



**ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ÇİMENTO TANE ÇAPININ ETKİSİ**

Altan ERDEM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2017

Altan ERDEM tarafından hazırlanan “ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ÇİMENTO TANE ÇAPININ ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Erdal ÇOKÇA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Ayhan GÜRBÜZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 17/11/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Altan ERDEM

17/11/2017

ÇİMENTO İLE STABİLİZE EDİLEN YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİLİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ÇİMENTO TANE ÇAPININ ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Altan ERDEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KASIM 2017

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, standart Portland çimentosu (NPÇ) ve ince taneli Portland çimentosu (MPÇ) ile stabilize edilen yüksek plastisiteli killerin geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Killi zemin numunesinin plastisite indeksi (PI) %72 olarak bulunmuştur. Standart Portland çimentosu ile hazırlanan numunelerin plastisite indeksi %17'ye kadar azalırken, ince taneli çimento ile hazırlanan numunelerin plastisite indeksi %15'e kadar azalmıştır. Optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki katkısız killi zemin numunesinin serbest basınç dayanımı 107 kPa olarak bulunmuş, nemli ortamda NPÇ ile stabilize edilen numunelerde 8 kat, MPÇ ile stabilize edilen numunelerde ise 14 kat'a kadar artış göstermiştir. Açık havada kürlenmiş numunelerde ise serbest basınç dayanımlarının 16 kat'a kadar arttığı tespit edilmiştir. Doğal halde %11 serbest şişme yüzdesine sahip olan killi zemin numunesinin optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında serbest şişme yüzdesi %9,75 olarak bulunmuştur. NPÇ, şişme yüzdesini %0,15'e kadar düşürürken, MPÇ şişme yüzdesini %0,10'a düşürmüştür. Yük-oturma deneylerinden elde edilen hacimsel sıkışma yüzdeleri kıyaslandığında optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki killi zemin numunesinin %21,7 olan hacimsel sıkışma yüzdesi, NPÇ katkısı ile %2,1'e, MPÇ katkısı ile %1,6'ya düşerken asal deformasyonlarda belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Çimento katkısının artması ve çimento tane boyutunun azalması ile geçirgenlikte azalmaktadır. Deneysel çalışmaların sonucunda, yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonunda ince taneli Portland çimentosunun standart Portland çimentosundan daha etkili olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Killerin stabilizasyonu, çimento tipleri, dayanım, permeabilite, sıkışabilirlik, şişme, Atterberg, SEM, EDS,

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

CEMENT GRAIN SIZE EFFECT ON THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF
CEMENT STABILIZED HIGH PLASTICITY CLAY

(M. Sc. Thesis)

Altan ERDEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

NOVEMBER 2017

ABSTRACT

In this study, geotechnical properties of microfine and ordinary Portland cement stabilized high plasticity clay were investigated. Plasticity index of clayey soil specimen was determined to be 72%. While plasticity index of ordinary Portland cement stabilized clay specimens decreased to 17%, plasticity index of microfine Portland cement stabilized clay specimens decreased to 15%. Unconfined compressive strength of untreated clay specimens at optimum moisture content and maximum dry unit weight determined to be 107 kPa and for ordinary Portland cement stabilized specimens with wet curing it increased eightfold and for microfine Portland cement stabilized specimens with wet curing it increased fourteen times. Unconfined compressive strength increase for dry curing reached even sixteen times the strength of untreated sample. Swell potential of natural clayey soil decreased from 11% to %9,75 after compaction at optimum moisture content and maximum dry unit weight. While the swell percentage of ordinary Portland cement stabilized clayey soil specimens were in the range of %0,35 and %0,15, the swell percentage of microfine Portland cement stabilized clayey soil specimens were in between %0,30 and %0,10. When compressibility of clay specimens at optimum moisture content and maximum dry unit weight obtained from load settelement test was taken into consideration, significant decrease was observed in principal strains while compressibility reduced from %21,7 to %2,1 for ordinary Portland cement additive and %1,6 for microfine Portland cement additive. Permeability was decreased with respect to reduction in cement particle size and increase in cement content. The results showed that microfine Portland cement is more efficient than ordinary Portland cement in the stabilization of high plasticity clayey soils.

