5.6. YFC ile γ_k değerlerinin değişimi	40
Şekil 5.7. YFC ile nano-SiO ₂ 'nin w_{opt} değerlerinin değişimine etkisi	41
Şekil 5.8. YFC ile nano-SiO ₂ 'nin γ_k değerlerinin değişimine etkisi.....	41
Şekil 5.9. Doğal zeminin anlık serbest basınç dayanım eğrisi.....	45
Şekil 5.10. Doğal zeminin anlık serbest basınç dayanım eğrisi.....	46
Şekil 5.11. Doğal zemine YFC katkısı ve buna bağlı kür sürelerinin etkisi.....	46
Şekil 5.12. %40 YFC oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri:	47
Şekil 5.13. %1 Nano-SiO ₂ oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c)	48
Şekil 5.14. %1.5 Nano-SiO ₂ oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: (a) anlık, 7 gün (b), 30 gün (c), 60 gün (d)	49
Şekil 5.15. YFC ile birlikte %1 ve %1.5 nano-SiO ₂ 'nin anlık dayanımına etkisi	50

Şekil 5.16. Doğal zemin + %1 nano-SiO ₂ numunelerinin YFC katkısı ve kür sürelerine göre serbest basınç dayanımları	50
Şekil 5.17. Doğal zemin + %1.5 nano-SiO ₂ numunelerinin YFC katkısı ve kür sürelerine göre serbest basınç dayanımları	51
Şekil 5.18. %1 Nano-SiO ₂ + %40 YFC oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c)	52
Şekil 5.19. %1.5 Nano-SiO ₂ + %40 YFC oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c), 60 gün (d)	52



FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Kaolen kili.....	8
Fotoğraf 2.2. Bentonit kili.....	10
Fotoğraf 4.1. Çimento ile yol dolgusu stabilizasyonu (Anonim, Ekim 2021).....	22
Fotoğraf 4.2. Kireç ile zemin stabilizasyonu (Anonim, Kasım 2021).....	22
Fotoğraf 4.3. Mermer bloğu (a) (Anonim, Mayıs 2022) ve su ile mermer bloğu kesimi (b) (Anonim, Aralık 2021).....	25
Fotoğraf 4.4. Çökeltme havuzu (Anonim, Aralık 2021).....	25
Fotoğraf 4.5. Bitüm ile stabilizasyon (Anonim, Mayıs 2022).....	26
Fotoğraf 4.6. Pirinç kabuğu (a) ve pirinç kabuğu külü (b) (Biochar, 2021).....	27
Fotoğraf 4.7. Silis dumanı (Anonim, Mayıs 2022).....	29
Fotoğraf 5.1. Deneyde kullanılan malzemeler: Nano-SiO ₂ (a), YFC (b), Kaolen (c),....	32
Fotoğraf 5.2. Doğal zemin	32
Fotoğraf 5.3. Mikro yapılar: Doğal zemin (a), YFC (b), Nano-SiO ₂ (c).....	36
Fotoğraf 5.4. Standart proktor deneyi aşamaları.....	38
Fotoğraf 5.5. Çelik numune kalıbı ve sıkıştırıcı	42
Fotoğraf 5.6. Deney numunesi hazırlama aşamaları.....	43
Fotoğraf 5.7. Küre bırakılan numuneler	43
Fotoğraf 5.8. Serbest basınç deney cihazı ve deney sonrası numune görünümleri	44

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
W_{opt}	Optimum su muhtevası
γ_{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
μm	Nanometre
q_u	Serbest basınç mukavemeti
ϵ	Eksenel birim şekil değiştirme
P_f	Göçme yükü
A_f	Düzeltilmiş alan

Kısaltmalar	Açıklama
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi
XRD	X-Işınları Kırınım Cihazı
DZ	Doğal Zemin

BÖLÜM I

GİRİŞ

Konut, ulaştırma yapıları, tünel ve baraj gibi tüm yapılar zemin üzerine veya içine inşa edilir. Zemin ve yapıların, mekanik ve dinamik özellikleri etkileşim içinde olup, bu özellikler yapı zemin etkileşimini belirlemektedir. Yapı ile temas halinde olan zeminden beklenen, yapıdan aktarılan yükleri izin verilen deformasyon sınırlarını aşmadan taşımaktır. Ancak kimi problemlili zeminler yapıdan gelen yükleri taşıyamayacak kadar zayıftırlar. Bataklık ve turbalık zeminler, gevşek kumlar, yumuşak killer, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu alüvyon zeminler zayıf zeminler olarak bilinir. Bu tür zeminlerin bulunduğu alanlarda karşılaşılan zemin koşulları projenin yapılabirliğini tayin edecek boyutta sorunlara neden olabilmektedir.

Artan kentleşme ve sanayi sebebiyle kısıtlı alana sahip şehirlerde yapı inşası için her zaman uygun alan bulunmamaktadır. Bu nedenle zayıf zeminler üzerine yapı inşa etmek zorunluluk olmaktadır. Bu zorunluluk durumu zemin açısından birçok mühendislik problemini de beraberinde getirmiştir. Bu problemlerin çözümü için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. İnşaat alanının veya zeminin değiştirilmesi, yapı tasarımının değiştirilmesi bazı çözüm yöntemleridir. Zayıf zemine sahip arazi koşullarının yerinde iyileştirilmesi de geliştirilen başka bir çözüm yöntemidir. Kimi zaman zeminin geoteknik parametrelerini iyileştirerek yüzeysel temellerin yeterli olmasını sağlayan bu iyileştirme yöntemleri ile ekonomik bir çözüm de sağlanmış olmaktadır.

Zemin iyileştirme uygulamaları zeminlerin tespit edilen özelliklerinin, belirli bir mühendislik uygulamasına yönelik farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler ile iyileştirilmesini hedefler. Bu uygulamalar zeminlerin taşıma gücünün artırılması, oturmaların azaltılması, sıvılaşma potansiyelinin azaltılması ve şişme-büzülme potansiyelinin azaltılması gibi çeşitli amaçlar için yapılır. İyileştirme çalışmaları için birçok yöntem geliştirilmiştir. Taş kolonlar, kompaksiyon, derin karıştırma, ön yükleme, stabilizasyon ve jet-grout bilinen yaygın yöntemlerdendir. Zayıf zemine sahip bir inşaat alanı için birden fazla iyileştirme yöntemi de uygulanabilir. İyileştirme yönteminin seçiminde zeminin cinsi ve yapısı, çevre koşulları, yer altı suyu durumu,

beklenen iyileşme derecesi, ekipmanlar, iş gücü temini, civar yapıların durumu ve maliyet belirleyici tasarım unsurlardır (Sarsılmaz, 2017).

Zemin iyileştirme yöntemleri genel olarak mekanik yöntemler, hidrolik yöntemler, fiziksel ve kimyasal yöntemler gibi farklı isimlerle sınıflandırılırlar. Zemin stabilizasyonu da zemine katkı malzemeleri ilave ederek zemini kimyasal olarak iyileştiren bir yöntemdir. Bu katkı malzemeleri kireç, çimento, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, bitüm, nano malzemeler ve bazı sanayi atıkları olabilmektedir. Kimyasal stabilizasyon ile bağlayıcılık, stabil yapı oluşturma, zemin parametrelerinin değiştirilmesi sağlanarak dayanımın artışı, şekil değiştirmelerin sınırlandırılması, su ve çevre koşullarına karşı direncin artırılması ve durabilitenin artışı hedeflenir.

Dünyada tüketime paralel olarak sanayileşmede artmaktadır. Sanayideki artış da birçok yan ürün ve atığın meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu atıkların depolama sorununun yanı sıra doğada kendiliğinden yok olması yüzlerce hatta binlerce yıl sürebildiği için günümüzde önemli çevre problemlerinden biridir. Bu malzemelerin hem depolama sorununu çözmek hem de çevresel sorunların önüne geçmek için bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu atık malzemelerin üretimde yeniden değerlendirilmesi hem çevre sorunlarının çözümüne katkı sağlayacak hem de ekonomik kazançlar sağlayacaktır. İnşaat sektöründe bu amaçla atıkların malzeme üretiminde kullanılması ve geoteknik özelliklerin bu atıklarla iyileştirilmesi son zamanlarda ilgi gören çalışma alanlarından biridir.

Nano malzeme terimi ilk kez 1959 yılında Richard Feynman tarafından ortaya atılmıştır. Bu nedenle kendisi nanoteknolojinin kurucusu olarak adlandırılmıştır. Sonraki yıllarda nanomalzemeler üzerine çalışmalar yapan Norio Taniguchi, 1974'te nanoteknoloji tanımını yapan ilk kişi olmuştur. Nano malzeme, boyutları 1-100 nm arasında olan parçacıklardır. Nano malzemelerin boyutu çok küçük olduğu için çeşitli üstün özelliklere sahiptir. Bu üstün özelliklere sahip olması nano malzemelerin kontrol edilebilir şekillerinin, boyutlarının ve içyapılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Tüylek, 2016). Son zamanlarda nano malzemelerin kullanımı birçok sektörde dikkat çekmeye başlamıştır. Bu malzemeler inşaat sektöründe de kullanım alanı bulmuştur. Bu alanlardan biri de geoteknik mühendisliğidir. Nano malzemelerin zemin iyileştirme çalışmalarında kullanımı güncel araştırma

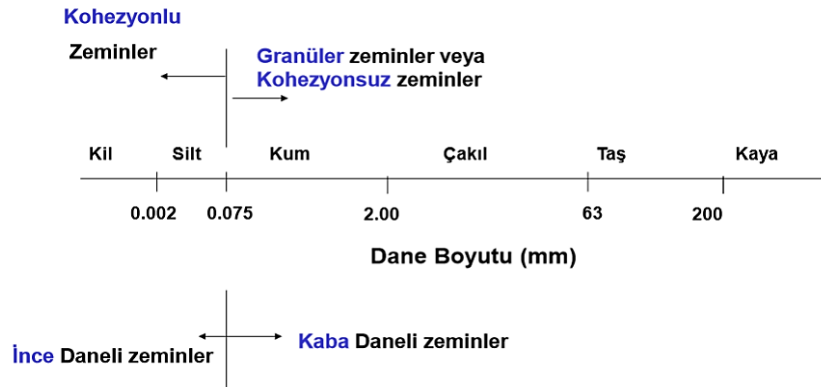
konularındandır. Yılmaz (2021), nano malzemeyi zemin iyileştirmesinde katkı malzemesi olarak kullanmış ve bu malzemenin iyileştirmeye katkı sağladığını belirtmiştir. Benzer şekilde literatürde nano malzemelerin iyileştirici katkısının olduğu yönünde çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır. Ancak bu alanda daha çok çalışma yapılarak çeşitli nano malzemelerin farklı zeminlerin stabilizasyondaki etkisi daha detaylı olarak araştırılmalıdır. Bu tez çalışması da bu alandaki eksikliklerin giderilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında stabilize edilecek yüksek plastisiteli zayıf zemini temsil etmesi amacıyla kaolen ve bentonit killeri ağırlıkça belirli oranlarda (%75 kaolen + %25 bentonit) karıştırılmış ve bu karışım doğal zemin olarak adlandırılmıştır. Doğal zemine beş farklı oranda (%0, %10, %20, %30 ve %40) yüksek fırın cürufu (YFC) ve bu YFC oranları ile birlikte iki farklı oranda (%1 ve %1.5) nano-SiO₂ karıştırılarak oluşan karışımlara kompaksiyon deneyleri yapılarak sıkışma parametrelerindeki (w_{opt} ve γ_{kmax}) değişim araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO₂ kullanımı doğal zeminin yoğunluğunu arttırmıştır. Ancak sadece YFC kullanımı nano ile birlikte kullanımından daha iyi sonuç vermiştir. Aynı YFC ve nano-SiO₂ oranları önce ayrı ayrı sonra ise birlikte kullanılarak 0, 7, 30 ve 60 gün sonrasındaki serbest basınç dayanımı (q_u) değerleri tespit edilmiştir. Deney sonuçlarına göre YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO₂ kullanımı doğal zeminin q_u değerini arttırmıştır. Ancak YFC ile birlikte nano-SiO₂ kullanımı, sadece YFC ve nano-SiO₂'ye göre daha iyi bir performans göstermiştir. Ayrıca, hem YFC hem de YFC ile birlikte nano malzeme kullanımı da doğal zeminin zamana bağlı olarak dayanımını arttırmıştır.

BÖLÜM II

KİLLİ ZEMİNLER VE KİLLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Zemin homojen ve izotrop olmayan, özellikleri jeolojik tarihçesine ve oluştuğu çevre koşullarına göre değişebilen, yer kürenin dış kısmını oluşturan daneli ve boşluklu bir yapıya sahip doğal bir malzemedir. Zeminler kayaçların fiziksel ve kimyasal olarak ayrışması sonucu oluşmaktadır. Ayrışan kayaç parçaları ile oluşan zeminler oluşumlarına göre rezidüel (yerinde oluşmuş) veya taşınarak oluşmuş zeminler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Zeminler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre iri daneli (kohezyonsuz) ve ince daneli (kohezyonlu) zemin olarak iki temel gruba ayrılır. Kum, çakıl, taş ve kaya türü zeminler iri daneli zemin olarak adlandırılırken, silt ve kil ince daneli zemin olarak adlandırılır. İnce daneli zeminler dane boyutu 0.075 mm'den küçük olan zeminlerdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Zemin daneleri boyutlarına göre sınıflandırılması (Keskin, 2022)

Killi zeminler ise magmatik kayaçların kimyasal ayrışması sonucu oluşan kil mineralinin yerinde veya taşınarak çökmesi ile oluşmaktadır (Yüksel, 2007). Killer, geoteknik mühendisliğinde dolgu barajların geçirimsizliğinin sağlanmasında, diyafram duvar imalatında kazı çukurunun desteklemesinde, ayrıca tarım, kâğıt sanayi, döküm sanayi, cam, porselen, kozmetik gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Gözütok, 2015). Geoteknik mühendisliğinde kil zeminler özellikleri açısından dikkatli olunması gereken zemin türleridir. Kilin zemin içinde az miktarda bile bulunması o zeminin davranışını etkileyebilmektedir. Kil zeminlerde hacimsel değişim (şişme-büzülme), zamana bağlı oturma (konsolidasyon oturması) ve taşıma gücü yetersizliği gibi çeşitli problemler

ortaya çıkabilmektedir. Su, kil zeminlerin birçok mühendislik özelliğini doğrudan etkilemektedir (Taşcı, 2011). Şişme-büzülme gibi hacimsel değişim problemleri su nedeni ile killi zeminlerde karşılaşılan en büyük problemlerdendir. Kimi killer su ile karşılaştığında hacminde %500'e kadar artış gösterebilmektedir (Gözütok, 2015). Bu tür zeminlerle yapı inşa edilecek alanda karşılaşılması ciddi sorunlar yaratabilir. Kil zeminin kıvamı içeriğindeki su miktarına göre değişmektedir. Kıvam, kil zeminlerin mukavemet, şekil değiştirme, sıkışma gibi temel mühendislik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca kil zeminlerde konsolidasyon, kil mineralinin yapısı nedeniyle suyun zemin içerisinde daha yavaş hareket etmesinden dolayı zaman alan bir problemdir.

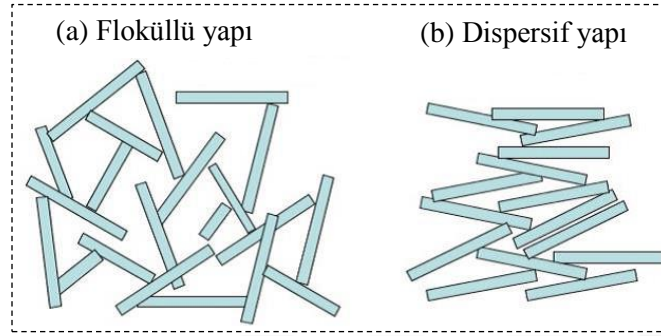
Kil, doğada fazlaca bulunan ancak saf halde bulunması zor olan alüminyum ve magnezyum silika içeriği yüksek, ince daneli sedimenter bir mineraldir. Kilin boyutu iki mikron veya altındadır. Kil daneleri ancak mikroskop ile görülebilirler. Killer aynı boyuttaki diğer minerallerle kıyaslandığında su ile şişme göstererek çamur oluşturur, kurduğunda ise hacim kaybı yaşar (Bilici, 2017). Kil minerali magmatik kayaların kimyasal ayrışması sonucu oluştuğu için kayaların ayrıştığı koşullar killerin özelliklerini belirlemektedir. Çizelge 2.1'de çeşitli kil minerallerinin oluştuğu ortam koşulları verilmiştir. Kaolinit ve montmorilonit mineralleri geoteknik mühendisliğindeki karşılaşılan önemli minerallerdir. Bu iki mineral, kil minerali olmasına rağmen ayrışma ortamlarının farklı olması nedeni ile şişme potansiyelleri farklıdır. İçeriğinde kaolinit minerali bulunduran killer düşük şişme potansiyeline sahipken, montmorilonit minerali içeren killer ise yüksek şişme potansiyeline sahiptir (Keskin, 2022).

Çizelge 2.1. Kil mineralinin oluşumu (Keskin, 2022)

Kil Minerali	Oluşum Şekli
Kaolinit	Volkanik kayaların kimyasal ayrışması ile oluşur. Genellikle sıcak ve nemli (tropik ve astropik) bölgelerde oluşur
Klorit	Başkalaşıma uğramış ana kaya alanlarında oluşur. Genellikle deniz tortularında ve çökelti kayalarda oluşur
İllit	Sıcak ve kurak bölgelerde çökelti kayaların aşınması ile oluşur
Montmorillonit	Zayıf drenaj şartlarında volkanik kül ve kayaların aşınmasıyla oluşur

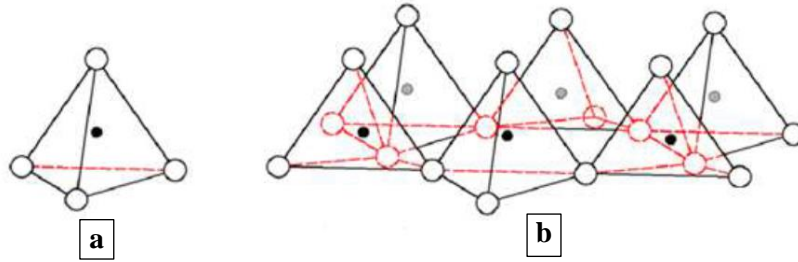
Kil mineralinin dane şekilleri levha (plaka) şeklindedir (Şekil 2.2). Üzerine herhangi bir kuvvet uygulanmamış kil daneleri floküllü yapıda bulunurken, kuvvet uygulanan kil

daneleri uygulanan kuvvete dik doğrultuda yerleşim göstererek dispersif bir yapı halini alırlar. Killerin permeabilitesi düşüktür. Bu nedenle az ve/veya geçirimsiz olarak da bilinir. Bu durumun temel nedeni kil danelerinin yapısı ve daneler arasındaki boşlukların az olmasıdır (Şekil 2.2) (Gözütok, 2015).