Science Code : 91105

Key Words : Clay stabilization, cement type, strength, permeability, compressibility, swelling, Atterberg, SEM, EDS.

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU

TEŞEKKÜR

Bu çalışma esnasında yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgi birikimlerini paylaşp yol gösteren, ülkemiz için gelecek vadeden bireyler yetiştirilmesinde önemli katkılar sağlayan, zor koşullarda güçlü olmayı öğreten, hayatımın her alanında etkisini hissedeceğim saygıdeğer hocam Prof. Dr. Murat MOLLAMAHMUTOĞLU'na sevgi, saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Uzun ve zorlu çalışma sürecinde hep yanımda olan, sağladığı moral, katkı ve yardımları için Yrd. Doç. Dr. Eyüphan AVCI'ya, deneysel çalışmalarım boyunca her an yanımda olan ve çalışmalarımnda çok büyük emeği olan Uzman İnş. Yük. Müh. Aydın GÖKÇE'ye saygılarımı ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca en büyük gücü aldığım ve bana sevgi dolu bir hayat yaşatan aileme en derin ve en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KİLLERİN MİNEROLOJİSİ.....	4
3. STABİLİZASYON.....	9
3.1. Zemin Stabilizasyonu Genel Bakış	9
3.2. Stabilizasyon Gerektiren Zemin Özellikleri ve Kullanım Alanları	12
3.3. Stabilizasyon Türleri.....	16
3.3.1. Mekanik stabilizasyon.....	17
3.3.2. Kimyasal stabilizasyon.....	16
3.3.3. Zemin enjeksiyonu	22
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
4.1. Stabilizasyon Deneyinde Kullanılan Kilin Özellikleri.....	25
4.1.1. Doğal su muhtevasının tayini.....	27
4.1.2. Özgül ağırlık deneyi	28
4.1.3. Dane boyu analizi	29
4.1.4. Atterberg limitleri tayini.....	35

	Sayfa
4.1.5. Organik madde tayini.....	35
4.1.6. Kompaksiyon (Proctor) deneyi.....	37
4.1.7. Serbest şişme deneyi.....	40
4.1.8. Sıkışabilirlik deneyi.....	42
4.1.9. Permeabilite deneyi.....	43
4.1.10. Serbest basınç deneyi.....	45
4.1.11. Üç eksenli basınç deneyi.....	47
4.1.12. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi.....	50
4.2. Stabilizasyon Deneyinde Kullanılan Çimentoların Özellikleri.....	54
4.3. Stabilizasyon Deneylerinin Yapılması	56
4.3.1. Atterberg limitleri tayini.....	57
4.3.2. Kompaksiyon (Proctor) deneyi.....	60
4.3.3. Islanma kuruma	64
4.3.4. Serbest şişme deneyi.....	66
4.3.5. Yük oturma deneyi.....	68
4.3.6. Permeabilite deneyi.....	69
4.3.7. Serbest basınç deneyi	72
4.3.8. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tipik kil minerallerinin özgül yüzey alanları ve katyon değişim kapasiteleri	9
Çizelge 4.1. Doğal killi zemin numunesinin üç eksenli basınç dayanımı test sonuçları.....	49
Çizelge 4.2. Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun yüzey alanları.....	55
Çizelge 4.3. Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun tane boyu dağılımı	55
Çizelge 4.4. Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun kimyasal kompozisyonları ..	55
Çizelge 4.5. Çimento ile stabilize edilmiş killi zeminlerin LL, PL ve PI değerleri.....	59
Çizelge 4.6. Literatürde yer alan önceki çalışmalarda çimento lu kil numunelerinin şişme yüzdeleleri.....	67
Çizelge 4.7 Çimento lu killi zemin numunelerinin permeabilite katsayıları.....	72
Çizelge 4.8. Çimento katkılı killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları.....	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. (a) tekli silika dörtyüzlüsü (b) Silika dörtyüzlüsünün izometrik görünümü...	5
Şekil 2.2. Silika levhasının şematik görünümü.....	6
Şekil 2.3. (a) Tekli alüminyum sekizyüzlüsü (b) sekizyüzlü levhanın izometrik görünümü.....	6
Şekil 2.4. Sekizyüzlü veya alüminyum oksit levhasının şematik görünümü.....	6
Şekil 2.5. Kaolinit yapısının şematik görünümü.....	6
Şekil 2.6. Montmorillonit yapısının şematik görünümü	7
Şekil 2.7. Casagrande plastisite kartında yaygın kil minerallerinin alanları.....	8
Şekil 4.1. Killi zemin numunesinin tane boyutu dağılım eğrisi.....	33
Şekil 4.2. Casagrande plastisite kartında killi zemin numunelerinin sınıflandırılması...	35
Şekil 4.3. SEM analizinde görüntülenen organik maddenin EDS analizinden elde edilen element içeriği	36
Şekil 4.4. Doğal haldeki killi zemin numunesine ait kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası ilişkisi	39
Şekil 4.5. Şişme potansiyelinin aktivite – kil yüzdesi bağıntısından bulunması	42
Şekil 4.6. Doğal killi zemin numunesine ait hacimsel sıkışma grafiği	43
Şekil 4.7. Doğal killi zemin numunesinin üç eksenli basınç dayanımı Mohr daireleri ve kırılma zarfı	50
Şekil 4.8. Taramalı elektron mikroskopunun şematik görüntüsü	51
Şekil 4.9. EDS analizlerinden elde edilen doğal haldeli killi zemin numunelerine ait element içerikleri	52
Şekil 4.10. NPÇ ve MPÇ katkılı killi zemin numunelerinin zamana bağlı likit limitleri	58
Şekil 4.11. NPÇ ve MPÇ katkılı killi zemin numunelerinin zamana bağlı plastik limitleri	59
Şekil 4.12. NPÇ ve MPÇ katkılı killi zemin numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası bağıntıları.....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Çimento katkılı killi zemin numunelerinin serbest şişme yüzdeleri.....	67
Şekil 4.14. Katkısız, NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin hacimsel sıkışma yüzdeleri.....	69
Şekil 4.15. NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin zamana bağlı permeabilite (k) katsayıları	71
Şekil 4.16. Açık havada kürlemeye bırakılan NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları.....	74
Şekil 4.17. Plastik torbalar içinde nemli ortamda kürlemeye bırakılan NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Numune alma alanına ait yer bulduru haritası.....	26
Resim 4.2. (a) ve (b) İnceleme alanında kazı çukurundan UD numunelerinin alınması	27
Resim 4.3. (a) Numunenin piknometreye konması (b) Piknometrenin vakum altında çalkalanması (c) Piknometrenin oda sıcaklığına getirilmesi (d) Piknometrede kalan boşluğun saf su ile doldurulması.....	29
Resim 4.4. (a) Numunenin tartılması (b) su katılan numunenin 200 no'lu elekten Geçirilmesi (c) 200 no'lu elek üstü malzemenin tartılması (d) 200 no'lu elek üstü malzemenin elek serisinden geçirilmesi.....	30
Resim 4.5. (a) Numunenin tartılması (b) Numuneye sodyumheksametafosfat eklenmesi (c) Karışımın mekanik karıştırıcıda karıştırılması (d) Hidrometre okumalarının alınarak çökme sürelerinin tespit edilmesi.....	32
Resim 4.6. (a) Numunenin karıştırılması (b) LL deneyinin yapılması (c) Numunelerin yuvarlanması (d) Yuvarlanan numune çapının 3 mm'ye indirilmesi.....	34
Resim 4.7. (a) Killi zemin numunelerinin SEM analizi görüntülerinde organik madde tayini (b) Tespit edilen organik maddenin yakın görünümü.....	36
Resim 4.8. (a) Proctor kalıbının yağlanması (b) Numunenin sıkıştırılması (c) Sıkıştırılan numunenin ve numune kalıbının tartılması (d) Numunenin kalıptan çıkartılması.....	39
Resim 4.9. (a) Konsolidasyon halkası ile numunenin alınması (b) Numunelerin konsolidasyon cihazına yerleştirilmesi.....	40
Resim 4.10. (a) Plastik moldlara sıkıştırılmış killi zemin numunesi (b) Moldların hazırlanması (c) Moldların bağlanması (d) Hidrolik yük uygulaması.....	44
Resim 4.11. (a) Serbest basınç dayanımı testinin yapılması (b) Serbest basınç dayanımı testi sonunda test numunesinin deformasyonu.....	46
Resim 4.12. (a) UD tüplerinin çıkarılması (b) UD tüplerindeki numune yüzeylerinin düzeltilmesi (c) Numunelerin UD tüğünden çıkarılması (d) Numune boyutlarının kontrolü.....	48
Resim 4.13. (a) UD tüpünden çıkarılan numunenin tartılması (b) Çıkarılan numunelerin desikatörde saklanması (c) Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyinin yapılması (d) Deney sonunda numune deformasyonu ve kırılma şekli.....	49
Resim 4.14. Doğal killi zemin numunesinin SEM analizi görüntüleri.....	53