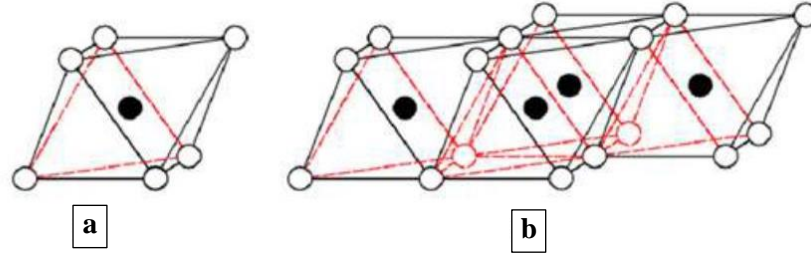
Şekil 2.2. Kil mineralinin floküllü (a) ve dispersif (b) yapısı (Gözütok, 2015)

Kil mineralinde tetrahedron (düzgün dört yüzlü) ve oktahedron (düzgün sekiz yüzlü) olmak üzere iki esas yapı vardır. Tetrahedron yapı, bir adet silis iyonuna dört adet oksijen atomunun bağlanması ile oluşan dört yüzlü ve dört köşeli bir yapıdır (Şekil 2.3.a). Bu tetrahedral yapıların başka tetrahedral yapılar ile oksijen atomlarını paylaşmaları ile silikat tabakaları meydana gelir (Şekil 2.3.b).



Şekil 2.3. Tetrahedron (a) ve Silikat (b) tabakaları (Gülser, 2021)

Oktahedron yapı da alüminyum, demir ve magnezyum gibi iyonların etrafına 6 adet oksijen ve hidroksil iyonları olacak şekilde sekiz yüzlü altı köşelidir (Şekil 2.4.a). Oktahedral oksijenlerinin diğer oktahedral birimler ile paylaşılmasından alümina tabakaları oluşmaktadır (Şekil 2.4.b). Tetrahedral ve oktahedral durumdaki kil mineralleri farklı şekillerde bir araya gelerek farklı kil çeşitlerini oluştururlar.



Şekil 2.4. Oktahedral (a) ve Oktahedral yapı (b) (Gülser, 2021)

2.1 Kil Minerali Türleri

Kil mineral türünün oluşumda etkili olan ortam koşullarıdır. Doğada birçok kil minerali çeşidi vardır (Çizelge 2.2). Kil mineralinin birçok çeşidi olsa da üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar kaolen grubu killer, illit (mika) grubu killer ve montmorillonit (smektit) grubu killerdir. Bu tez çalışmasında kaolen ve montmorillonit türü killer kullanılmıştır.

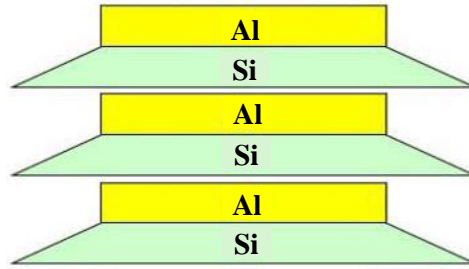
Çizelge 2.2. Kil minerali türleri (Bilici, 2017)

Grup İsmi	Mineraloji	İdeal Formülü
Kaolinit,	Kaolinit	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$
Serpantinit	Halloysit	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$
Mika	İllit	$K_2Al_3[(Si_6Al_2)O_{20}](OH)_4nH_2O$
Vermikülit	Trioktahedral vermikülit	$(Mg,Fe^{2+})[Si_7Al_8O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Montmorillonit	$M^{x+y}(Al,Fe^{2+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
Smektit	Beidellit	$M_xAl_4[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Notronit	$(M^+xFe^{3+})_{4-y}[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
	Saponit	$(M^+xMg_6)[(Si_{8-x}Al_x)O_{20}](OH)_4nH_2O$
Profilit ve Talk	Profilit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4$
	Talk	$Mg_4[Si_8O_{20}](OH)_4$
Klorit	Dombassit	$Al_4[Si_8O_{20}](OH)_4Al_4(OH)_{12}$
Paligorskit	Paligorskit	$Mg_5[Si_8O_{20}](OH)_2(OH_2)_4nH_2O$
Sepiyolit	Sepiyolit	$Mg_8[Si_{12}O_{30}](OH)_4(OH_2)_4nH_2O$

2.1.1 Kaolen

Zeminlerin çoğunda bulunan kaolen kil grubuna birçok kil minerali girmektedir. Kaolen mineralinin kristal yapısı düz kristal tabakalar halinde ve levha şeklindedir. Kaolen mineralinin yapısı, basitçe bir oktahedral ve bir tetrahedral tabakanın üst üste

tekrarlanmasıyla meydana gelen katmanlarından oluşur (Şekil 2.5). Bu yapı, iki tabakanın tekrarından oluştuğu için 1:1 şeklinde gösterilir. Kaolen kristalinin kalınlığı 0.72 nm olan temel bir tabakadan oluşmaktadır. Birbiri ardına gelen bu tabakalar oktahedron tabaka hidroksili ve tetrahedron tabakanın oksijeni arasında meydana gelen hidrojen bağı ile tutunur. Hidrojen bağı kuvvetlidir ve hidrasyonu önler. Kaolen genelde beyaz renklidir ve plastik özellik gösterir (Fotoğraf 2.1). Bu kil, X ışınları veya optik ışınlar ile ayırt edilebilirler (Gözütok, 2015).



Şekil 2.5. Kaolen mineralinin yapısı (Gözütok, 2015)

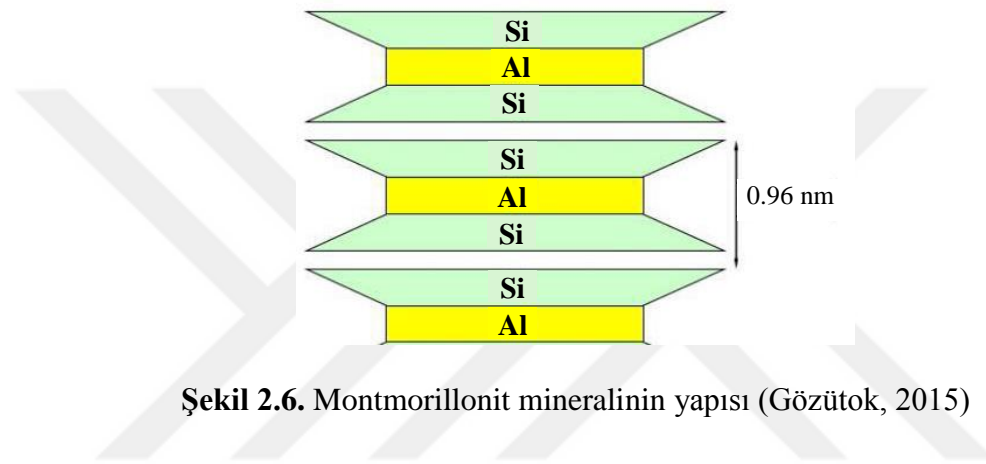


Fotoğraf 2.1. Kaolen kili

2.1.2 Montmorillonit

Montmorillonit, 2 tetrahedral tabaka arasına 1 oktahedral tabakanın yerleşmesi ile oluşmaktadır (Şekil 2.6). Tabakalar arasındaki van der Waals bağlarının zayıf olmasından dolayı su, tabakalar arasına kolayca girer ve tabakaların birbirinden kolaylıkla ayrılmasını sağlar. Bu durum bu tür killerin su ile büyük hacimsel değişim yapabilmelerini sağlar. Montmorillonitler, hacminin 20 katına kadar suyu bünyesine alabilmektedir. Diğer kil minerallerine kıyasla, bu tür killerin su ile olan etkileşimleri

çok yüksektir. Montmorillonit mineralleri doğada yaprak plaka şeklinde bulunurlar. Bu minerallerin plastisite ve hacim değiştirme özellikleri yüksektir. İzomorf yer değiştirme (tetrahedral veya oktahedral tabaka arasındaki katyonların yerlerinin başka bir katyon tarafından alınması) kil minerallerin davranışlarını büyük ölçüde değiştirmektedir. İzomorf yer değiştirme sebebiyle şişen zeminlerde bulunan kil mineralleri, mineral yüzeyinde net negatif yük taşımaktadır. Bu durumda bulunan kil mineral tabakaları su ve katyonları tutma konusunda isteklidir. Angın (2005), şişen killerin hacim değişiminin kil minerali yapısı, kil danelerinin miktarı ve dizilişine bağlı olduğunu belirtmiştir.



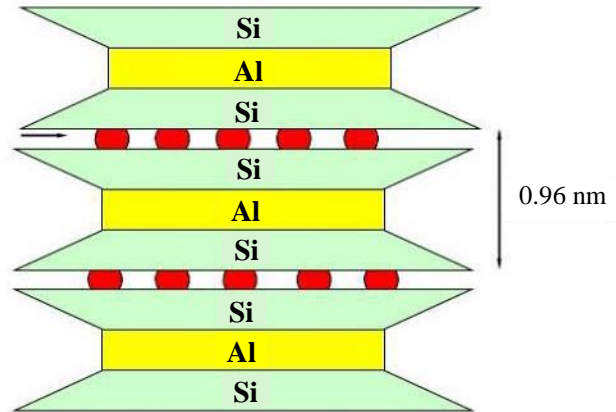
Bentonit kili, montmorillonit türü bir kildir. Bentonit ilk defa 1873 yılında William Taylor tarafından sabun kili olarak keşfedilmiş, Rock Creek sahasındaki Ford Benton formasyonunun keşfedilmesiyle bentonit adı verilmiştir. 1874 yılında Fransa'nın Montmorillan bölgesinde aynı özelliğe sahip kil minerali bulunmuş ve bu kil mineraline montmorillonit adı verilmiştir. Su ile jelimsi bir hal alması ve hacim kazanarak şişmesi ile ayrılan bu kil daha sonra W.C. Knight tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bentonit, hacminin %500'üne kadar suyu tutabilmektedir ve bu nedenle zeminlerin suya karşı geçirimsizliğinin sağlanması için kullanılmaktadır. Gözütok (2015), bentonitin baraj gibi su geçirimsizliği istenen yapılarda sızdırmazlık sağlayabildiğini belirtmiştir. Ayrıca bentonit sondaj, fore kazık ve diyafram duvar kuyularının desteklenmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bentonitin kullanım alanının yaygınlaşması ile ticari üretimi de artmıştır (Bilge, 2011). Bu tez çalışmasında bentonit kili kullanılmıştır (Fotoğraf 2.2).



Fotoğraf 2.2. Bentonit kili

2.2.3 İllit

İllit, mikaya benzerlik gösteren bir kil mineralidir ve şeyllerin ayrışması ile oluşur (Angın 2005). İllit minerali, 2 tetrahedral tabaka arasına 1 oktahedral tabakanın bağlanması ile oluşmaktadır (Şekil 2.7). Oktahedral ve tetrahedral tabakalar potasyum (K) iyonları ile bağlanır. İllitin yapısı, montmorillonit ile aynıdır ancak yapı blokları arasındaki potasyum iyonları bağın bir miktar kuvvet kazanmasını sağlar ve su moleküllerinin tabakalar arasına girmesini bir miktar önler. Bu mineral su ile karşılaştığında montmorillonit gibi şişmez ancak genişler.



Şekil 2.7. İllit mineralinin yapısı (Gözütok, 2015)

BÖLÜM III

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında, yüksek fırın cürufu (YFC) ve YFC ile nano-SiO₂'nin birlikte kullanılması ile yüksek plastisiteli zayıf bir zeminin stabilizasyon çalışması yapılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiği zaman YFC ve nano-SiO₂'nin stabilizasyondaki performansının araştırıldığı çalışmaların yer aldığı görülmektedir. Ancak bu iki malzemenin birlikte kullanıldığı sınırlı sayıda çalışmaya rastlanılmıştır. Bu bölümde, YFC ve nano-SiO₂'nin stabilizasyondaki performansının değerlendirildiği çalışmalar iki farklı başlık altında sunulmuştur.

3.1 Literatürdeki Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilizasyonu Çalışmaları

Literatürde yer alan ve YFC ile ilgili stabilizasyon çalışmalarını içeren çalışma örnekleri aşağıda verilmektedir.

Bilge (2011), kil zeminlerin uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireç ve zeolit ile stabilizasyon performansını araştırmıştır. Kil zemin olarak bentonit kullanılmıştır. Kil zemine %10 kireç ve %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül, YFC ve zeolit ilave edilmiştir. Oluşturulan bu karışımlara hidrometre, özgül yoğunluk, kıvam limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca karışımlar, 7 ve 28 günlük küre bırakılmıştır. Sonuç olarak stabilizasyonda kullanılan tüm katkı malzemelerinin kilin plastisite indisini azalttığı görülmüştür. Kireç olmayan yüksek fırın cürufu karışımlarda cüruf miktarı arttıkça plastik limitin arttığı görülmüştür. Plastisite indisinin en düşük değeri %100bentonit, %15YFC ve %15zeolit karışımında gözlemlenmiştir. Karışımların özgül yoğunluklarının katkısız kile göre arttığı tespit edilmiştir. Kompaksiyon deney sonuçlarına göre en iyi su muhtevası %100bentonit, %15YFC ve %10kireç karışımında elde edilmiştir. YFC katkısının su içeriğini düşürdüğü ve kuru birim hacim ağırlığı arttırdığı görülmüştür. Küre bırakılan numuneler arasında en yüksek mukavemet %100bentonit, %15YFC ve %15zeolit karışımında elde edilmiştir.

Bilgen vd. (2012), çelikhane cürufunun kil bir zeminin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesine katkısı, kireç ile etkileşimi ve en uygun karışım oranı araştırılmıştır. Çalışmada, Kocaeli-Adapazarı ili Uzunçiftlik beldesinde bulunan düşük plastisiteli bir kil kullanılmıştır. Bu kile farklı oranlarda YFC ve kireç karıştırılarak ASTM D4609 standardına göre kimyasal zemin stabilizasyonunda uygulanan deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre Uzunçiftlik kilinin basınç dayanımı 279kPa elde edilmiş ve bu basınç dayanımında %15 şekil değiştirme tespit edilmiştir. Bu kile %3.33 oranında YFC eklenmiş ve 28 gün kür sonunda basınç dayanımı 960kPa değerine ulaşmıştır. %5 kireç karıştırılarak hazırlanan numunenin basınç dayanımı da 2700kPa olarak belirlenmiştir. %5 kireç ve %3.33 YFC katkısı ile hazırlanan karışımın serbest basınç dayanımı 4000kPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu numunenin birim şekil değiştirme değeri yaklaşık %2'lere kadar düşmüştür. Aynı karışımın CBR değeri de 23 kat artmıştır. Yapılan çalışmada YFC'nin zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılması durumunda zeminin geoteknik özelliklerini olumlu yönde iyileştirdiği, kireç ile beraber kullanıldığında ise daha etkili olduğu görülmüştür.

Yadu ve Tripathi (2013), YFC'nin zayıf zeminleri iyileştirme potansiyelini araştırmıştır. CL-ML olarak sınıflandırılan ve zayıf zemin özelliklerine sahip zemin örnekleri Hindistan'dan temin edilmiştir. Bu zemine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında YFC karıştırılmıştır. YFC ile stabilize edilen zeminin performansı plastisite indisi, özgül ağırlık, serbest şişme indisi, kompaksiyon, şişme basıncı, CBR değerleri ve serbest basınç dayanımı açısından değerlendirilmiştir. Dayanım deney sonuçlarına göre optimum YFC oranı %9 olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, YFC katkısının zayıf zeminin dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. %9 YFC katkısı ile zeminin serbest basınç dayanımının katkısız zeminin dayanımından %28 daha fazla olduğu elde edilen sonuçlardan biridir. Benzer şekilde CBR sonuçlarında da önemli ölçüde iyileşmeler görülmüştür.

Goodarzi ve Salimi (2015), şişme potansiyeli olan zeminlerin stabilizasyonunda granüler yüksek fırın cürufu (GYFC) ve bazik oksijen fırın cürufunun (BOFC) etkinliği ve potansiyel kullanımını araştırmıştır. Bu amaçla %2.5 ile %30 arasında değişen cüruf katkısı ile numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikro yapılarındaki değişimleri tespit etmek için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, %10'un üzerinde BOFC katkısının zemindeki şişmeyi ortadan

kaldırıldığı tespit edilmiştir. Kür sürelerinin artması ile karışımların dayanımlarında iyileşmeler görülmüştür. Puzolanik reaksiyonlar nedeniyle oluşan çimentoya benzer bileşiklerin zemin formasyonunun iyileşmesine katkısı XRD ve SEM analizleri ile doğrulanmıştır. GYFC'nin BOFC ile karşılaştırıldığında daha az aktif olduğu, bu nedenle de zeminin mühendislik parametrelerinin iyileştirilmesinde daha az etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, daha iyi bir performans için daha yüksek oranlarda GYFC kullanılmasının gerektiği vurgulanmıştır. Genel olarak bu çalışmada kullanılan BOFC'un stabilizasyonda daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Şentürk (2016), YFC'nin zemin özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanımını araştırmıştır. İyileştirilecek zemin olarak bentonit kullanılmıştır. Bentonite %5, %10, %15 ve %20 oranlarında YFC ilave edilmiş ve optimum su içeriğinde numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere 1, 7, 14 ve 28 gün kür uygulanmış ve kür sonunda kıvam limitleri, kesme kutusu, serbest basınç dayanım ve şişme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuca göre YFC'nin kuru birim hacim ağırlığı arttırdığı, optimum su muhtevasını azalttığı tespit edilmiştir. Likit limit değerinde, YFC miktarı ve kür süresine bağlı olarak azalmalar görülmüştür. Serbest basınç dayanımlarının 28 günün sonunda arttığı, %5YFC ile hazırlanan numunenin basınç dayanımının 6 katına kadar çıktığı görülmüştür. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerinin 28 günlük kür sonunda katkısız bentonite göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Bazı katkı oranlarında şişme değerleri katkısız bentonite yakın olsa da genel anlamda cüruf katkısının bentonitin şişme değerlerini iyileştirdiği ve dayanımın artışında önemli ölçüde katkı sağladığı görülmüştür.

Develioğlu ve Pulat (2017), bu çalışmada iki farklı dane boyutuna sahip zeminin YFC ile iyileştirme performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, taşıma kapasitesindeki değişim ile zeminin dane boyutu arasındaki ilişki araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda dane dağılımı, özgül ağırlık, pH, optimum su muhtevası, kıvam limitleri ve kuru birim hacim ağırlık değerleri ASTM standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. İri ve ince dane dağılımına sahip zeminler için CBR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, numunelerin hazırlanmasında sıkıştırma enerjisinin etkisini araştırmak için standart ve modifiye proktor deneyleri ile numuneler hazırlanmıştır. Numuneler boşluk suyunun taşıma gücüne etkisini belirlemek üzere deniz suyu ve musluk suyu ile hazırlanmıştır. Bu numunelere 96 saat kür sonrasında CBR deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar

sıkıştırma enerjisinin CBR performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Modifiye proktor enerjisi ile hazırlanan numunelerin standart proktor enerjisi ile hazırlanan numunelerden 2.2 kat daha büyük CBR değerine sahip olduğu görülmüştür. İnce daneli numunelerin iri daneli numunelerden daha fazla taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, deniz suyu ile hazırlanmış numunelerin CBR değerlerinin %17 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak YFC'nin mühendislik uygulamalarında etkili olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

Türedi vd. (2017), bu çalışmada demir çelik endüstrisinde yan ürün olarak açığa çıkan çelikhane cürufunun (BOF cürufu) %0, %5, %10, %15, %20, %50, %75 ve %100 oranlarında kil zemine katkısı ile CBR değerlerindeki değişim incelenmiştir. Yapılan seri deneylerde 2.5mm ve 5.0mm oturmaya karşılık gelen CBR değerleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları kil zemine BOF cürufu katkısının CBR değerlerini yaklaşık 3 kat arttırdığı, en iyi sonucun ise %30 ve %40 BOF oranlarında elde edildiği görülmüştür.