Resim	Sayfa
Resim 4.15. Farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış killi zemin numunelerinin SEM analizi görüntüleri	53
Resim 4.16. (a) Açık havada kurutulan killi zemin numuneleri (b) Killi zemin numunelerinin çelik kalıplara konması (c) Killi zemin numunelerinin çelik tokmak ile öğütülmesi (d) öğütülen killi zemin numuneleri.....	56
Resim 4.17. (a) Çimentolu numunenin görünümü (b) Çimentolu numuneye suyun eklenmesi (c) Çimentolu numunenin karıştırılması (d) Spatula yardımı ile suyun karışıma eşit olarak dağıtılması.....	57
Resim 4.18. Atterberg limitleri tayini için 56 gün kür süresi uygulanmış numune	58
Resim 4.19. (a) Kil numunelerin karıştırma kabına konması (b) Çimentonun eklenmesi (c) Çimento ve kilin homojen bir görünüm alana kadar karıştırılması (d) Homojen kil-çimento karışımı	61
Resim 4.20. (a) Kompaksiyon moldlarının yağlanması (b) Kompaksiyon deneyinin yapılması (c) Sıkıştırılan numunenin çelik moldlardan çıkartılması (d) Sıkıştırılmış numunenin görünümü	62
Resim 4.21. (a) Açık havada kürlen numunelerde oluşan çatlaklar (b) Plastik poşetlere sarılarak kürlen numunelerde oluşan çatlaklar	65
Resim 4.22. (a) Numunelere suyun eklenmesi (b) Su eklenen numunelerin dağılması .	65
Resim 4.23. (a) Numunelerinin çelik modlar ile sıkıştırılması (b) Çelik moldlar ile hazırlanmış şişme deneyi numunesi (c) Sıkıştırılan numunenin şişme deneyine hazırlanması (d) Hazırlanan numunenin konsolidasyon cihazına yerleştirilmesi	66
Resim 4.24. Yük oturma deneyi numuneleri	68
Resim 4.25. Permeabilite deneyi numuneleri	70
Resim 4.26. (a), (b) ve (c) Serbest basınç dayanımı testi için numune hazırlama moldu	72
Resim 4.27. (a) ve (b) NPÇ katkılı killi zemin numunelerinin yenilme biçimleri, (c) ve (d) MPÇ katkılı killi zemin numunelerinin farklı yenilme biçimleri....	73
Resim 4.28. (a) ve (b) Taramalı elektron mikroskobu.....	76
Resim 4.29. (a) %8 NPÇ katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (b) %8 NPÇ katkılı numunedeki etrenjit oluşumu (c) %12 NPÇ katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (b) %12 NPÇ katkılı numunedeki etrenjit oluşumu.....	76

Resim**Sayfa**

Resim 4.30. (a) %8 MPÇ katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (b) %8 MPÇ katkılı numunedeki etrenjit oluşumu (c) %12 MPÇ katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (b) %12 MPÇ katkılı numunedeki etrenjit oluşumu.....	77
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Zemin numunesi enkesit alanı, mm ²
A_o	Zemin numunesinin düşey alanı, cm ²
a	Düşey borunun yüzey alanı, cm ²
C	Koheyzon, kN/m ²
C_m	Menisküs düzeltmesi
D	Eşdeğer tane çapı
G_s	Zemin özgül ağırlığı
H_o	Numunenin deney öncesi yüksekliği, cm
H₁	Numunenin şişme sonrası yüksekliği, cm
H_r	Hidrometre kalibrasyon eğrisinden alınan değer
h₁	Deney başlangıcındaki hidrolik basınç yüksekliği, cm
h₂	Deney sonunda hidrolik basınç yüksekliği, cm
k	Permeabilite, cm/s
K	Eşdeğer tane çapından küçük tanelerin yüzdesi, %
L	Numunenin yüksekliği, cm
LL	Likit limit, %
M₁	Boş kabın ağırlığı, g
M₂	Kap ve yağ numunenin toplam kütlesi, g
M₃	Kap ve kuru numunenin toplam kütlesi, g
M_a	Açıkta kurutulan zemin kütlesi, g
M_b	Deney sonu zemin kütlesi, g
M_k	Kalıp ve kalıp tabanının kütlesi, g
M_{ks}	Kalıp, kalıp tabanı ve sıkıştırılmış zeminin kütlesi, g
M_s	Kuru numune ağırlığı, g
M_t	Sıcaklık düzeltmesi
M_{pws,t}	Piknometre, kuru numune ve saf su toplam ağırlığı, g
M_{pw,t}	Piknometre ve saf su toplam ağırlığı, g

Simgeler**Açıklamalar**

OWC	Optimum su muhtevası, %
P	Kütle kaybı yüzdesi, %
P_a	Numuneye uygulanan eksenel yük
pH	Hidrojenin Potansiyeli
PI	Plastisite indeksi, %
PL	Plastik limit, %
R_{h1}	Menisküsün üst sınırında hidrometre okuması
S	Serbest şişme yüzdesi, %
t	Zaman, s
V_a	Hava boşluğu yüzdesi, %
w	Su muhtevası, %
X	Dağıtma düzeltmesi
ρ	yoğunluk
ρ_s	Zemin numunesinin yoğunluğu, g/cm ³
ρ_k	Zemin numunesinin kuru yoğunluğu, g/cm ³
ρ_n	Zemin numunesinin yaş yoğunluğu, g/cm ³
ρ_{w,t}	Saf suyun yoğunluğu, g/cm ³
μ	Suyun viskozitesi, g/(cm·s)
σ	Basınç, kPa
ε	Eksenel birim Şekil değiştirme, %
ΔH	Numunede ölçülen eksenel Şekil değiştirme, mm
Ø	İçsel sürtünme açısı, derece
τ	Kayma gerilmesi, kN/m ²

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ASTM	American Society for Testing Materials
AASHTO	American Association of State Highway Officials
ACI	American Concrete Institute
CAH	Kalsiyum alüminat hidrat
CH	Yüksek Plastisiteli Kil

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CSH	Kalsiyum silikat hidrat
C₂S	Dikalsiyum silikat
C₃A	Trikalsiyum Alüminat
C₃S	Trikalsiyum silikat
C₄AF	Tetrakalsiyum Alüminoferrit
D	Örselenmiş Numune
EDS	Enerji dağılım spektrometresi
NPÇ	CEM 42.5 SR Standart Portland çimentosu
MPÇ	Rheocem 650 SR mikro ince Portland çimentosu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UCS	Serbest basınç dayanımı
UD	Örselenmemiş Numune
UU	Konsolidasyonsuz drenajsız

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze, mühendislik yapıları ya zeminden zemin üzerine ya da zemin içine inşa edilmiştir. Günümüzde zayıf zeminlerin inşa amacına uygun hale getirilmesi ihtiyacı doğmuş, bu ihtiyaç neticesinde zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarına başlanmıştır. Zeminlerin ıslahında katkı maddesi olarak bitki köklerinden başlanılarak günümüzde farklı kimyasal maddelerin kullanımına kadar farklı yöntemler uygulanmıştır.