Bilici (2020), bu çalışmada uçucu kül ve YFC'nin stabilizasyondaki etkisi araştırılmıştır. Bu atık malzemeler zemine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında karıştırılmıştır. Bu karışımların puzolanik reaksiyonunu sağlamak amacıyla karışımlara %3 kireç ilave edilmiştir. Hazırlanan bu karışım numunelerinin bir kısmına 7 ve 28 gün kür uygulanırken, bir kısmına da kür uygulanmaksızın serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek serbest basınç dayanım değeri %3 kireç ve %12 UK, %3 kireç ve %9YFC karışımlarında elde edilmiştir. Kür sürelerine göre bir karşılaştırma yapıldığında kür uygulanmayan serilerde en yüksek dayanımların çok yakın olduğu, kür süresi arttıkça uçucu kül içeren karışımların dayanımlarında artış olduğu, bu artışların YFC içeren karışımlardan daha fazla olduğu görülmüştür.

Geçkil vd. (2020), bu çalışmada YFC kullanılarak zemin stabilizasyonu yapılmış killi bir yol taban zeminin yol üst tabaka kalınlıklarına etkisi araştırılmıştır. Killi zemine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranların YFC karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere serbest basınç, standart proktor ve CBR deneyleri uygulanarak en yüksek dayanım veren YFC oranı belirlenmiştir. Belirlenen bu oran ile AASHTO 1993'e göre stabilize edilmiş zemin üzerine inşa edilecek yol esnek üst yapısı kalınlıkları ve maliyetleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde kil zeminin

dayanımında iyileşmeler olduğu, en yüksek dayanımın %20YFC katkısında elde edildiği görülmüştür. Yapılan kıyaslamalar ile %20YFC'nin katkısız killi zemine kıyasla yol üst esnek tabaka kalınlıklarını %26.67 oranında azalttığı görülmüştür.

3.2 Literatürdeki Nano Malzemeler ile Stabilizasyon Çalışmaları

Literatürde yer alan ve nano malzemelerin stabilizasyon çalışmalarında kullanıldığı çalışma örnekleri aşağıda sunulmuştur.

Alireza vd. (2013), bu çalışmada zayıf zeminlerin nano malzemelerle stabilizasyonu araştırılmıştır. Düşük plastisiteli zayıf zemin olarak İran'ın kuzeyindeki Boodian yol zemini kullanılmıştır. Bu çalışmada 50 adet CBR deneyi yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında zayıf zeminlerin stabilizasyonunda kirecin etkileri araştırılmıştır. Sonuçlara göre kirecin zemin stabilizasyonunda küçük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. İkinci aşamada, kireç ile stabilize edilmiş zeminde nano-silika etkileri çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, zemin kireç karışımında nano-silikanın önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmalarda nano-silika katkısı zeminin ve zemin kireç karışımının CBR dayanımını sırasıyla 21 ve 7.5 kat arttırmıştır. Bu çalışma kapsamında kür süresinin etkileri ayrıca değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre ise, kireç katkısı ile CBR dayanımının nanomalzeme katkısına göre daha hızlı arttığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda Boodian zemininin stabilizasyonu için optimum karışım oranı %5 kireç ve %3 nano-silika olarak tespit edilmiştir.

Bahmani vd. (2014), çimento ile iyileştirilmiş rezidüel zeminlerin kıvam, kompaksiyon, hidrolik iletkenlik ve basınç dayanımında nano-SiO₂ parçacıklarının etkilerini değerlendirmiştir. Ayrıca SEM, XRD ve FTIR analizleri de yapılmıştır. Nano-SiO₂ parçacıklarının katkısının hidrolik iletkenliğe ve sıkışabilirliğe olumlu etkiler sağladığı tespit edilmiştir. Çimento ile iyileştirilmiş zemine %0.4 nano-SiO₂ katkısı basınç dayanımını %80'e kadar arttırmıştır. Ayrıca, XRD, FTIR ve SEM sonuçları da nano-SiO₂ parçacıklarının puzolonik reaksiyonu arttırdığını göstermiştir.

Majeed vd. (2014), yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda çeşitli nano malzemeler kullanarak zemin özelliklerindeki değişimleri araştırmıştır. İki farklı bölgeden getirilen yumuşak zemini stabilize etmek için nano-bakır, nano-kil ve nano-magnezyum

kullanılmıştır. Nano malzemeler zemine küçük miktarlarda (<%1.0) eklenmiştir. Araştırmalarda Atterberg limitleri, lineer rötire, kompaksiyon ve drenajsız basınç dayanımı değerleri araştırılmıştır. Araştırma sonuçları maksimum kuru birim hacim ağırlık, plastisite indisi, lineer rötire, drenajsız basınç dayanımında önemli ölçüde iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Bu iyileşmelerin nano malzeme türüne göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Drenajsız basınç dayanımı ve maksimum kuru birim hacim ağırlık nanomalzeme miktarının artması ile artış göstermiştir. Sonuç olarak nano malzemelerin düşük miktarda kullanımının bile zeminin özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Yeganeh Rikhtehgar (2016), bu çalışmada nanokarbon lif, nano kil, nano silis tozu, CBR Plus nanopolimeri ve Zikosil gibi farklı nano malzemeler kullanılmıştır. Altı farklı oranda kile karıştırılan bu malzemeler ile zeminin mühendislik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Karışımların Atterberg limitleri, kayma mukavemeti, konsolidasyon, permeabilite ve ıslak CBR parametreleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, farklı oranlarda kullanılan nano malzeme ve nano polimerler numunelerin mukavemetini arttırırken, konsolidasyon ve şişme potansiyellerini azaltmıştır. Nano malzeme miktarındaki artış, CBR değerlerini de arttırmıştır. Nano polimerler bu artışa daha fazla katkı sağlamıştır. Konsolidasyonlu drenajsız olarak yapılan üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, nano malzeme ve polimerlerin içsel sürtünme açısında değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. Zikosil haricindeki tüm katkı malzemeleri numunelerin kohezyon değerlerinde artış meydana getirmiştir. Ancak, yapılan direk kesme deneylerinde içsel sürtünme açısında artış gözlenmezken, kohezyonun arttığı tespit edilmiştir.

Changizi ve Haddad (2017), nano-SiO₂ kullanarak stabilize edilen zeminin Atterberg limitleri, maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası, CBR, konsolidasyon ve serbest basınç dayanımını değerlerini araştırmıştır. Düşük ve yüksek likit limit değerlerine sahip kil zeminlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için nano-SiO₂ parçacıkları kullanılmıştır. Zemine %0.5, %0.7 ve %1 oranlarında nano-SiO₂ karıştırılmıştır. Atterberg limitleri ve CBR değerinde artan nano-SiO₂ oranı ile iyileşmeler tespit edilmiştir. Ayrıca, artan nano-SiO₂ oranları plastisite indisinde azalmaya ve rötire limitinde de artışa neden olmuştur. Zemindeki oturmaların azaltılması zemin-katki etkileşimindeki viskoz jel ile ilişkilendirilmiş ve stabilize edilen zeminin ön

konsolidasyon basıncında azalmalar belirlenmiştir. Deney sonuçları %0.7 nano-SiO₂ ile stabilize edilen bir zeminde viskoz jelin yumuşak kil zeminlerde ön konsolidasyon basıncını 70 kN/m² den 300 kN/m²'ye kadar arttırdığını göstermiştir. Drenajsız basınç dayanımında da %56'ya kadar artış tespit edilmiştir.

Aksu ve Eskişar (2019), kil ve killi kum zeminlere nano-SiO₂ eklemiş, bir dizi deney yaparak zeminlerin endeks ve mukavemet parametrelerindeki değişimleri değerlendirilmiştir. Zemine kuru ağırlığının %0, %5 ve %10'u kadar çimento ile yine zeminin kuru ağırlığının %0, %0.3, %0.5 ve %0.7'si kadar nano-SiO₂ ilave edilmiştir. Nano-SiO₂ katkılı zeminlerin Atterberg limitleri, kompaksiyon özellikleri ve serbest basınç dayanımı değerlerinde iyileşmeler saptanmıştır. 7 gün kür uygulanan çimento ve nano-SiO₂ katkılı kil ve killi kum zeminlerin en büyük likit ve plastik limit değerlerine farklı nano-SiO₂ içeriklerinde ulaştığı görülmüştür. Çimento katkılı kil ve killi kum zeminlere nano-SiO₂ eklenmesi ile numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri artmıştır. %5 ve %10 çimento katkılı kil zeminlerin her ikisinde de en yüksek basınç dayanımına %0.5 nano-SiO₂ içeriğiyle ulaşılmıştır. %5 çimento katkılı killi kum zeminlerde ise nano-SiO₂ miktarı arttıkça zeminin basınç dayanımı artmaya devam etmiştir. Katkısız zemin ile stabilize edilmiş zeminlerin dayanımları karşılaştırıldığında, stabilizasyon ile serbest basınç dayanımı değerlerinin 5-10 katı fazla değerlere ulaşmak mümkün olmuştur.

Rosales vd. (2020), bu çalışmada ticari nanomalzemeler şişen zeminlerin taşıma kapasitesi ve çeşitli mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu amaçla tam ölçekli bir arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. Nano malzeme ile stabilize edilmiş yolun performansı, katkısız kontrol kesitine göre araştırılmıştır. Çalışma ile basınç dayanımı ve CBR değerlerinde önemli ölçüde iyileşme görülmüştür. Çalışma sonucunda stabilizasyonun yol kesitinin tabaka kalınlığının ve kullanılacak mekanik araç gereksinimini azaltılmasına katkı sağlayacağı vurgulanmıştır.

Zaimoğlu vd. (2020), bu çalışmada nano-CuO % 0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında yüksek plastisiteli bir kile karıştırılarak stabilize edilmiştir. Nano-CuO ile stabilize edilen zeminin kıvam limitleri, pH ve elektrik iletkenlik özelliklerinde meydana gelen değişim incelenmiştir. Nano-CuO katkısı ile kilin likit limit değeri artmış ve plastik limit değeri

ise düşmüştür. Karışımdaki nano-CuO miktarı arttıkça da pH ve elektrik iletkenliği değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Yılmaz (2021), bu çalışma kapsamında nano-SiO₂ ve YFC katkıları ile stabilize edilen yüksek plastisiteli kilin bir boyutlu konsolidasyon davranışı incelenmiştir. Laboratuvarında yapılan çalışmalarda, YFC ve YFC ile nano-SiO₂ karışımının kil zeminin stabilizasyonuna etkisine ayrı ayrı bakılmıştır. Bu doğrultuda, kil zemine %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC ve YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranında nano-SiO₂ eklenerek iki farklı deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin hacimsel değişim ve endeks özelliklerini değerlendirmek amacıyla Atterberg limitleri, proktor, konsolidasyon ve şişme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar YFC ve YFC ile birlikte nano-SiO₂ karışımlarının konsolidasyon oturmalarının ve şişme yüzdelerinin azaltılmasında ve zemin yoğunluğun artırılmasında etkili olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak YFC ile %1 nano-SiO₂ karışımının, %1.5 nano-SiO₂ oranına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

BÖLÜM IV

ZEMİN İYİLEŞTİRMESİ VE ZEMİN STABİLİZASYON YÖNTEMLERİ

Zayıf zeminler, üzerine inşa edilecek yapıdan gelen tüm yükleri (statik ve dinamik) taşımada sorun yaşayan, şişme, kabarma, sıvılaşma ve oturma gibi problemlere neden olabilecek zeminlerdir. Uygulamada bu tür zeminlerle karşılaşılması durumunda yapı inşaat alanının değiştirilmesi, temel zemininin değiştirilmesi, yapı tasarımının zemin koşullarına uygun hale getirilmesi veya zeminin iyileştirilmesi gibi çözüm yöntemleri uygulanmaktadır (Çetin, 2011). Bu çözüm yöntemlerinin seçiminde uygulanabilirlik ve ekonomi temel tasarım kriterleridir.

Günümüzde zeminlerin yerinde iyileştirilmesi güvenli, ekonomik ve hızlı bir yol olduğu için sıklıkla tercih edilen çözümlerdendir. Zemin stabilizasyonu ise, zayıf zeminlerin üzerine inşa edilecek yapının gereksinimlerini karşılaması için fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemler kullanılarak iyileştirilmesidir. Stabilizasyonda uygulanan işlemler ile zeminin taşıma kapasitesi artırılır, oturmalar, permeabilite ve sıvılaşma potansiyeli azaltılır. Stabilizasyon çalışmalarında kireç, çimento, bitüm, mermer tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve nano malzemeler gibi çeşitli katkıları kullanılmaktadır. Stabilizasyon çalışmalarında özellikle sanayi atığı malzemelerin kullanımı hem zemin özelliklerinin istenen seviyeye getirilmesi hem de atıkların bertarafına katkı sağlayacaktır.

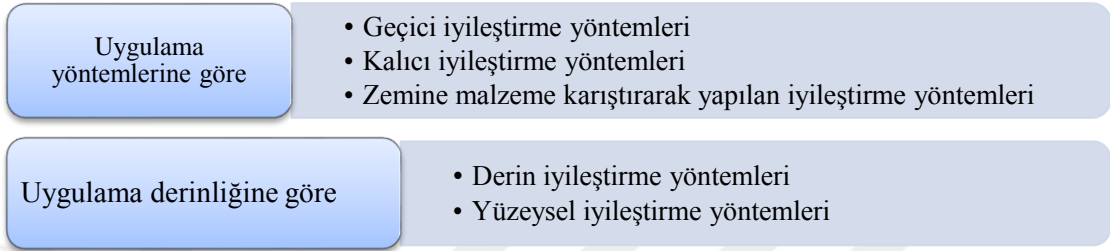
Bu bölümde öncelikle zemin iyileştirmesinden kısaca bahsedilmiştir. Sonrasında ise tezin esas konusu olan zeminlerin stabilizasyonu konusu kullanılan malzemeler ölçüsünde daha detaylı olarak verilmiştir.

4.1 Zeminlerin İyileştirilmesi

Zayıf bir zeminde uygulanacak zemin iyileştirme yönteminin seçimi, zemin cinsi ve yapısı, ortam koşulları, yer altı suyu durumu, istenilen iyileştirme derecesi, gerekli ekipman ve iş gücü temini, civar yapılara olan etki, maliyet ve zaman gibi faktörler göz önüne alınarak yapılır (Sarsılmaz, 2017). Zemin iyileştirme yöntemleri uygulama yöntemi ve derinliğine göre iki sınıfa ayrılmaktadır (Çizelge 4.1). Uygulama yöntemine

göre yapılan sınıflandırmadaki geçici iyileştirme yöntemleri, yapı inşası bitene kadar ihtiyaç duyulan iyileştirme çalışmalarıdır. Geçici iksa yapıları bu çalışmalara örnek olarak verilebilir. Kalıcı iyileştirme yöntemleri ise yapı ömrü boyunca kalacak ve etkinliğini sürdürecektir çalışmalarıdır.

Çizelge 4.1. Zemin iyileştirme tekniklerinin sınıflandırılması (Altun, 2010)



Zemin iyileştirme yöntemlerini mekanik, hidrolik ve kimyasal iyileştirme olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür. Mekanik iyileştirme, zeminin dışarıdan bir kuvvet yardımı ile sıkıştırılarak içinde bulunan havanın dışarı çıkarılmasıdır. Bu işleme kompaksiyon adı da verilir. Zemine ani olarak ağır yüklemeler yapılır veya zemin belirli bir ağırlık altında ezilir. Bu yöntemle zemin daneleri birbirine daha çok yaklaşır ve zemin içindeki havanın dışarı çıkması ile sıkışma gerçekleşir. Sıkışan zeminin mukavemeti artarken, oturmalar ve permeabilite azalır (Sarsılmaz, 2017). Vibroflatasyon, vibrokompaksiyon, titreşimli veya darbeli silindir uygulamaları mekanik iyileştirmeye örnek olarak verilebilir. Hidrolik iyileştirmede suyun zeminden uzaklaştırılması sağlanır. Zemin içinde serbest olarak bulunan boşluk suyu, dren veya kuyular yardımıyla zeminden uzaklaştırılır. İri daneli zeminlerde bu işlem sondaj kuyularından suyun çekilmesi ile gerçekleşirken, ince daneli zeminlerde ön yükleme veya çeşitli yöntemler ile zemin konsolidasyona zorlanır (Sarsılmaz, 2017). Kimyasal iyileştirmede ise, yüzey veya derinlerde bulunan zemine çeşitli katkıları ilave edilerek zemin özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır. Katkı malzemesi olarak zemin ile kimyasal reaksiyona girebilecek doğal malzemeler, yeni nesil bağlayıcılar ve endüstriyel atıklar kullanılmaktadır.

4.2 Katkı Malzemeleri ile Stabilizasyon

Katkı malzemesi ile stabilizasyon yöntemi genellikle zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılan etkili ve ekonomik bir yöntemdir. Burada zeminin mukavemet ve deformasyon özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Katkı malzemesi olarak çimento, kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, nano malzemeler, bitüm, mermer tozu, gibi birçok malzeme kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan bu katkıların bir kısmı puzolanik özellikteki malzemelerdir. Puzolanlar tek başına bağlayıcılık özelliği göstermeyen ancak ince daneli olduklarında ve sulu ortamlarda bağlayıcılık gösteren malzemelerdir. Katkı malzemelerinin kimi doğal malzemeler, kimi endüstriyel ürünler kimileri ise endüstriyel atıklardır. Bu tez çalışmasının da konusu olan atık malzemelerin stabilizasyonda katkı olarak kullanılması günümüzde yoğun ilgi gören çalışma konularındandır. Bu atıkların üretimde yeniden kullanılması, hem zayıf zeminlerin iyileştirilerek kullanıma açılmasını sağlayacak hem de atıkların çevreye olumsuz etkilerinin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

4.2.1 Çimento ile stabilizasyon

Çimentonun zemin ile karıştırılmasıyla uygulanan bu yöntem, daha çok karayolu ve demiryolu gibi ulaştırma yapılarında veya havaalanı pistleri gibi hareketli yüklerin yüksek değerlere ulaşabildiği uygulamalarda tercih edilmektedir (Fotoğraf 4.1). Bu şekilde temel altında bulunan zayıf zeminin taşıma gücünü artırılır ve temel altı malzemesinin tasarım kalınlığı azaltılır. Çimento, yüzeysel zemin stabilizasyonu haricinde, şev stabilitesinin sağlanması, derin kazıların stabilizasyonu, kazıklarda meydana gelen negatif yüzey sürtünmesinin azaltılması, titreşimlerin (araçlardan kaynaklanan, kazık çakma ve patlatma sırasında oluşan) azaltılması ve dolgu altında oluşan konsolidasyon oturmalarının hızlandırılması amacıyla da kullanılmaktadır (Çetin, 2011). Kimi zaman kaya dolgu yerine de kullanılan bu yöntem maliyeti önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu yöntem kireç ile stabilizasyon kadar yaygın bir yöntemdir. Çimento ile stabilizasyon yönteminin en etkili olduğu zeminler kumlu ve siltli zeminler ile düşük plastisiteli killerdir.