Dünyanın birçok bölgesinde yer alan yüksek plastisiteli killerin en önemli özellikleri, düşük dayanımlı olması, yüksek şişme ve büzülme potansiyeline sahip olmasıdır. Bu gibi özellikler yapı temellerinde, yeraltı yapılarında, otoyol ve hava alanı pistlerinde taşıma gücü problemlerine sebep olmaktadır [1].

Şişebilen zeminlerin binalar, gömülü yapılar ve yollar üzerindeki etkilerinin yıllık maliyeti İngiltere’de 150 milyon sterlin, Amerika Birleşik Devletlerinde 1 milyar dolar, dünya genelinde ise milyarlarca sterlin civarındadır [2].

Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için, şişebilen doğal zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler genellikle mekanik ve kimyasal stabilizasyonlardır. Kimyasal stabilizasyonlarda genel olarak kireç, çimento ve uçucu kül kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde zemin içerisinde yer alan suyun bu maddeler ile kimyasal reaksiyona girmesi stabilizasyonu gerçekleştirir. Killi zeminlerin çimento ile stabilizasyonu, bu zeminlerin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde dünya genelinde sıklıkla uygulanan yöntemdir. Özellikle çimento stabilizasyonu denizel killerin plastisite indeksini düşürerek daha işlenebilir hale getirir. Çimentonun zeminle birçok şekilde kimyasal reaksiyona girmesiyle zeminin basınç dayanımını ve taşıma kapasitesi artar [3,4].

Zeminin türü, plastisitesi, çimento miktarı, karıştırma ve sıkıştırma metotları, kür koşulları, tane çapı dağılımı vs. gibi etmenler stabilizasyonun performansını etkiler. Bu konu birçok yazar tarafından tartışılmıştır. [5-11]

Zeminlerde plastisite indisinin azalması, kompaksiyon işleminde optimum su muhtevasının tespit edilerek kullanılması, zemin kütlesinin kayma direncinin arttırılması, geçirimliliğin azaltılarak hacimsel değişiminin sınırlandırılması iyileştirmeyi karakterize eden özellikler arasındadır. Kireç, çimento, uçucu kül ve benzeri farklı katkı maddelerinin, zemin kütlesinin kurutulması işleminden sonra toz halinde eklenmesi ve karıştırılması ile stabilizasyon gerçekleşmektedir. [5-11]

Tüm bu çalışmalara rağmen, çimento partikül boyutunun killi zeminlerin mühendislik parametreleri üzerindeki etkisi, yurt içinde ve dışında şimdiye kadar araştırılmamıştır. Bu çalışmada çimento partikül boyutunun yüksek plastisiteli killerin dayanım, kıvam limitleri, Sıkışabilirlik ve geçirgenlik gibi geoteknik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Tezin amacı

Bu yüksek lisans tezi kapsamındaki deneysel çalışmalarda Ankara ilinin Gölbaşı ilçesinden alınan örselenmiş ve örselenmemiş yüksek plastisiteli kil numunelerine %8, %10 ve %12 oranında çimento ilave edilerek oluşturulan numunelerin geoteknik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Stabilizasyon deneylerinde standart Portland çimentosu (CEM I 42.5 SR) ve ince daneli Portland çimentosu (Rheocem 650 SR) kullanılmış, çimento tane büyüklüğünün killi zeminin geoteknik parametreleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kil numuneleri üzerinde doğal su muhtevası (w), doğal birim hacim ağırlık (γ), kıvam limitleri (PL, LL, PI), elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık (ρ), sıkışabilirlik, Proctor, permeabilite (k), şişme, organik madde tayini, serbest basınç dayanımı (UCS) ve konsolidasyonsuz drenajsız (UU) üç eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmış, SEM analizi ile EDS görüntüleri alınmıştır.