Fotoğraf 4.1. Çimento ile yol dolgusu stabilizasyonu (Anonim, Ekim 2021)

4.2.2 Kireç ile stabilizasyon

Kireç, kireç taşından elde edilen beyaz renkli inorganik bir bağlayıcıdır (Fotoğraf 4.2). Genellikle kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan bir katkı malzemesidir. Zemin türüne göre farklı oranlarda zemine katılmaktadır (Çizelge 4.2). Kireç ile yapılan stabilizasyonda zeminin dayanımı, şişme potansiyeli ve işlenebilme kabiliyeti iyileştirilmekte ve kil daha düşük plastisiteye sahip olmaktadır.



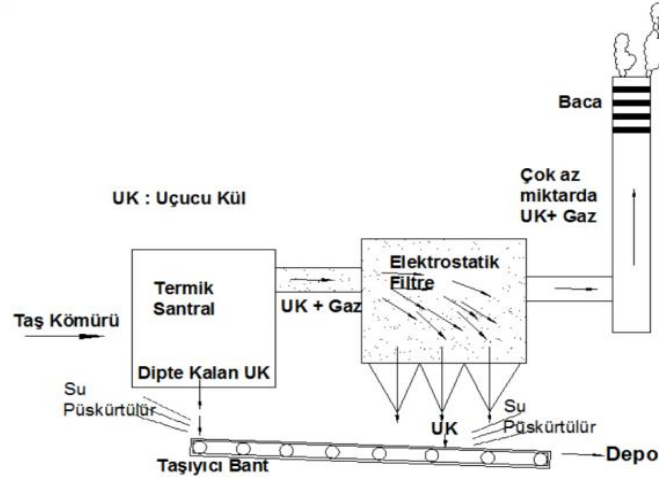
Fotoğraf 4.2. Kireç ile zemin stabilizasyonu (Anonim, Kasım 2021)

Çizelge 4.2. Zemin cinsine göre önerilen kireç miktarı (Argun, 2002)

Zemin cinsi	Kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi olarak
İyi derecelendirilmiş killi çakıl	3
Kumlar	Tavsiye edilmez
Kumlu kil	5
Siltli kil	2 - 4
Plastik kil	3 - 8
Yüksek plastisiteli kil	3 - 10
Organik zeminler	Tavsiye edilmez

4.2.3 Uçucu kül ile stabilizasyon

Uçucu kül, termik santrallerin elektrik üretimi için kömürü yakıt olarak kullanması ile oluşan büyük kısmı ince olan atık bir malzemedir (Şekil 4.1). Uçucu kül, termik santrallerdeki baca gazları atmosfere salınmadan önce elektro filtre veya siklon olarak adlandırılan toz tutucular ile yakalanır ve biriktirilir. ASTM C618, uçucu külleri C ve F sınıfı olarak ikiye ayırmaktadır. F sınıfı uçucu kül, taş kömürünün yakılmasıyla, C sınıfı uçucu kül ise, linyit kömürünün yakılması ile elde edilmektedirler (Alkaya, 2009).



Şekil 4.1. Uçucu kül (Kayan vd., 2017)

Uçucu küller genellikle gri renklidir ancak içinde yanmamış karbon miktarının fazla olması durumunda renkleri koyu olabilmektedir. Tipik şekilleri oval olan uçucu kül parçacıklarının çapları 1-150 μm arasında değişim gösterir fakat %75'den fazlasının çapı 45 μm 'den küçüktür. Bu parçacıkların içleri dolu veya boş olabilmektedir. İçleri

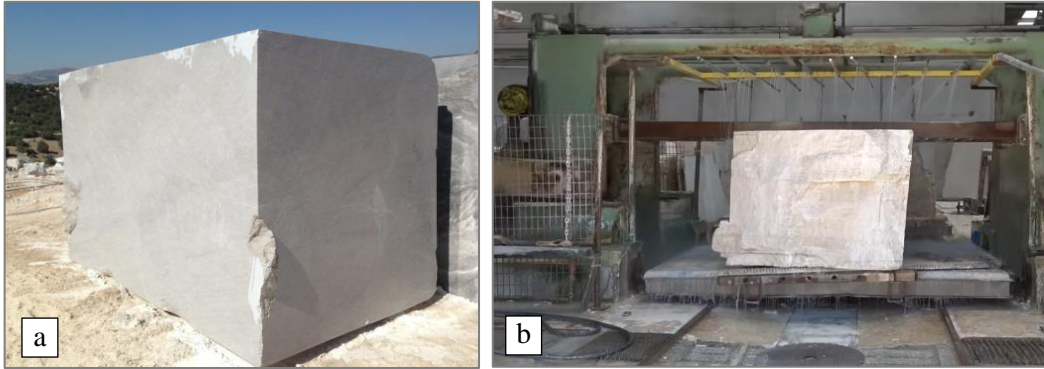
boş olan kül parçacıkları toplam kül ağırlığının %5'ini, hacminin ise yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Uçucu küllerin özgül ağırlığı 19.5-27.0 kN/m³ aralığındadır (Alkaya 2009). Uçucu külün kimyasal bileşiminde çoğunlukla SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ ve MgO gibi bileşikler bulunur. Ayrıca üretim yöntemine göre bazı uçucu küller önemli miktarda CaO içerir. Silis ve alümina amorf yapısı ve çok ince daneli olması nedeniyle uçucu küller puzolanik özellik gösterir.

4.2.4 Mermer tozu ile stabilizasyon

Mermer tozu en küçük boyuta sahip mermer atığıdır. Mermer işleme tesisinde mermer blokların ve plakaların işlenmesi esnasında açığa çıkan ve çoğunluğu 300 mikrondan küçük olan mermer danecikleridir. Mermer tozları kimyasal içeriğinde büyük miktarda CaCO₃, MgCO₃ ve SiO₂'nin yanı sıra çeşitli metal oksitler ve silikat mineralleri içerir. Bileşimlerinin %90-98'ini CaCO₃ oluşturmaktadır ve düşük miktarda MgCO₃ içerir. CaCO₃ kristalleri ile oluşan mermerlerin esas minerali kalsittir. Aynı zamanda az miktarda feldspat, silis, silika, flüorin, demir oksit, mika ve organik madde bulunabilmektedir. (Gücek, 2011).

Mermerler kesilirken su kullanılır (Fotoğraf 4.3) ve kesme ile oluşan mermer tozları suyla birlikte çöktürme havuzunda birikir. Havuzlarda biriken mermer tozu daha sonra atık sahalarına alınır (Fotoğraf 4.4). Atık sahalarına alınan bu mermer tozlarının çok büyük bir kısmı atık olarak depolanır (Gücek, 2011). Mermer işletmeleri için atık depolama alanı tesis etmek, büyük maliyet oluşturmakta aynı zamanda tarım arazilerini kullanılamaz hale getirerek doğaya zarar vermektedir. Mermer atığını içeren bulamaç içinde bulunan mikron boyutundaki partiküller toprağın hava almasını engellemekte ve su geçişini sağlayan deliklerin kapanmasına neden olarak tarım arazilerini verimsiz hale getirmektedir. Ayrıca, yeraltı su yollarının kapanması yeraltı su seviyesinin düşmesine ve bu suya karışan ince malzemeler su kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Çok ince yapıda olan toz atıkların kurumasıyla havaya karışan daneler, insanlarda solunum yolları rahatsızlıklarına sebep olabilmektedir. Bu atıkların bahsi geçen zararlı etkilerini bertaraf etmek için yeni kullanım sahalarının bulunması gerekmektedir (Aksoy vd., 2012). Bu amaçla mermer tozlarının zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılması, bu atığın bertaraf edilmesine fayda sağlayacak ve çevresel problemlerin

azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar, mermer tozunun zemin stabilizasyonunda oldukça etkili bir malzeme olduğunu göstermektedir.



Fotoğraf 4.3. Mermer bloğu (a) (Anonim, Mayıs 2022) ve su ile mermer bloğu kesimi (b) (Anonim, Aralık 2021)



Fotoğraf 4.4. Çökeltme havuzu (Anonim, Aralık 2021)

4.2.5 Bitüm ile stabilizasyon

Bitüm ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen rengi genellikle siyah olan bir hidrokarbon bileşimli malzemedir. Bitüm özellikle yol inşaatlarında kullanılan pahalı bir stabilizasyon malzemesidir (Fotoğraf 4.5). Bitüm ile zemin stabilizasyonunda, zemin suyun zararlı etkilerinden korunur ve danelerin bağlayıcılığı artırılır. Dane yüzeyini kaplayan bitüm, ince daneli zeminlerde suyun olumsuz etkilerini önleyici bir etki gösterirken iri daneli zeminlerde ise danelere yapışarak kohezyon artışına yol açmaktadır. Bitüm, zemin danelerinin birbirine yapışmasını sağladığı için zeminin su ve rüzgâr erozyonuna karşı korunmasında da yardımcı olmaktadır. Bitüm ile stabilizasyonunun en yaygın kullanımı karayolu yapılarındadır. (Tumluer, 2006).

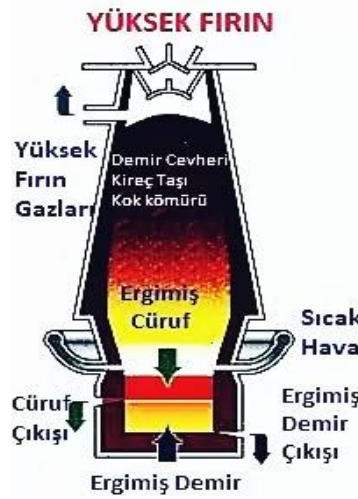
Literatür çalışmalarında, bitümün stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasında zeminlerin geçirimsizliği ve mukavemetinin büyük ölçüde arttırıldığı tespit edilmiştir. Bu durum özellikle bitüm ile stabilize edilmiş zeminlerin iyi bir alt temel olmasına katkı sağlamaktadır.



Fotoğraf 4.5. Bitüm ile stabilizasyon (Anonim, Mayıs 2022)

4.2.6 Metal cürufu ile stabilizasyon

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir çelik tesislerindeki yüksek fırınlar içerisinde demir cevherinin ergitilmesi sonucu oluşan bir sanayi atığıdır (Şekil 4.2). Metal küfü olarak da adlandırılan YFC, hafif metalin havayla temas edip oksitlenmesi ile oluşur. Sıvı çelik üretiminde % 8 ila % 10 oranında cüruf açığa çıkmaktadır. YFC'nin kimyasal içeriği yüksek fırın şartlarına ve kullanılan ham maddelerin kaynağına bağlı olarak değişir. Bünyesinde çeşitli hafif metalleri barındırdığı gibi, esasen kireç, silikatlar ve alüminyumoksit (Al_2O_3) içerir. Ayrıca miktarı az da olsa, magnezyum oksit (MgO), demir oksit (FeO) ve sodyum oksit (Na_2O) gibi bazik özellikteki oksitlere de rastlanmaktadır (Çetin, 2011). İnce olarak öğütülmüş YFC puzolanik bir malzemedir. Geoteknik mühendisliğinde YFC, zeminin yüzeysel stabilizasyonu için son dönemde ortaya çıkmış alternatif bir katkı malzemesidir. Endüstriyel bir atık olan bu malzemelerin üretimde yeniden değerlendirilmesi, hem büyük hacme sahip atık depolama sorununun çözümü hem de oluşacak çevresel problemlerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.



Şekil 4.2. Cüruf imalatı (Anonim, Aralık 2021)

4.2.7 Pirinç kabuğu külü ile stabilizasyon

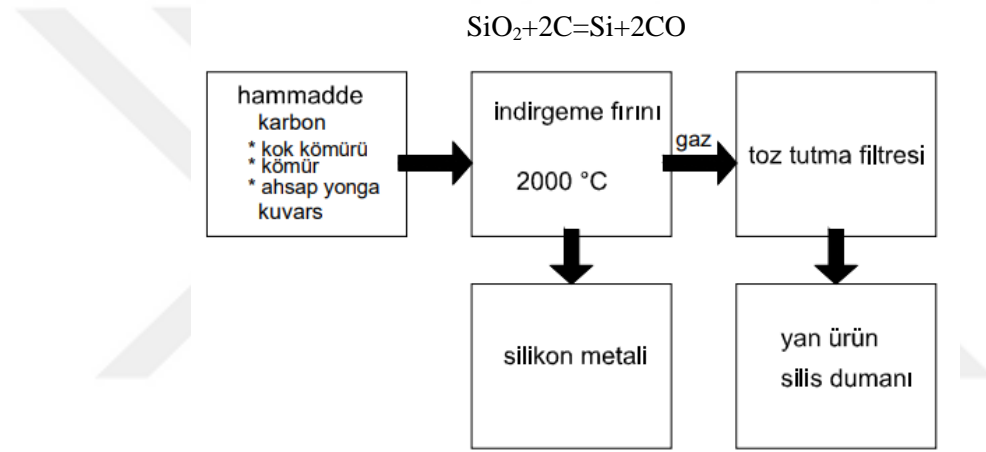
Pirincin işlenmesi sırasında pirinç çekirdeğinden ayrılan pirinç kabuğu bir tür atık malzemedir. Bu organik malzemenin yakılması sonucunda pirinç kabuğu külü elde edilir (Fotoğraf 4.6). Elde edilen bu kül Geoteknik mühendisliğinde zemin iyileştirilmesinde katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Pirinç kabuğu gelişim periyodunda, pirinç tohumu koruyucu özelliğe sahip olması nedeniyle opaline silika ve lignin gibi sert malzemelerden oluşur. Bu malzemeler insanlar tarafından sindirilemediği için pirinçten ayıklanması gerekmektedir. Pirinç kabuğu, pirinç kütlelerinin %10'unu oluşturur ve pirinç kabuğu yakıldıktan sonra kütlelerinin %80'ini kaybeder (Çetin, 2011).



Fotoğraf 4.6. Pirinç kabuğu (a) ve pirinç kabuğu külü (b) (Biochar, 2021)

4.2.8 Silis dumanı ile stabilizasyon

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının 2000°C sıcaklıktaki elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarın kok kömürü ile indirgemesiyle oluşmaktadır (Şekil 4.3). Üretim işleminin yüksek sıcaklıkta olmasından dolayı büyük çoğunlukta SiO olmakla beraber bazı gazlarda açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan gazlar elektrik ark fırınının üst kısmında soğutulur veya sistemde bulunan kollektörler vasıtasıyla çok hızlı bir şekilde yoğunlaşması sağlanılarak amorf yapıdaki SiO₂'ye dönüşürler. Bu malzeme %85-%98 oranında silis ihtiva eden amorf yapıda olan çok ince katı parçacıklardan meydana gelmektedir. Elde edilen bu malzemeye silis dumanı adı verilir.



Şekil 4.3. Silis dumanı üretimi (Akçaözoğlu, 2007)

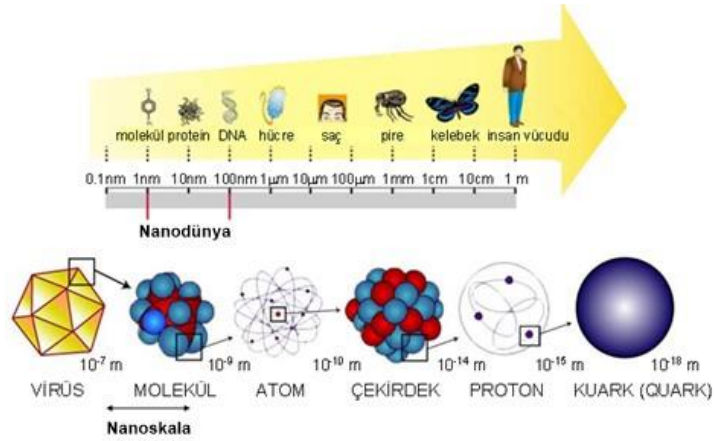
Silis dumanı gri renkli, boyutları 0.1-0.2 µm arasında değişen, portland çimentosuna göre 100 kat daha ince bir malzemedir. Malzemenin özgül ağırlığı 2.2-2.3 arasında, yoğunluğu ise 200-300 kg/m³ civarındadır (Fotoğraf 4.7). Türkiye’de Antalya’da bulunan Ferrokrom tesislerinde üretimi yapılmaktadır. Yılda yaklaşık 500-1000 ton üretim yapılmaktadır. (Akçaözoğlu, 2007)



Fotoğraf 4.7. Silis dumanı (Anonim, Mayıs 2022)

4.2.9 Nano malzeme ile stabilizasyon

Nano malzemeler ilk defa 1959 yılında Richard Feynman tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu nedenle kendisi nanoteknolojinin kurucusu olarak adlandırılmıştır. Daha sonraki yıllarda nano malzemeler üzerine çalışmalar yapan Norio Taniguchi, 1974'te nanoteknoloji tanımını yapan ilk araştırmacıdır (Tüylek, 2016). Nano malzeme boyutları 1-100nm arasında değişmektedir (Şekil 4.4). Nano parçacıklar, nanoteknolojinin dolayısıyla nano malzemenin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 4.4. Nanomalzemelerde nanoskala (Beşergil, 2021)

Nano malzeme üretiminde iki yaklaşım mevcuttur. Bunlar yukarıdan-aşağıya ve aşağıdan-yukarıya üretimdir. Yukarıdan aşağıya olarak adlandırılan yöntemde bir bütün halinde bulunan malzeme ile işleme başlanır daha sonra malzeme küçük parçalara ayrılır. Bu yaklaşımda özel işleme ve kimyasal aşındırma teknikleriyle malzeme boyutları nano ölçeğe indirilir. Aşağıdan yukarıya üretimde ise, nano malzeme

atomların ve molekülerin kimyasal reaksiyonlarla boyutça büyümesi sonucu elde edilir. Atomik ve moleküler elemanlar daha büyük sistemler, kümeler, organik birliktelikler, çok moleküllü yapılar ve sentezlenmiş makro moleküller oluşturacak şekilde kontrollü bir şekilde bir araya getirilir (Ateş ve Bahçeci, 2015). Nano parçacıkların üretim yöntemlerinden bazıları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Nano parçacık üretiminde kullanılan yöntemler (Ateş ve Bahçeci, 2015)

Üretim Yöntemleri	
<i>Yukarıdan aşağıya</i>	<i>Aşağıdan yukarıya</i>
Mekanik aşındırma	Asal gaz yoğunlaştırma
Elektro patlatma	Alev sentezi
Dağlama	Kimyasal buhar yoğunlaştırma
Isıl yöntem	Moleküler hüzme
Dönen soğuk yüzeyde katılaştırma	Atom tabaka çökmesi
Gaz atomizörü	Yanma
Yüksek enerji	Yaş kimyasal sentez
Litografi aşırı ultraviyole (EUV)	Elektro-patlama
Yumuşak litografi	Lazer ablasyonu
	Sol-jel
	Ultrasonik sprey piroliz (USP)

Nano malzemelerin zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak kullanılması son dönemde ilgi gören araştırma konularındandır. Bu konuda yapılan çalışmalar nano malzemelerin zemin iyileştirmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Literatür araştırmaları incelendiği zaman, nano malzemeler ile stabilize edilen zeminlerin kıvam limitlerinde ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür. Bazı çalışmalarda nano malzeme ile stabilize edilen zeminin su geçirimsizliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında da sınırlı sayıda çalışmaya katkı sağlamak için nano-SiO₂'nin stabilizasyondaki performansı YFC ile birlikte değerlendirilmiştir.

BÖLÜM V

LABORATUVAR ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde deneylerde kullanılan tüm malzemelerin kimyasal özellikleri, mineral bileşenleri, mikro boyutta dane görümleri ve malzemelerin dane büyüklüğü dağılımları Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi laboratuvarı ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik laboratuvarında yapılan çeşitli analizler yardımı ile tespit edilmiştir. Malzeme özellikleri tespit edildikten sonra yapay olarak elde edilen yüksek plastisiteli ince daneli bir zeminin, yüksek fırın cürufu (YFC) ve nano silisyum dioksit (nano-SiO₂) kullanarak stabilizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda kompaksiyon deneyleri ile sıkışma, tek eksenli basınç deneyleri ile de dayanım özelliklerindeki değişimler araştırılmış ve stabilizasyon performansları değerlendirilmiştir.

5.1 Deney Malzeme Özelliklerinin Tespiti

Çalışmada kullanılan kaolen, Na-bentonit, YFC ve nano-SiO₂ ticari firmalardan temin edilmiştir (Fotoğraf 5.1). Bu deneysel çalışmalarda '*doğal zemin*' olarak adlandırılan zemin stabilize edilecek zayıf zemini temsil etmektedir (Fotoğraf 5.2). Doğal zemin, malzeme özelliklerini kontrol etmek ve homojen bir zemin oluşturmak için ağırlıkça %75 kaolen ve %25 Na-bentonitin kontrollü olarak karıştırılması ile oluşturulmuştur.



Fotoğraf 5.1. Deneyde kullanılan malzemeler: Nano-SiO₂ (a), YFC (b), Kaolen (c), Na-Bentonit (d)



Fotoğraf 5.2. Doğal zemin

Doğal zemin, Na-bentonit, kaolen ve YFC'nin kimyasal içeriği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi laboratuvarında, XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri ile tespit edilerek Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Ayrıca nano- SiO₂'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri de Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kullanılan malzemelerin kimyasal içeriği

İçerik	Doğal zemin	Na-bentonit	Kaolen	YFC
	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	77.307	64.767	80.503	36.820
Al ₂ O ₃	15.768	18.650	15.589	13.301
Fe ₂ O ₃	1.530	4.759	0.685	0.740
CaO	2.565	4.202	1.826	38.834
MgO	0.919	2.350	0.311	5.636
K ₂ O	0.523	1.496	0.390	0.765
TiO ₂	0.380	0.473	0.302	0.761
SO ₃	0.112	0.063	0.134	0.586
Mn ₃ O ₄	0.052	0.136	0.005	1.87
Na ₂ O	0.560	2.725	0.058	-
BaO	0.026	0.081	0.076	0.001
P ₂ O ₅	0.220	0.153	0.090	0.009
SrO	0.038	0.104	0.023	0.018

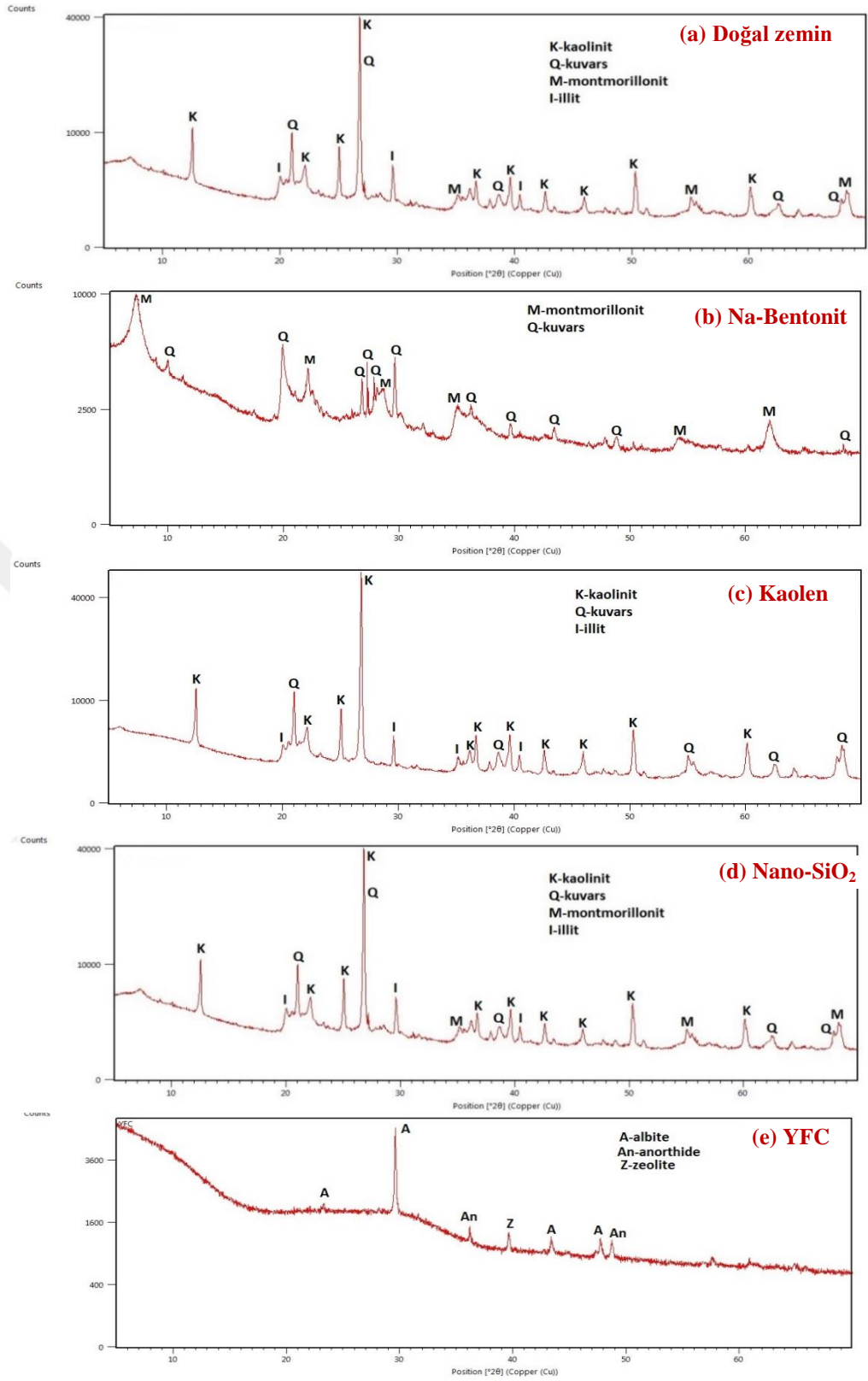
Çizelge 5.2. Nano SiO₂'nin kimyasal içeriği

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

Çizelge 5.3. Nano SiO₂'nin fiziksel özellikleri

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

Doğal zemin, Na-bentonit, kaolen, nano-SiO₂ ve YFC'nin mineral içeriğinin belirlenmesi için Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi laboratuvarında, XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılarak sonuçlar Şekil 5.1'de sunulmuştur. Ayrıca bu malzemelerin birim hacim ağırlık değerleri piknometre deneyleri yardımıyla belirlenerek Çizelge 5.4'te verilmiştir.

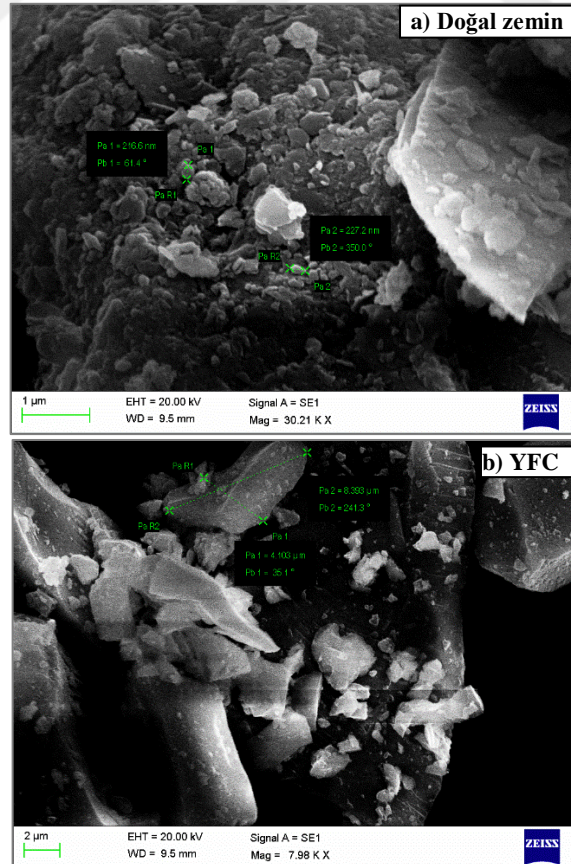


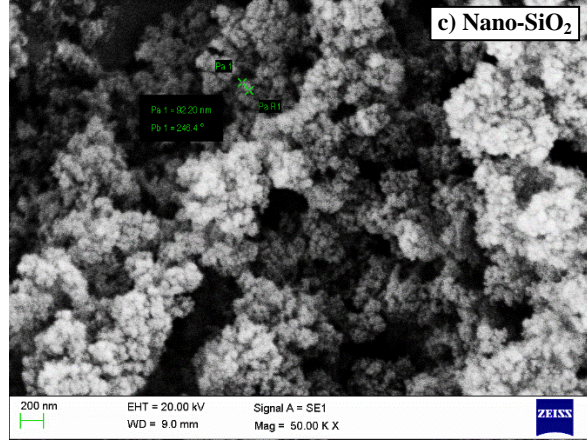
Şekil 5.1. XRD analiz sonuçları: Doğal zemin (a), Na-Bentonit (b), Kaolen (c), Nano-SiO₂ (d), YFC (e) (Topçu, 2022)

Çizelge 5.4. Deney malzemelerinin birim hacim ağırlık değerleri

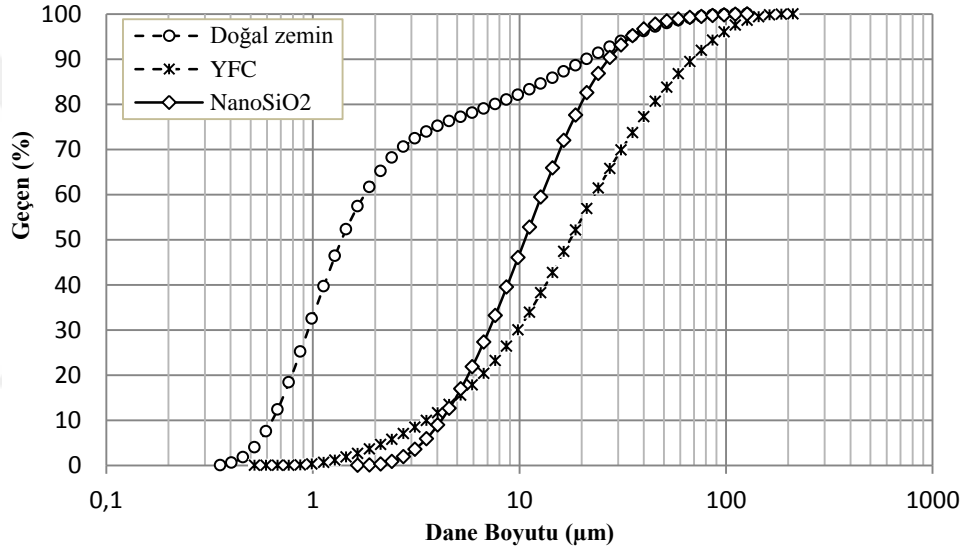
Malzeme	kN/m ³
Doğal zemin	25.18
Kaolen	25.32
Na-Bentonit	23.92
YFC	27.96

Deneyde kullanılan malzemelerin (doğal zemin, YFC ve nano-SiO₂) mikro yapısını görüntülemek için SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri yapılmıştır (Fotoğraf 5.3). Ayrıca aynı malzemelerin dane büyüklüğü dağılım eğrilerini tespit etmek için lazer kırınım analizleri yapılmıştır (Şekil 5.2). Bu analizler Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi merkezi laboratuvarında yapılmıştır. Doğal zeminin likit limit değeri TS 1900-1'e göre düşen koni deneyi yapılarak %106.50 olarak tespit edilmiştir. Doğal zeminin plastik limit değeri ise yine TS 1900-1'e göre %24.11 olarak tespit edilmiştir. Likit ve plastik limit değerlerine göre doğal zeminin plastisite indisi değeri 82.39 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlarla birlikte doğal zemin, ASTM D 2487 (2011) standardına göre CH (yüksek plastisiteli kil) olarak sınıflandırılmıştır.





Fotoğraf 5.3. Mikro yapılar: Doğal zemin (a), YFC (b), Nano-SiO₂ (c)



Şekil 5.2. Deney malzemelerinin dane büyüklüğü dağılım eğrileri

5.2. Nano-SiO₂'nin Deneye Hazırlanma Süreci

Nano boyuta sahip SiO₂'nin zemin ile homojen olarak karışmasını sağlamak için deneye ilave edilecek su içinde homojen olarak karışması sağlanmıştır. Bu amaçla Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi merkezi laboratuvarında bulunan ultrasonik banyo cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.3). SiO₂'nin çözüleceği su miktarı, Proktor deneyleri için karışımın %10'u, serbest basınç deneyleri için ise karışımın optimum su muhtevası kadar tespit edilmiştir. Tespit edilen bu su miktarının içine kullanılacak nano-SiO₂ ilave edilerek 15 dakika boyunca ultrasonik banyonda tutulmuş ve homojen karışım oluşturulmuştur.



Şekil 5.3. Ultrasonik banyo cihazı

5.3 Deneysel Çalışmalar ve Deney Sonuçlarının Tespiti

Bu bölümde laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalar detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel çalışmalarda %75 kaolen ve %25 Na-bentonit homojen olarak karıştırılarak *doğal zemin* (DZ) ismi verilen karışım oluşturulmuştur. İlk seri deneylerde, bu karışıma ağırlıkça beş farklı oranda (0, 10, 20, 30 ve 40) YFC karıştırılarak kompaksiyon ve tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu tez çalışmasında kompaksiyon deneylerinin yapılmasındaki ilk amaç, yapılan stabilizasyon ile sıkışma parametrelerinin değişimini tespit etmek, ikinci amaç ise serbest basınç deneyleri için hazırlanan deney numunelerinin yoğunluğunu tespit etmektir. Serbest basınç deneyleri için hazırlanan tüm numuneler kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su içeriği kullanılarak maksimum yoğunlukta hazırlanmıştır. Ayrıca YFC'nin dayanımdaki performansını zamana bağlı olarak değerlendirmek için deney numuneleri 0, 7, 30 ve 60 gün küre bırakılmış ve bu süreler sonunda dayanım değerleri tespit edilmiştir. İkinci seri deneylerde YFC ile birlikte nano-SiO₂ kullanılarak bu iki malzemenin stabilizasyondaki performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla beş farklı oranda (0, 10, 20, 30 ve 40) YFC ile ağırlıkça %1 ve %1.5 nano-SiO₂ birlikte kullanılarak serbest basınç dayanım değerlerine bakılmıştır. Bu karışımın da dayanımdaki performansını zamana bağlı olarak değerlendirmek için deney numuneleri 0, 7, 30 ve 60 gün küre bırakılmıştır. Kür süreleri tamamlanınca dayanım değerleri tespit edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Çizelge 5.5'te iki seri deney için hazırlanan on beş karışım ve kür süreleri detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.5. Hazırlanan karışımlar ve kür süreleri

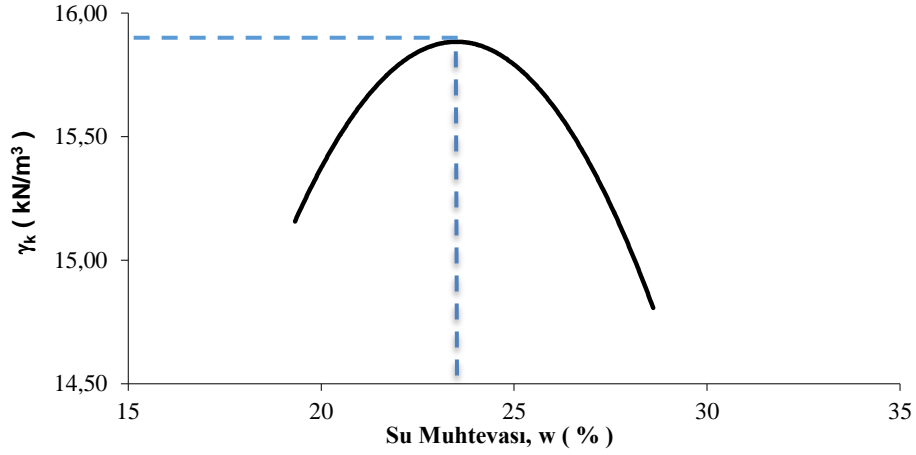
Karışım No	Doğal zemin (%)	YFC (%)	Nano-SiO ₂ (%)	Kür süresi (gün)
1	100	-	-	0, 7, 30, 60
2	90	10	-	0, 7, 30, 60
3	80	20	-	0, 7, 30, 60
4	70	30	-	0, 7, 30, 60
5	60	40	-	0, 7, 30, 60
6	99	-	1	0, 7, 30
7	89	10	1	0, 7, 30
8	79	20	1	0, 7, 30
9	69	30	1	0, 7, 30
10	59	40	1	0, 7, 30
11	98.5	-	1.5	0, 7, 30, 60
12	88.5	10	1.5	0, 7, 30, 60
13	78.5	20	1.5	0, 7, 30, 60
14	68.5	30	1.5	0, 7, 30, 60
15	58.5	40	1.5	0, 7, 30, 60

5.3.1 Standart proktor deneyleri (kompaksiyon deneyleri)

Bu çalışmada yapılan standart proktor deneyleri ASTM D698-78A standardına uygun olarak yapılmıştır (Fotoğraf 5.4). Malzemelerin homojen olarak karışmasına özen gösterilmiş, sıkıştırma işlemi otomatik sıkıştırıcılar ile yapılmıştır. Deneylere ilk olarak doğal zeminin sıkışma parametreleri tespit edilerek başlanmıştır (Şekil 5.4). Doğal zeminin w_{opt} değeri %23.78 ve γ_{kmax} değeri 15.79 kN/m^3 olarak tespit edilmiştir.