Deneyler sonucunda %8, %10 ve %12 çimento katkısı ile standart Portland çimentosu (NPÇ) ve ince daneli Portland çimentosu (MPÇ) katkısının yüksek plastisiteli kilin geoteknik özellikleri üzerinde yaptığı iyileşme belirlenmeye çalışılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında planlanan ve gerçekleştirilen çalışmalar aşağıdaki gibidir.

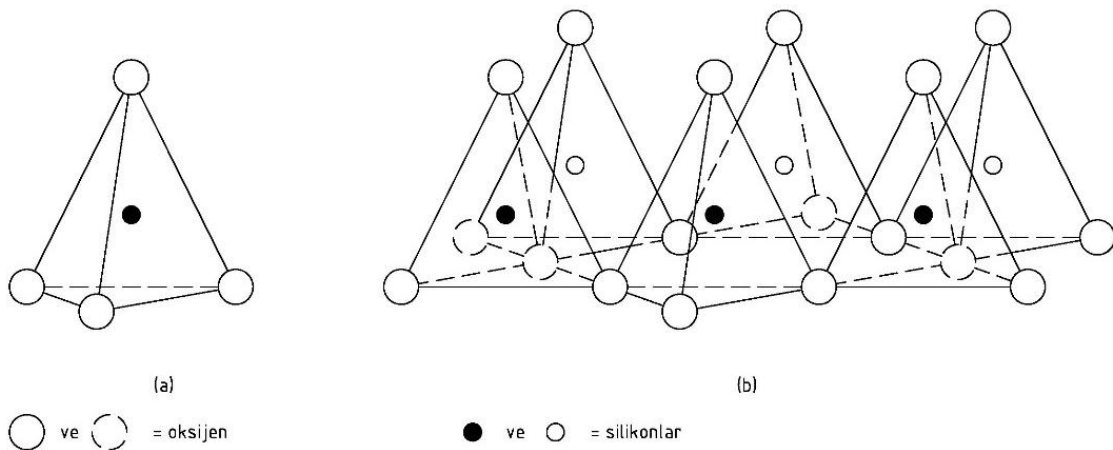
- 1-) İlk olarak deneysel çalışmalarda kullanılacak standart Portland çimentosu (NPC) ve ince taneli Portland çimentosu (MPC) Rheocem 650 ve yüksek plastisiteli killi zemin numunesi temin edilmiştir.
- 2-) Araziden temin edilen örselenmiş kil numuneleri açık havada kurumaya bırakılmış, kurutulan numuneler çelik tokmak yardımı ile öğütülmüştür.
- 3-) Örselenmiş ve örselenmemiş kil numunelerinin ASTM standartlarına göre endeks özellikleri ile mukavemet parametreleri tespit edilmiştir.
- 4-) Etüvde kurutulan NPC,MPC ve öğütülmüş kil numuneleri kuru halde karıştırılmış, sonrasında doğal killi zemin numunesinin optimum su muhtevası değerinde kil numunelerinin kuru ağırlığınca %8, %10 ve %12 oranında NPC ve MPC eklenerek karışım numuneleri hazırlanmıştır.
- 5-) Hazırlanan karışım numuneleri üzerinde ASTM standartlarına göre Proctor deneyi yapılarak her bir karışım numunesi için optimum su muhtevasının (w) elde edilmesi amaçlanmıştır.
- 6-) Doğal killi zemin numunesinin optimum su muhtevasında (w) hazırlanan karışım numuneleri çelik moldlar yardımı ile sıkıştırılmış, hem açık havada (kuru ortamda) hem de plastik torbalar içinde (nemli ortamda) kür odasında saklanmıştır.
- 7-) Her biri %8, %10 ve %12 oranında NPC ve MPC ile hazırlanmış üçer adet nemli ve üçer adet kuru numunelere 0, 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 114 gün kür süresi uygulanmış ve serbest basınç dayanımı (UCS) deneyleri gerçekleştirilmiştir.
- 8-) Çimento katkılı kuru ve nemli numuneler üzerinde Atterberg, Proctor, ıslanma kuruma, serbest şişme, yük oturma, düşen seviyeli permeabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobunda analizler yapılarak EDS görüntüleri incelenmiştir.
- 9-) Tüm deneysel çalışmalardan sonra NPC ve MPC ile stabilize edilmiş kil numunelerin geoteknik özellikleri kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.