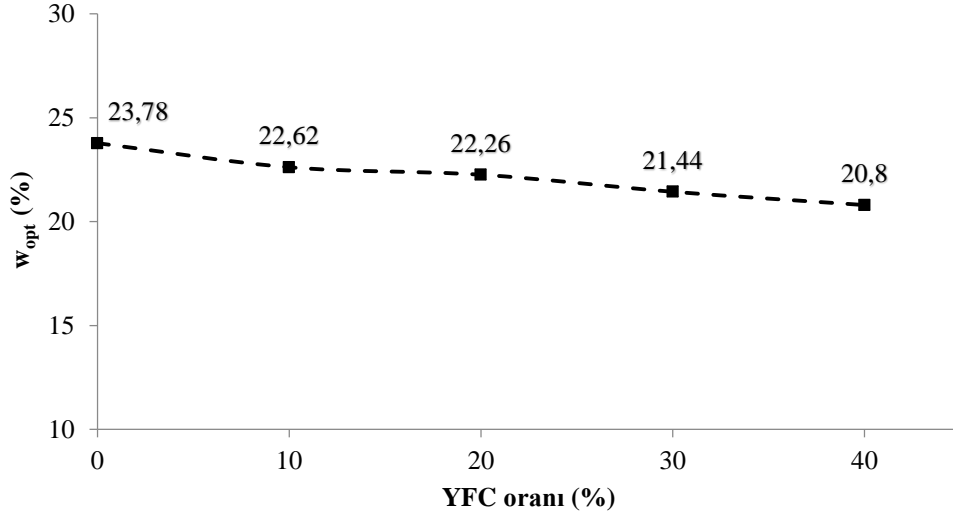


Fotoğraf 5.4. Standart proktor deneyi aşamaları

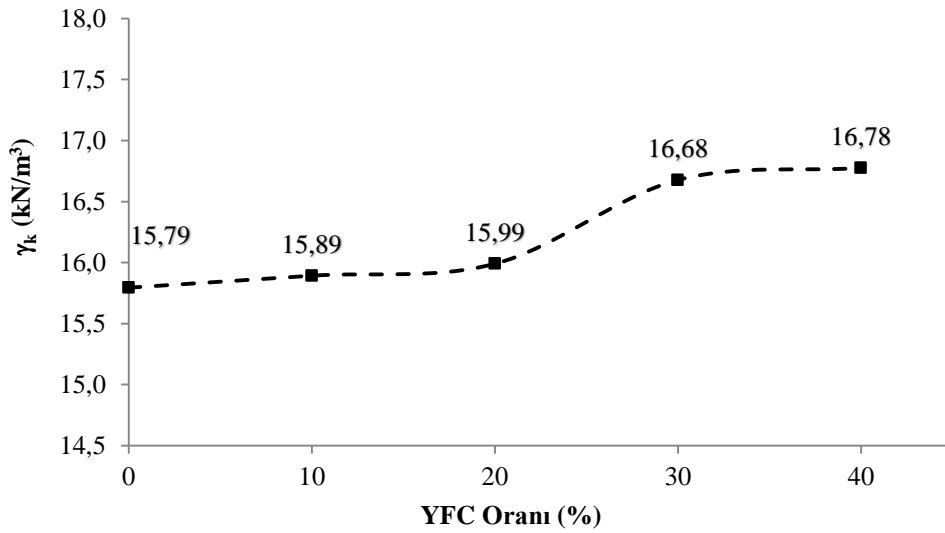


Şekil 5.4. Doğal zemin sıkışma eğrisi

Doğal zeminin içine ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC ilave edilerek oluşturulan bu karışımlara kompaksiyon deneyi yapılarak sıkışma parametrelerindeki (w_{opt} ve γ_{kmax}) değişim araştırılmıştır (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6). Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edildiği zaman w_{opt} değerlerinde düzenli bir azalma tespit edilmiştir. Dane boyutu doğal zemine göre daha büyük olan YFC'nin doğal zemine artan oranlarda eklenmesiyle doğal zeminin ince dane oranını azalmaktadır. Bu durum da zeminin su alabilme kabiliyetini azaltarak w_{opt} değerlerinin düşmesine neden olmuştur. Doğal zeminin %23.78 olan w_{opt} değeri, %40 YFC ile %20.8'e düşmüştür. Bu azalma trendi Türedi vd. (2017) çalışmasında da görülmektedir. Artan YFC oranları ile γ_{kmax} değerlerindeki değişim incelendiği zaman ise γ_{kmax} değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Özellikle %20 YFC oranından sonra bu artışlar daha belirgin olarak görülmektedir. Doğal zeminin 15.79 kN/m³ olan γ_{kmax} değeri, %40 YFC ile 16.78 kN/m³ değerine yükselmiştir. Doğal zemine göre daha fazla yoğunluk değerine sahip olan YFC ile birlikte γ_{kmax} değerlerinin artması beklenen bir durumdur. Elde edilen sonuçlar Türedi vd. (2017) ve Şentürk (2016) çalışmalarında da görülmektedir.



Şekil 5.5. YFC ile w_{opt} değerlerinin değişimi

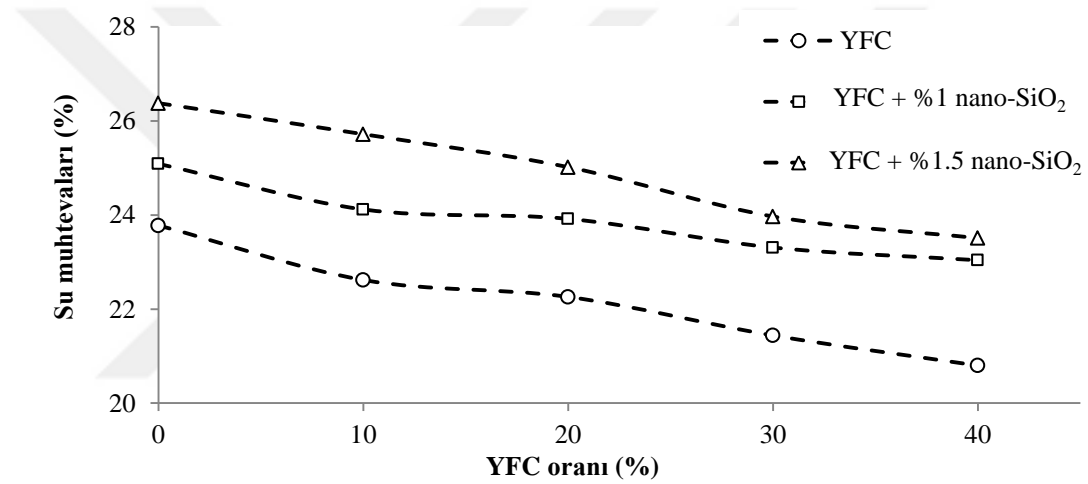


Şekil 5.6. YFC ile γ_k değerlerinin değişimi

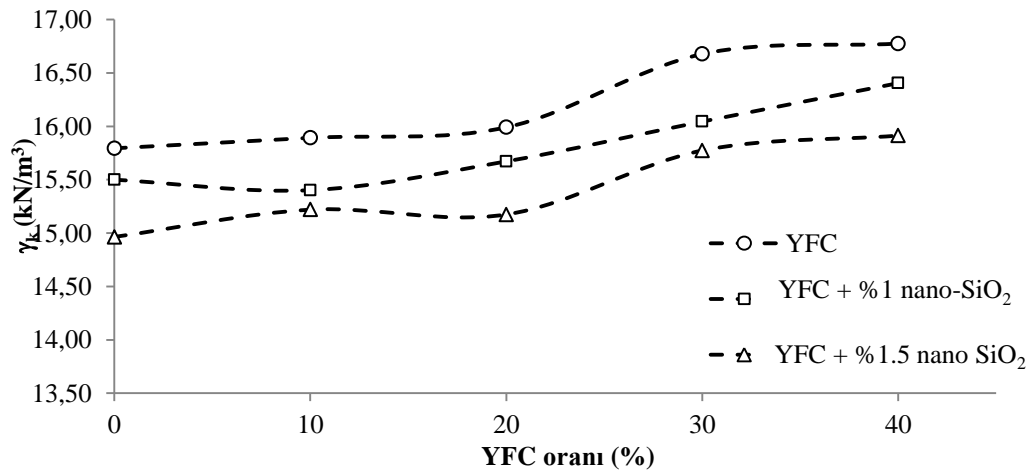
Doğal zeminin içine ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında YFC ile birlikte ağırlıkça %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO₂ ilave edilerek oluşturulan yeni karışımın da sıkışma parametrelerindeki (w_{opt} ve γ_{kmax}) değişim araştırılmıştır (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8). Doğal zemine yalnızca nano-SiO₂ ilave edilmesi ile w_{opt} değerleri %1 ve %1.5 oranlarında sırasıyla %25.09 ve %26.38 olarak tespit edilmiştir. Doğal zeminin w_{opt} değerindeki bu artışlar, yüksek özgül yüzeye sahip nano-SiO₂'nin az miktarda bile kullanılması ile zeminin su kapasitesinin arttırdığını göstermektedir. YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranında nano-SiO₂ kullanıldığında w_{opt} değerleri, artan YFC oranları ile

azalmıştır (Şekil 5.7). Ancak her bir YFC oranında nano-SiO₂ arttıkça da artışlar görülmüştür. Sonuç olarak artan YFC ile doğal zeminin ince miktarı azalmış, ancak aynı YFC oranında artan nano miktarı su tutma kapasitesini arttırdığı için w_{opt} değerlerinde artışa neden olmuştur.

Doğal zemine sadece nano-SiO₂ ilavesi ile γ_{kmax} %1 ve %1.5 nano-SiO₂ için sırasıyla 15.50 kN/m³, 14.96 kN/m³ olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.8). Doğal zemine göre yoğunluğu daha düşük olan nano-SiO₂ tüm YFC oranlarında beklenildiği gibi γ_{kmax} değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Ancak yoğunluğu doğal zemine göre daha fazla olan YFC'nin artan miktarlarında γ_{kmax} değerleri artmıştır.



Şekil 5.7. YFC ile nano-SiO₂'nin w_{opt} değerlerinin değişimine etkisi



Şekil 5.8. YFC ile nano-SiO₂'nin γ_k değerlerinin değişimine etkisi

5.3.2 Serbest basınç deneyi

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri TS 1900-2 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney numuneleri, standarda uygun numune boyutuna göre özel olarak imal edilmiş rijit ve çelik numune kalıbı içinde hazırlanmıştır. Bu kalıp içinde 50 mm çap ve 100 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanabilmektedir (Fotoğraf 5.5).



Fotoğraf 5.5. Çelik numune kalıbı ve sıkıştırıcı

Serbest basınç deneyleri için hazırlanan karışımlar kompaksiyon deneyi ile tespit edilen w_{opt} değerlerinde su miktarları ile homojen olarak karıştırılmıştır. Numune hazırlamak için kullanılan çelik numune kalıbı, numunelerin daha kolay çıkarılabilmesi için yağlanmıştır. Homojen deney numuneleri hazırlamak için tespit edilen numune miktarı kalıba üç tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işleminde her tabakaya aynı düşüş sayısı ile sıkıştırma yapılarak sabit enerji uygulanması sağlanmıştır. Deney numunesinin hazırlanma aşamaları Fotoğraf 5.6'da verilmiştir.



Fotoğraf 5.6. Deney numunesi hazırlama aşamaları

Çizelge 5.5'te verilen karışım oranlarının her biri için dört adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelerden biri küre bırakılmadan anlık olarak serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Diğer üç numune de yapılan stabilizasyonun zamana bağlı performansını değerlendirmek için 7, 30 ve 60 günlük küre bırakılmıştır (Fotoğraf 5.7). Numuneler kür süresince cam hücrelerde bekletilmiştir. Kür süreci boyunca gerekli kontroller yapılarak süre sonunda numuneler kırılmıştır.



Fotoğraf 5.7. Küre bırakılan numuneler

Serbest basınç deneyleri ilgili standarda uygun olarak yapılmış olup, numunelerin yükleme hızı dakikada 1 mm olacak şekilde yapılmıştır (Fotoğraf 5.8). Yükleme, deney numuneleri kırılana kadar veya şekil değiştirme %20 boy kısalmasına ulaşıncaya kadar devam ettirilmiştir. Yük ve deplasmanlar ilgili komparatörlerden okunarak deney föyüne yazılmıştır. Deney verileri Eşitlik 5.1-3 kullanılarak değerlendirilmiştir.



Fotoğraf 5.8. Serbest basınç deney cihazı ve deney sonrası numune görünümleri

Numune aksenal birim şekil değiştirme (ε) (%):

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (5.1)$$

ΔH , numunede ölçülen aksenal şekil değiştirme (mm), H_0 ise numunenin ilk boyudur.

Düzeltilmiş alan (A_f) (cm^2):

$$A_f = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \times 100 \quad (5.2)$$

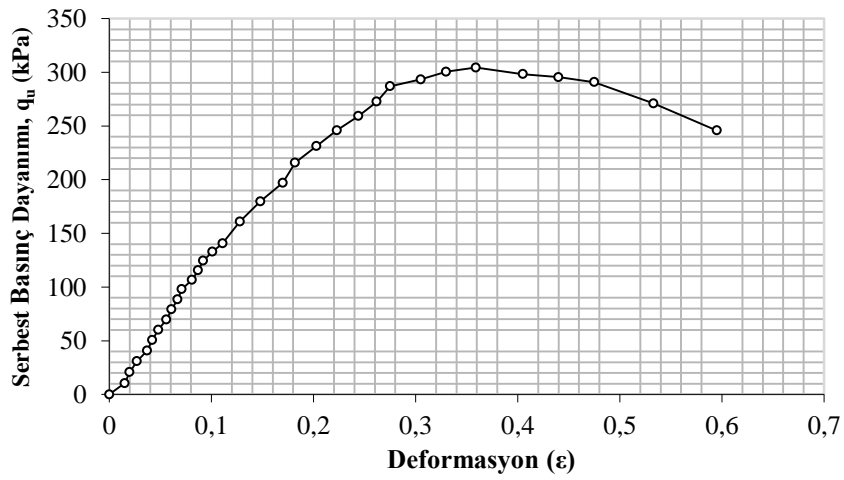
A_0 , burada numunenin deney başındaki kesit alanı (cm^2) ifade etmektedir.

Numunenin tek eksenli serbest basınç dayanımı (q_u):

$$q_u = \frac{P_f}{A_f} \quad (5.3)$$

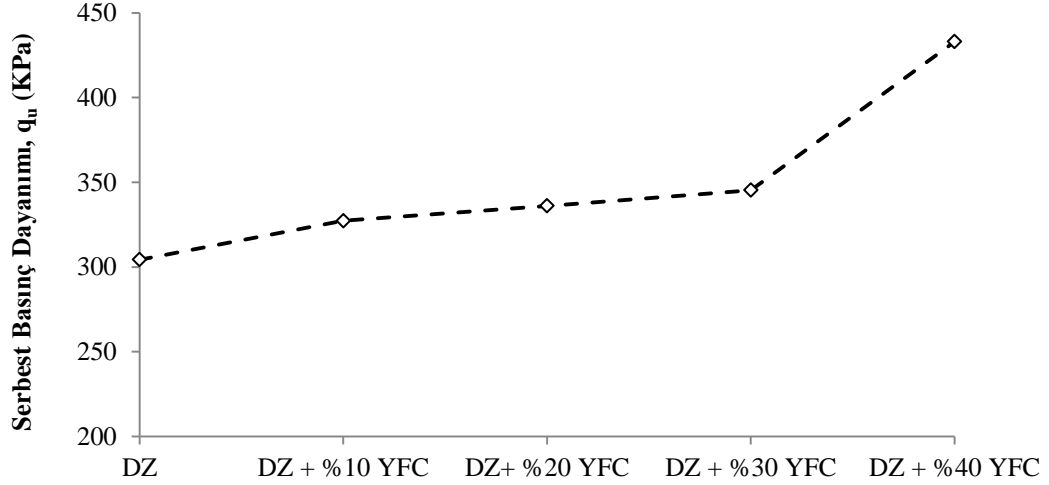
P_f , göçme yükü (kN) dur.

İlk serbest basınç deneyi, doğal zemine anlık olarak yapılmış ve serbest basınç deney dayanım değeri 304.36 kPa olarak elde edilmiştir (Şekil 5.9).



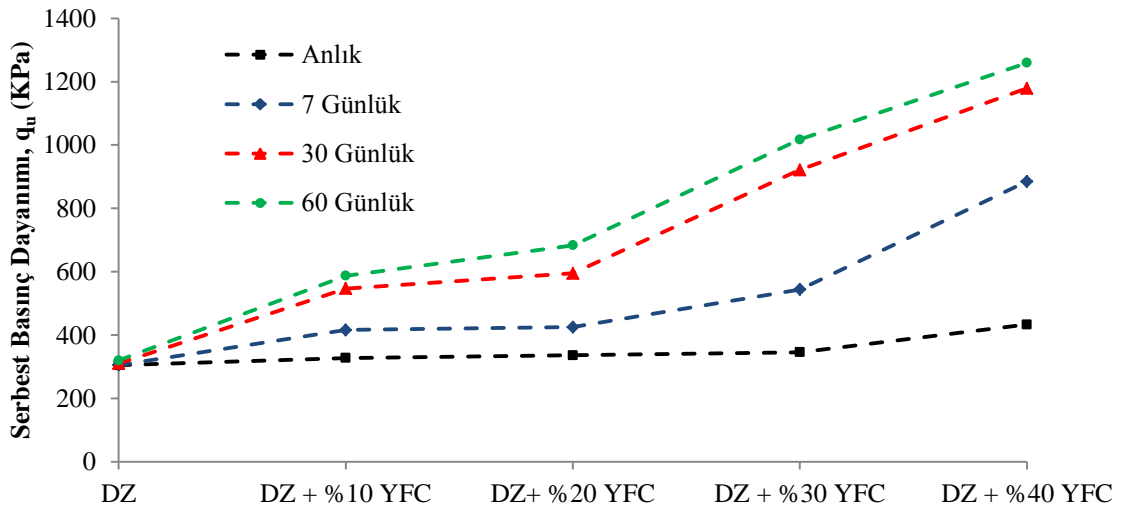
Şekil 5.9. Doğal zeminin anlık serbest basınç dayanım eğrisi

Doğal zemine ağırlıkça beş farklı oranda (%0, %10, %20, %30 ve %40) YFC eklenerek serbest basınç deneyleri yapılmış, YFC'nin dayanımın artışına katkısı değerlendirilmiştir (Şekil 5.10). Doğal zemine artan oranlarda YFC ilave edilmesi, dayanımın arttırılmasında önemli derecede katkı sağlamaktadır. Literatürdeki Şentürk (2016) çalışmasında da benzer sonuçlar görülmektedir. Dayanımdaki en büyük artış en yüksek YFC oranı olan %40'da tespit edilmiştir. %40 YFC ile doğal zeminin serbest basınç deney dayanımı 304.36 kPa'dan 432.99 kPa değerine arttırılmıştır.



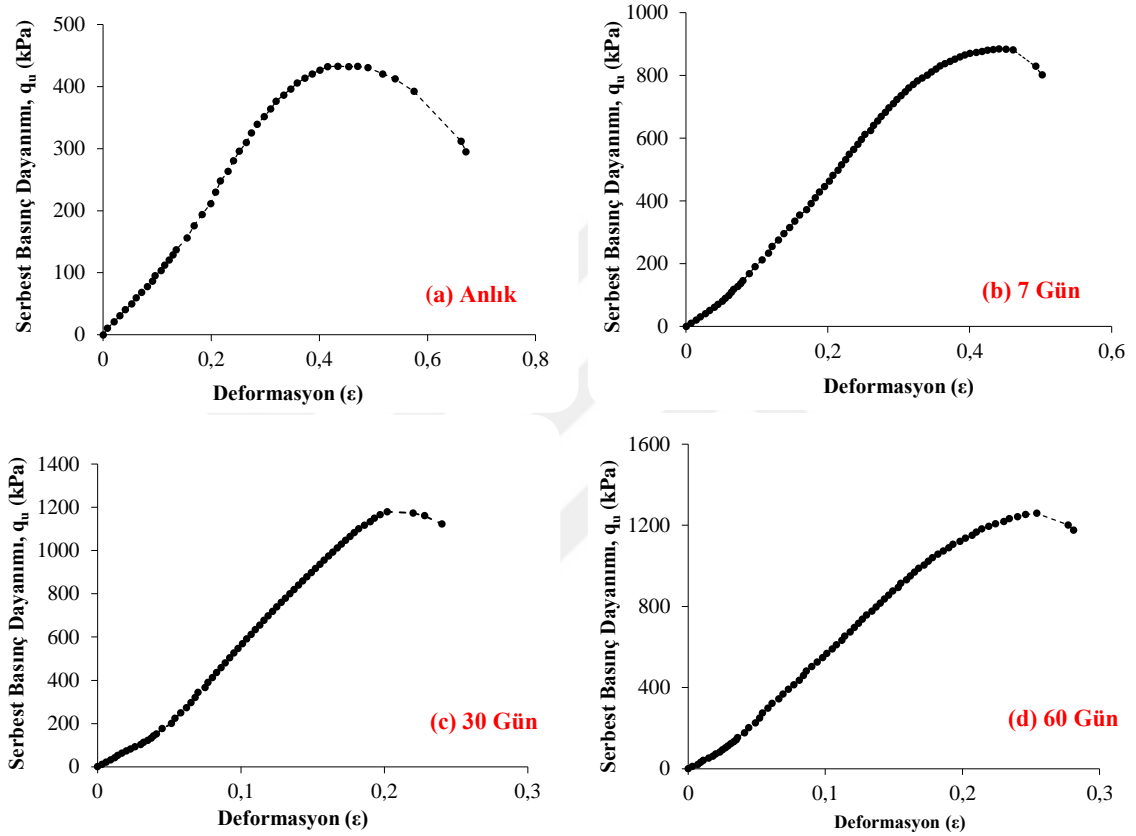
Şekil 5.10. Doğal zeminin anlık serbest basınç dayanım eğrisi

Doğal zemine aynı oranlarda YFC eklenerek dayanımdaki zamana bağlı değişimi tespit etmek için hazırlanan deney numuneleri 0, 7, 30 ve 60 gün küre bırakılmıştır. Bu kür süreleri literatürde yer alan süreler göz önüne alınarak seçilmiştir. Kür sonunda bu numuneler kırılarak dayanımlar tespit edilmiştir (Şekil 5.11). Her bir YFC oranındaki kür etkisi incelendiği zaman, kür süresi arttıkça dayanım da buna bağlı olarak arttığı görülmektedir. Özellikle 30 günlük kür sonrasında dayanımdaki artış daha belirgindir. Elde edilen sonuçlara benzer şekilde YFC'nin kil zeminlerin dayanımlarını iyileştirici etkisi olduğu sonucunu Geçkil vd. (2020) ve Bilgen vd. (2012) tarafından da tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. Doğal zemine YFC katkısı ve buna bağlı kür sürelerinin etkisi

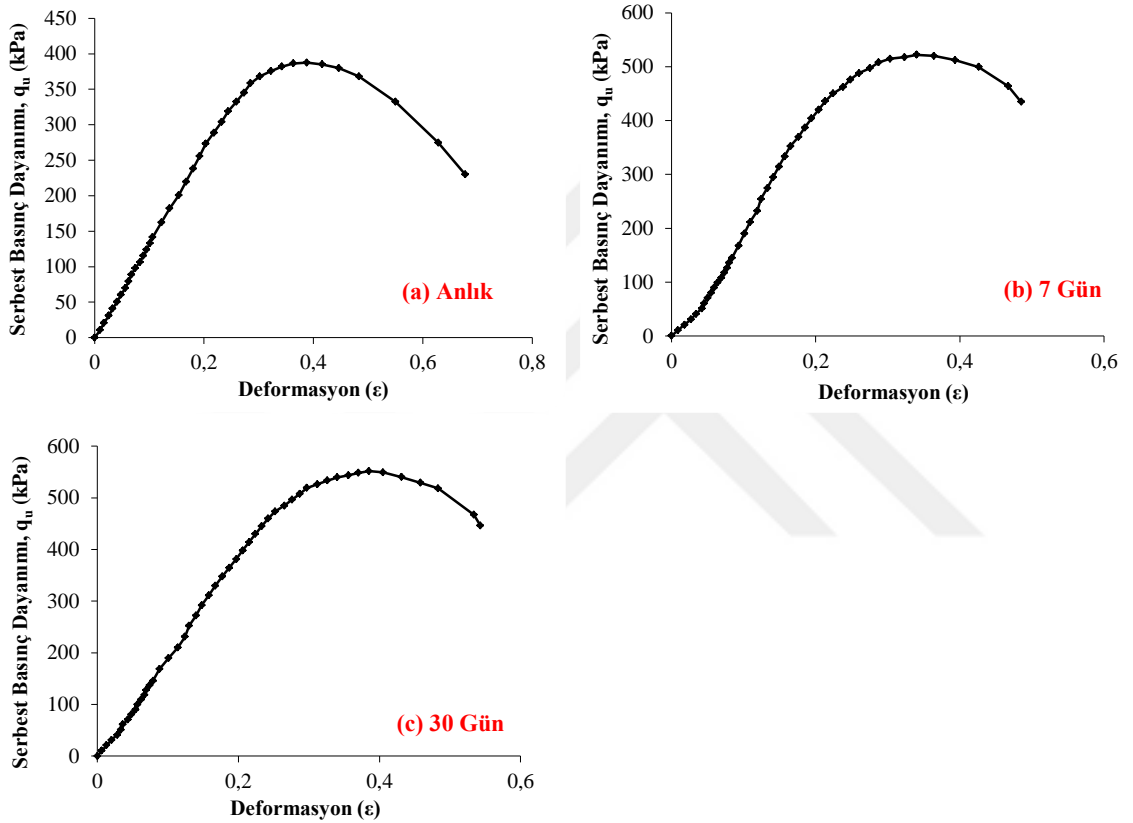
YFC miktarı ve kür sürelerindeki iyileştirme miktarları göz önüne alındığı zaman en iyi performans %40 YFC oranında ve 60 günlük kür süresi sonunda tespit edilmiştir. %40 YFC oranında 0, 7, 30 ve 60 gün kür sonunda serbest basınç dayanımları sırasıyla 432.89, 884.76kPa, 1178.84kPa ve 1259.45kPa olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasında yoğunluk yaratmamak için Şekil 5.12’de en iyi performansın gerçekleştiği %40YFC için farklı kür sürelerindeki serbest basınç dayanımı eğrileri örnek olarak verilmiştir.



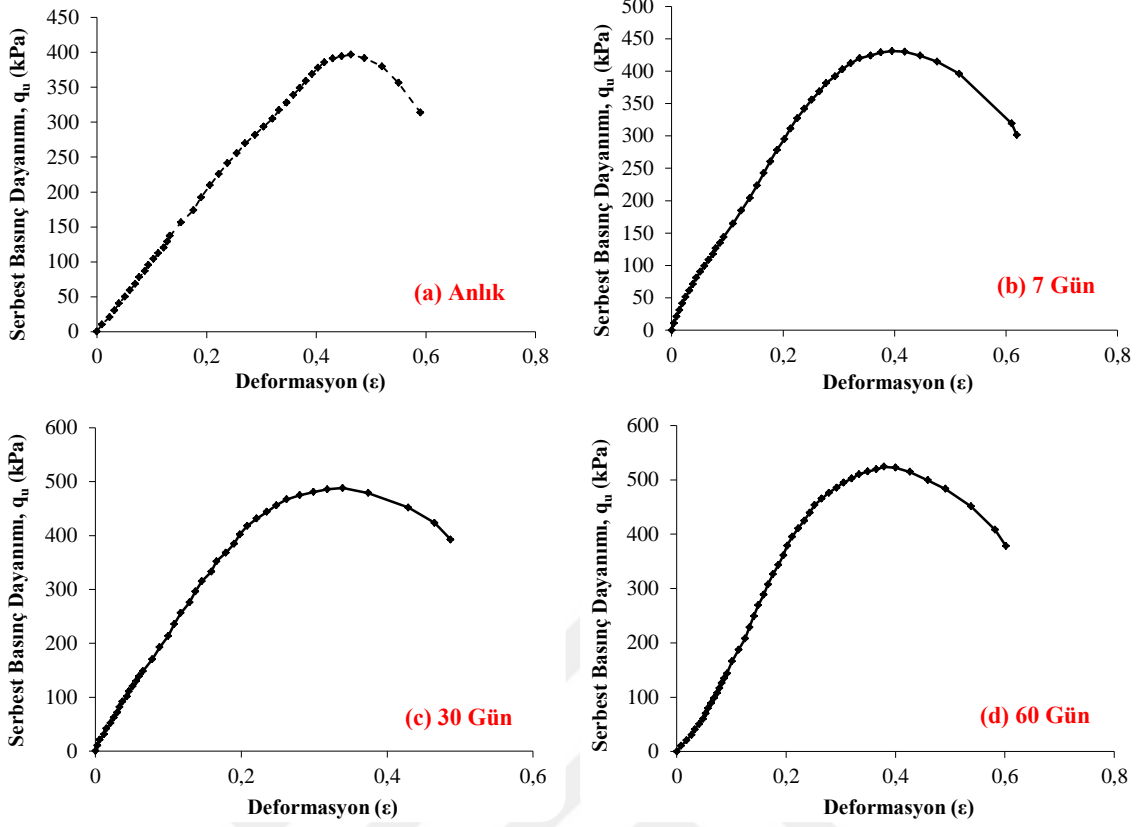
Şekil 5.12. %40 YFC oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c), 60 gün (d)

Doğal zemine sadece %1 ve %1.5 nano-SiO₂ ilave edilerek hazırlanan karışımlar artan nano miktarına bağlı olarak doğal zeminin anlık q_u değerini arttırmıştır. Bu kısımda ayrıca %1 ve %1.5 nano-SiO₂ içeren doğal zeminin zamana bağlı dayanımındaki değişim de araştırılmıştır (Şekil 5.13-5.14). %1 nano-SiO₂ içeren doğal zemin numunesinin anlık serbest basınç dayanım değeri 387.46 kPa iken küre bırakılan aynı içerikli numunelerin serbest basınç dayanım değerleri ise 7 ve 30 gün için sırasıyla 522.31 kPa, 551.59 kPa olmuştur (Şekil 5.13). %1.5 nano-SiO₂ içeren doğal zemin numunesinin anlık serbest basınç dayanım değeri 396.64 kPa iken küre bırakılan aynı

içerikli numunelerin serbest basınç dayanım değerleri ise 7, 30, 60 gün için sırasıyla 430.91 kPa, 488.23 kPa, 524.21 kPa olmuştur (Şekil 5.14). %1.5 nano-SiO₂ oranları %1'den farklı olarak zamana bağlı olarak serbest basınç dayanımlarında artışa neden olmuştur. Bu durum çok az miktarlarda bile olsa nano-SiO₂'nin anlık ve zamana bağlı dayanımın artışına olumlu katkısının olduğu söylenebilir. Ancak sadece nano malzeme katkısı bulunan deney numunelerinde nano malzeme miktarının artışı dayanımın artırılmasına olumlu olarak etki etmemiştir.

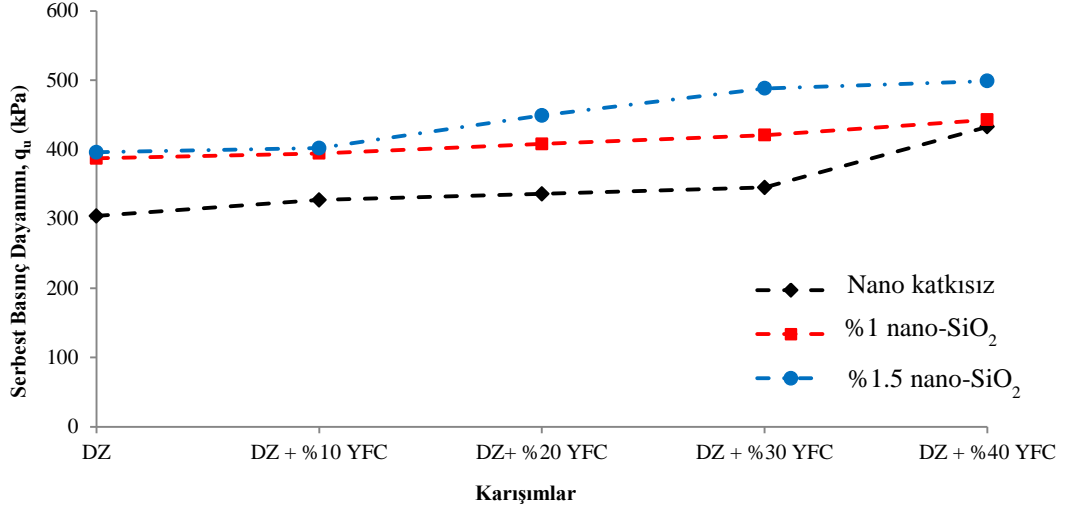


Şekil 5.13. %1 Nano-SiO₂ oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c)



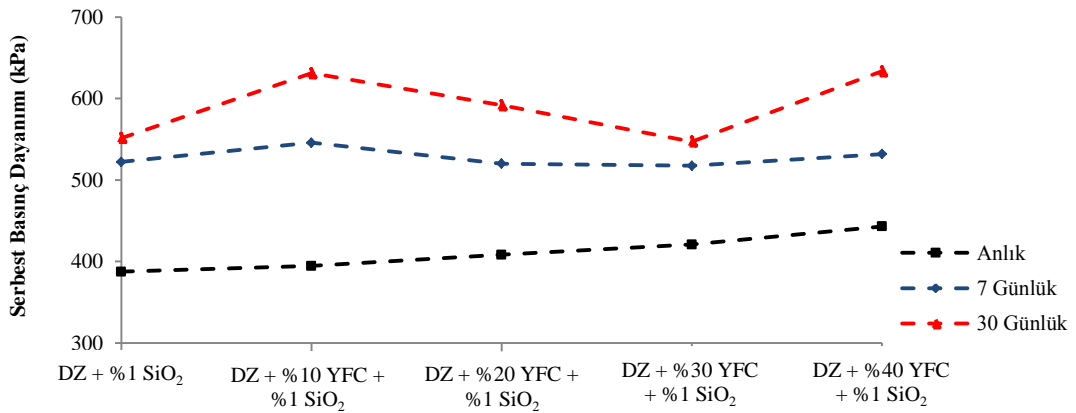
Şekil 5.14. %1.5 Nano-SiO₂ oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: (a) anlık, 7 gün (b), 30 gün (c), 60 gün (d)

Bu kısımda ise YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO₂ karıştırılarak hazırlanan karışımlara anlık serbest basınç deneyleri uygulanmıştır (Şekil 5.15). Bu çalışma literatürde sınırlı sayıda olan YFC ve nano-SiO₂'nin birlikte kullanıldığı çalışmalara katkı sağlaması beklenmektedir. YFC ile birlikte nano-SiO₂'nin birlikte etkisi değerlendirildiğinde tüm YFC oranlarında (%0, %10, %20, %30 ve %40) nano miktarının artması ile serbest basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Özellikle %10 YFC oranında sonra %1.5 nano-SiO₂ oranında daha belirgin bir artış görülmektedir. Bu seri deneylerdeki en iyi performans en yüksek YFC ve nano-SiO₂ oranında gerçekleşmiştir. Doğal zemine artan miktarlarda YFC ve nano-SiO₂ katkısını dayanımın artırılmasına katkıda bulunmuştur.

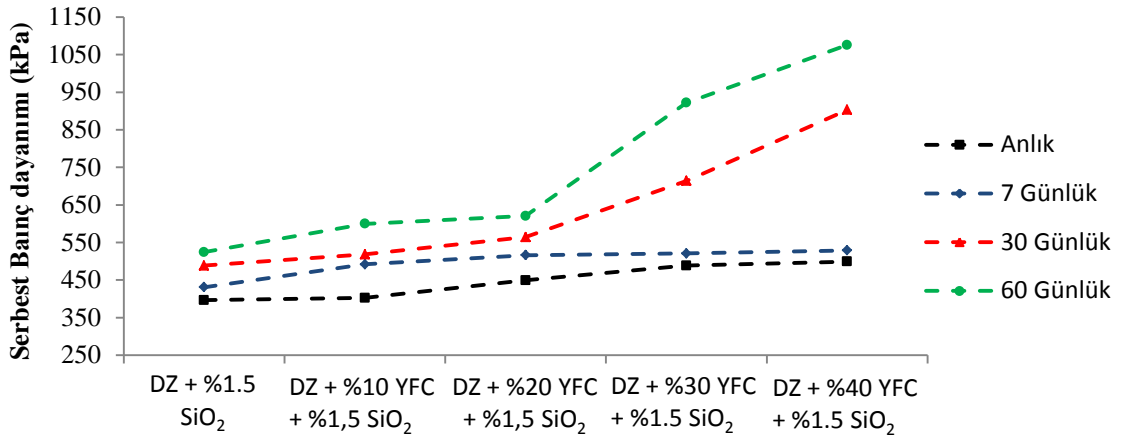


Şekil 5.15. YFC ile birlikte %1 ve %1.5 nano-SiO₂'nin anlık dayanımına etkisi

Doğal zemine beş farklı oranda YFC ve iki farklı oranda nano-SiO₂'nin birlikte karıştırılması ile oluşturulan numunelerin de zamana bağlı performansı araştırılmıştır (Şekil 5.16-17). Şekil 5.16'da verilen grafikte hazırlanan tüm %1 nano-SiO₂ numunelerinin serbest basınç dayanımlarının YFC katkısı ve kür süresi ile değişimi gösterilmiştir. Bu grafikteki sonuçlar incelendiğinde %1 nano katkılı numunelerin dayanımlarının YFC katkısı ve kür süresi ile artış trendinde olduğu görülmektedir. %1.5 nano ile hazırlanan tüm numunelerin serbest basınç dayanımlarının YFC ve kür etkisi ile değişimi Şekil 5.17'de verilmiştir. Serbest basınç dayanımlarının YFC katkısı ve kür süresine bağlı olarak arttığı görülmektedir. %1.5 nano katkısının doğal zeminin dayanımını arttırmada %1'e göre daha başarısız olduğu görülmektedir. Ancak 30 ve 60 günlük dayanım değerleri %1'e göre daha fazla tespit edilmiştir.



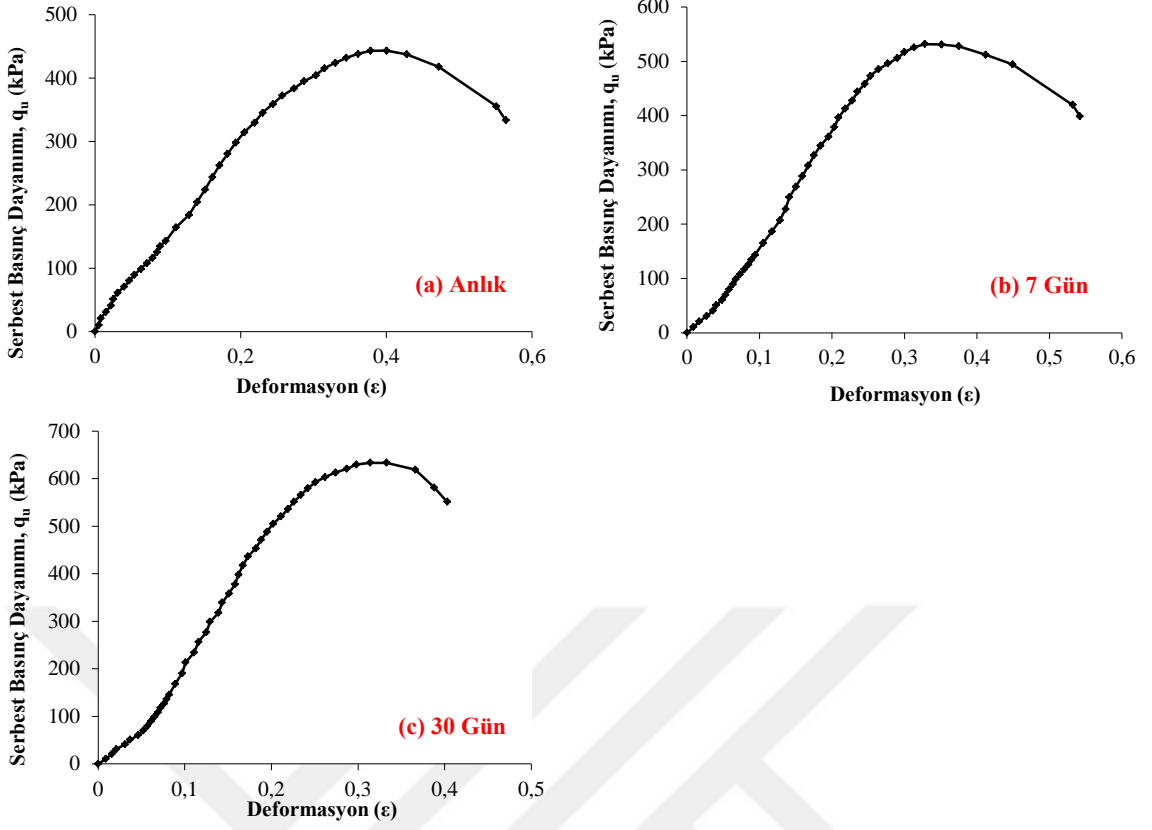
Şekil 5.16. Doğal zemin + %1 nano-SiO₂ numunelerinin YFC katkısı ve kür sürelerine göre serbest basınç dayanımları



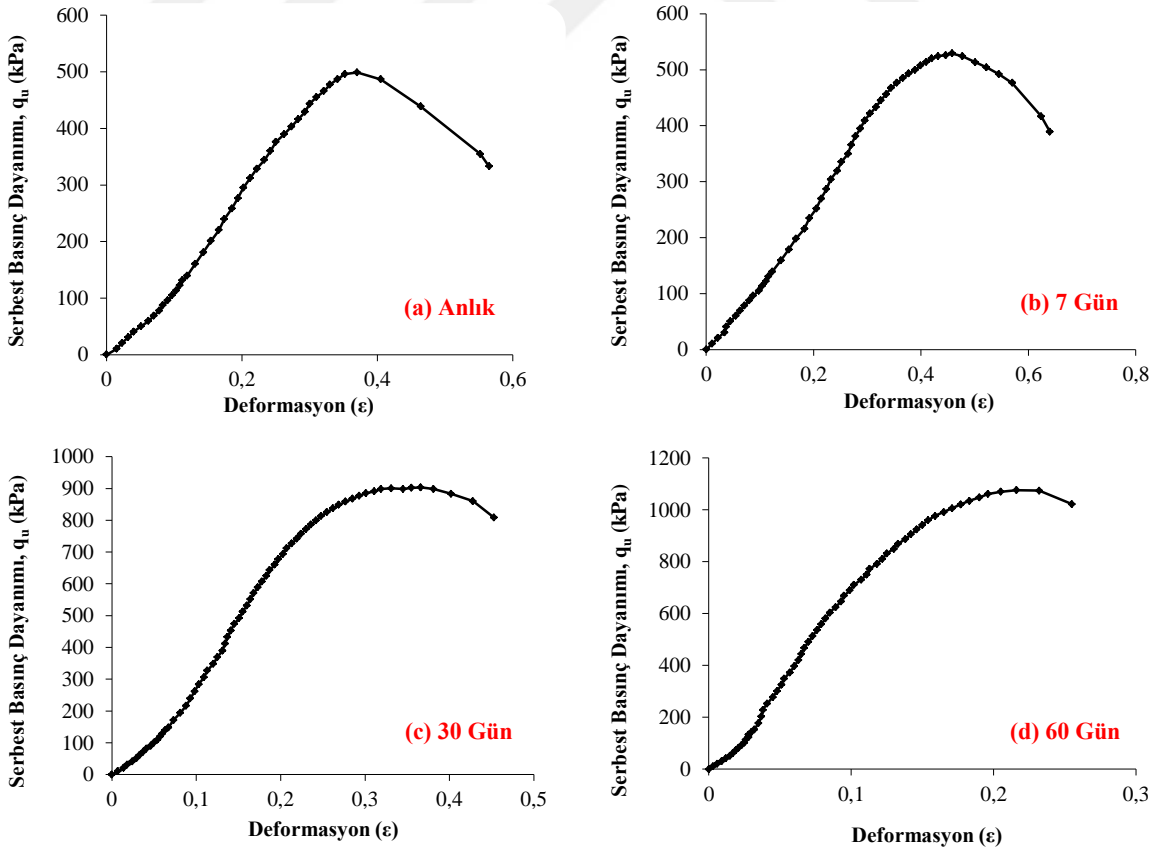
Şekil 5.17. Doğal zemin + %1.5 nano-SiO₂ numunelerinin YFC katkısı ve kür sürelerine göre serbest basınç dayanımları

YFC ile %1 ve %1.5 nano-SiO₂'nin YFC ile birlikte kullanılması durumunda en iyi performans %40 YFC oranında tespit edilmiştir (Şekil 5.18-5.19). %40 YFC'de doğal zeminin anlık serbest basınç dayanımı değeri 304.36 kPa değeri %1 ve %1.5 nano-SiO₂ etkisiyle sırası ile 443.17 kPa ve 498.57 kPa değerlerine arttırılmıştır. %1 nano-SiO₂ + %40 YFC karışımının serbest basınç dayanım değeri 7 ve 30 gün kür süreleri sırasıyla 526.31 kPa, 633.42 kPa olarak belirlenmiştir (Şekil 5.18). %1.5 nano-SiO₂ + %40 YFC ile hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanım değeri 7, 30, 60 gün kür süreleri sırasıyla 531.01 kPa, 903.12 kPa, 1075.43 kPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.19). Sonuçlara bakılacak olursa, %40YFC oranında tüm kür süreleri için en iyi performans %1.5 nano-SiO₂'de gerçekleşmiştir.

Nano malzemenin doğal zemin üzerindeki etkileri incelendiğinde anlık dayanımlarda en fazla dayanım artışının %1 nano-SiO₂ içeren numunelerde gerçekleştiği fakat %40 YFC katkılı numunelerde %1.5 nano katkı numunenin dayanımının daha fazla olduğu görülmüştür. (Şekil 5.19). Küre bırakılan numunelerde dayanım artışları beklenenin aksine nano malzeme kullanılmayan numunelerde daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 5.18. %1 Nano-SiO₂ + %40 YFC oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c)



Şekil 5.19. %1.5 Nano-SiO₂ + %40 YFC oranındaki zamana bağlı serbest basınç dayanım eğrileri: anlık (a), 7 gün (b), 30 gün (c), 60 gün (d)

BÖLÜM VI

SONUÇLAR VE YORUM

Bu tez çalışmasında ilk olarak stabilize edilen zayıf zemini temsil etmesi amacıyla kaolen ve bentonit killeri sırasıyla ağırlıkça %75 ve %25 oranlarında karıştırılmış ve karışıma doğal zemin adı verilmiştir. İlk seri deneylerde doğal zemine beş farklı oranda (%0, %10, %20, %30 ve %40) YFC ilave edilerek YFC'nin sıkışma parametrelerindeki değişime katkısı araştırılmıştır. İkinci seri deneylerde doğal zemine bu beş YFC oranı ile birlikte iki farklı oranda (%1 ve %1.5) nano-SiO₂ eklenerek yine kompaksiyon deneyleri yapılmış ve bu iki katkının sıkışma parametrelerindeki değişime etkisi araştırılmıştır. Üçüncü seri deneylerde doğal zemine beş farklı oranda karıştırılan YFC'nin serbest basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bu karışımlardaki numunelerin dayanımlarındaki değişim ayrıca 7, 30 ve 60 gün küre bağlı olarak da araştırılmıştır. Dördüncü seri deneylerde doğal zemine sadece %1 ve %1.5 nano-SiO₂ eklenerek serbest basınç dayanım değerleri tespit edilmiş, ayrıca dayanımın 7, 30 ve 60 gün küre bağlı performansı da araştırılmıştır. Son seri deneylerde ise, doğal zemine beş farklı oranda YFC ile birlikte iki farklı oranda nano-SiO₂ eklenerek bu iki katkının 0, 7, 30 ve 60 günlük küre bağlı performansları birlikte değerlendirilmiştir. Tüm seriler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Doğal zemine %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında YFC ilave edildiği zaman artan YFC oranı ile w_{opt} değerleri azalmış ve γ_k değerleri de artmıştır. Bu durum YFC'nin sıkışma parametrelerinin değişimde olumlu katkı sağladığını göstermektedir.
- Doğal zemine %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında YFC ile %1 ve %1.5 nano-SiO₂ ilave edildiği zaman artan YFC ve nano-SiO₂'ye bağlı olarak ile w_{opt} değerleri azalmıştır. Her bir YFC oranı ayrı ayrı incelendiği zaman ise, artan nano miktarı ile daha yüksek w_{opt} değerleri tespit edilmiştir. Artan oranlarda YFC ile, nano katkısız, %1 nano katkılı ve %1.5 nano katkılı durumlarda γ_k değerleri artmıştır. Ancak doğal zemin ve her bir YFC oranındaki γ_k değerlerine bakıldığında nano miktarı arttıkça yoğunluk değeri azalmaktadır.

- Doğal zemine %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında YFC ilave edildiği zaman artan YFC oranı ile serbest basınç dayanımı (q_u) değerlerinde artış görülmüştür. Bu numuneler küre bırakıldığı zaman tüm karışımlar için 7, 30 ve 60 gün kür süresi sonunda q_u değerlerinde artış tespit edilmiştir.
- Doğal zemine sadece %1 ve %1.5 nano-SiO₂ ilave edilerek hazırlanan karışımlar artan nano miktarına bağlı olarak doğal zeminin anlık q_u değerini arttırmıştır. Bu iki karışımın 7, 30 ve 60 gün kür süresi sonundaki q_u değerleri incelendiği zaman bu karışımlarında anlık dayanımına göre artış görülmüştür. %1.5 nano-SiO₂'nin ise dayanımı zamana bağlı olarak tüm kür süreleri sonunda arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, çok az miktarlarda kullanılan nano-SiO₂'nin anlık ve zamana bağlı dayanımın artışına olumlu katkı göstermektedir.
- Doğal zemine YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO₂ karıştırılarak hazırlanan karışımların q_u değerleri YFC ve nano miktarına bağlı olarak artış göstermektedir.
- Doğal zemine YFC ile birlikte %1 ve %1.5 oranlarında nano-SiO₂ karıştırılarak hazırlanan karışımların 7, 30 ve 60 gün kür süresi sonundaki q_u değerleri incelendiği zaman %1.5 nano ile küre bağlı bir artış görülmüştür.
- Sonuç olarak doğal zemine artan oranlarda YFC katkısı q_u değerlerini de arttırmıştır. YFC ile nano malzeme kullanımında ise yine artan nano miktarı ile daha büyük q_u değerleri elde edilmiştir. YFC ile birlikte nano malzeme kullanımı yalnızca YFC kullanımından daha iyi bir performans sergilemiştir.

KAYNAKLAR

Akçaözoğlu, K., Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi, Doktora Tezi, **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adana, s. 10-11, 2007.

Aksoy, H., Cana, Ö., ve Gör, M., “Kumlu zeminlerin mermer tozu kullanılarak stabilizasyonu”, **Zemin Mekaniği Ve Temel Mühendisliği Ondördüncü Ulusal Kongresi**, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2012.

Aksu, G., Eskişar, T., “Nanoslika partikülleri içeren zeminlerin indis özellikleri ve mekanik özellikleri”. **8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu**. İstanbul, TMMOB, s. 466-475, 2019.

Alireza, S., Mohammad, M., ve Hasan, B., “Application of nanomaterial to stabilize a weak soil”, **7th Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering**, Missouri University of Science and Technology, Chicago, s. 1-9, 2013.

Alkaya, D., “Uçucu küllerin zemin iyileştirilmesinde kullanılmasının incelenmesi”. **Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 5(1), s. 61-72, 2009.

Altun, S., “Zemin iyileştirme yöntemleri, derin temeller ve uygulama örnekleri”, Docplayer, <https://docplayer.biz.tr/3484725-Zemin-iyilestirme-yontemleri-derin-temeller-ve-uygulama-ornekleri.html>, 2022.

Angın, Z., “Şişen killerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi”, **Geoteknik Sempozyumu**, s. 365-380, Adana, 2005.

Anonim, “Çimento ile stabilizasyon”, <https://www.youtube.com/watch?v=CsiT8CSm-TU>, 5 Ekim 2021.

Anonim, “Kireç ile zemin stabilizasyonu”, <https://www.barankaya.com/tr/barankaya-kirec/>, 5 Kasım 2021.

Anonim, “Mermer tozu ile stabilizasyon”, <https://www.youtube.com/watch?v=h3AeCeDcsLQ>, 5 Aralık 2021.

Anonim, “Mermer tozu ile stabilizasyon”, <http://makoncelik.com/mermer-aritma-sistemleri/>, 5 Aralık 2021.

Anonim, “Yüksek fırın çürufu”, <https://santiyede.com/yuksek-firin-curufu-betonda-kullanimi/>, 20 Aralık 2021

Anonim, “Mermer tozu ile stabilizasyon”, <https://hurok.com/blok-mermer-traverten/>, 13 Mayıs 2022.

Anonim, “Silis dumanı ve betonda kullanımı”, <https://santiyede.com/silis-dumani-ve-betonda-kullanimi/>, 26 Mayıs 2022.

Anonim, “Bitüm ile stabilizasyon”, <https://www.kentharita.com/bitum-nedir/>, 13 Mayıs 2022.

Argun, T., *Yol malzemeleri ve uygulamaları*, **Atlas Yayınevi**, Ankara, 2002.

ASTM C-618. Standart Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, **The American Society for Testing and Materials**, Philadelphia, 1985.

ASTM D698-78A, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, **ASTM International**, ABD, 2009.

Ateş, H., Bahçeci, E., Nano malzemeler için üretim yöntemleri. **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, Ankara, s 483-499, 2015.

Bahmini, S., Huat, B., Asadi, A., and Farzadnia, N., “Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement”, *Elsevier*, s 350-359, 2014.

Beşergil B., “Nanokompozitler”, http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/9_3.html, 21 Mart 2021.

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

Bilgen, G., Kavak, A. ve Çapar, Ö. F., “Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşimi”, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, s 30-38, 2012.

Bilici, H., Aşırı konsolide killerin dayanım özellikleri, Y. Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2017.

Bilici, H., Okur, D., Türköz, M. ve Savaş, H., “Kil zeminin dayanımı üzerinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılarının etkisi ve karşılaştırmalı analizi”, *BEU Fen Bilimleri Dergisi*, Zonguldak, s 910-919, 2020.

Biochar, “Pirinç kabuğu külü”, https://www.biochar.ac.uk/standard_materials.php, 15 Aralık 2021.

Changizi, F., Haddad, A., “Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles”, *ICE Publishing*, s 62-71, 2017.

Çetin, A., Yüksek plastisiteli kil zeminlerin alternatif malzemeler ile yüzeysel zemin stabilizasyonu, Y.Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2011.

Develioğlu, İ., Pulat, H., “Yüksek fırın cürufunun geoteknik özellikleri ve taşıma kapasitenin belirlenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Denizli, s 433-438, 2017.

Geçkil, T., Tanyıldızı, M. M. ve Yıldırım, E., “Yüksek fırın cürufu ile stabilize edilmiş killi bir zeminin yol esnek üstyapı tabaka kalınlıklarına ve maliyetine etkileri”, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Elazığ, s 509-520, 2020.

Goodarzi, A., Salimi, M., “Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag”, *Elsevier Applied Clay Science*, s 61-69, 2015.

Gözütok, T., “Kil ve kil mineralleri”, Slideshare, <https://www.slideshare.net/tolgagztk/kil-ve-kil-mineralleri>, 20 Ekim 2021.

Gücek, S., Mermer tozu ve uçucu külün kil zeminlerin iyileştirilmesinde kullanımı, Y.Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, s. 20-21, 2011.

Gülser, C., “Toprak kimyası” <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Favys.omu.edu.tr%2Fstorage%2Fapp%2Fpublic%2Fgulser%2F69063%2F2.%2520hafta%2520K%25C4%25B0L.%2520M%25C4%25B0NERALLER%25C4%25B0N%25C4%25B0N%2520YAPISI.pdf&psig=AOvVaw0xqbPLp41Eembb0tb3bIVn&ust=164001051549300>, 20 Aralık 2021.

Majeed, Z., Taha, M. ve Jawad, I., “Stabilization of soft soil using nanomaterials”, *Maxwell Scientific*, s 503-509, 2014.

Naval, S., Chandan, K. and Sharma, D., “Stabilization of expansive soil using nanomaterials nanomaterials”, *International Interdisciplinary Conference on Science Technology Engineering Management Pharmacy and Humanities*, Singapore, s. 432-439, 2017.

Rosales, J., Agrela, F. ve Marcobal, J., “Use of nanomaterials in the stabilization of expansive soils into a road real-scale application”, *Materials* , s 1-25, 2020.

Sarsılmaz, O. M., Zemin iyileştirme yöntemlerinin sınıflandırılması, incelenmesi, değerlendirilmesi ve anılan yöntemlerin seçilme kriterleri üzerine kapsamlı bir araştırma, Y. Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, s 1-9, 2017.

Şentürk, İ., Zemin iyileştirmesinde cürufların kullanılabilirliği ve performansının karşılaştırmalı analizi, Y. Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 2016.

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

Tumluer, G., Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti, Y. Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, s. 65-66, 2006.

Türedi, Y., Örnek, M., Bal, B. B. ve Işık , A. O., “Çelikhane cürufu katkısının CBR sonuçlarına etkisinin araştırılması”, *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, s 429-435, 2017.

Tüylek, Z., “Küçük şeylerin hikayesi: nanomalzeme”, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, s 130-141, 2016.

Topçu, H. M., Yüksek plastisiteli kilin uçucu kül ve nano-SiO₂ ile stabilizasyonu, Y. Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2022

Kayar, Y., Ayhan, E., Doğruyol, M., “Mineral katkıların beton karışımında kullanılması”, *Munzur Üniversitesi Bilim ve Gençlik Dergisi*, Tunceli, s 114-120, 2017.

Keskin, İ., “Zeminlerin oluşumu”, https://kursatozcan.com/ders_notlari/toprak_mekanigi/ik/1_zeminlerin_olusumu.pdf, 25 Şubat 2022.

Keskin, İ., “Kil mineralleri ve zemin yapısı”, http://www.kursatozcan.com/ders_notlari/toprak_mekanigi/ik/14_kil_mineralleri_zemin_yapisi.pdf, 25 Şubat 2022

Yadu, L., Tripathi, R., “Effect of granulated blast furnace slag in the engineering behaviour of stabilized soft soil”, *Elsevier*, s 125-131, 2013.

Yeganeh Rikhtehgar, A., Nano malzeme ve nano polimerlerin kil zeminler üzerindeki etkilerinin incelenmesi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2016.

Yılmaz, V., Yüksek fırın cürufu ve nano-SiO₂ ile stabilize edilen yüksek plastisiteli zeminin bir boyutlu oturma davranışının araştırılması, Y. Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halidemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2021.

Yüksel, B., Konsolidasyon sürecinde kil yapısındaki değişimin araştırılması. Y. Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, s 3-30, 2007.

Zaimoğlu, A., Altun, F., ve Akbulut, R., “Nano-CuO ile hazırlanan kompozit kil karışımlarının kıvam limitleri, pH ve elektrik iletkenlik özelliklerinin incelenmesi”, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, s 290-298, 2020.

ÖZ GEÇMİŞ

Resul MUT tarihinde 'da doğdu. İlkokulu 'da, ortaokulu 'de, liseyi 'de tamamladı. Yılında bölümünü kazandı ve yılında mezun oldu. Yılında bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı ve öğrenimi devam etmektedir.