2. KİLLERİN MİNEROLİJİSİ

Killerin tane boyutu 2 mikrondan küçük olmakla beraber, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşurlar. Killer su ile karıştırıldığında hacimleri artar, kurutulduğunda hacimleri azalır ve çatlar. Şekil verilebilir bir plastisiteye sahipken, pişirildiğinde dayanımı yüksek olan katı bir malzemeye dönüşür [12].

Kil, inşaat mühendisliğinde, kaolin veya illit gibi minerallerin haricinde farklı mineraller ile birlikte kil minerali içeren kohezyonlu ve plastisiteli olan killi zeminler anlamına gelmektedir. Suyun varlığında killi zeminlerin davranışı önemli ölçüde etkilenirken, zeminin tane boyu dağılımı daha az etki göstermektedir. Kil içeriği %50 olan zeminlerde kum ve silt'in varlığı zeminin mühendislik davranışına etkisi çok azdır. Kil mineralleri aktif bir elektrokimyasal partiküller olup zemin içerisindeki az miktardaki varlığı bile zemin kütlelerinin mühendislik özelliklerinde değişime yol açmaktadır [12].

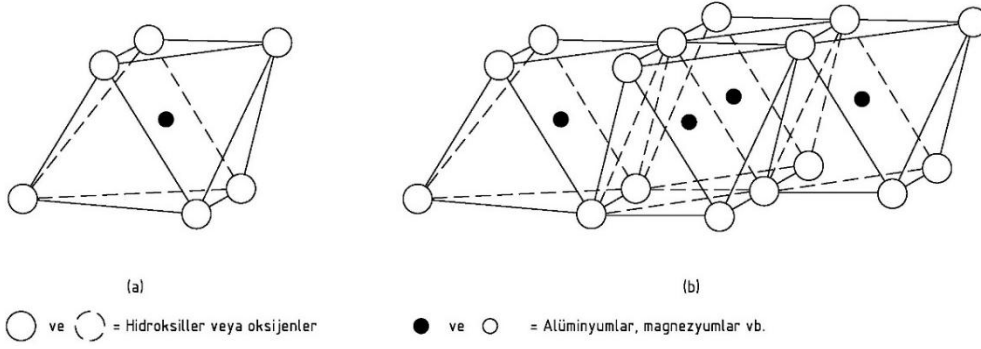
Kil mineralleri ince plaka veya levha şeklinde, dört yüzlü silika levhası ve sekiz yüzlü alümina levhasından oluşan, kolloidal boyutta malzemelerdir. Kristal plakalardan oluşan bu malzemeler sadece elektron mikroskopunda görülebilmektedir. Tek bir silika dört yüzlüsü bir silika atomunun dört oksijen atomu ile çevrenmesi ile oluşur. Benzer şekilde, sekiz yüzlü levhalar ise, hidroksilin, alüminyumun, magnezyumun, demir ya da farklı metalik atomların altı oksijen atomu ile çevrenmesi ile meydana gelmektedir. Farklı katyon türlerine sahip sekiz yüzlü ve dört yüzlü levhalar aşağıdaki Şekil 2.1., Şekil 2.2., Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'te gösterilmiştir [12].



Şekil 2.1. (a) Tekli silika dört yüzlüsü (b) Silika dört yüzlüsünün izometrik görünümü



Şekil 2.2. Silika levhasının şematik görünümü

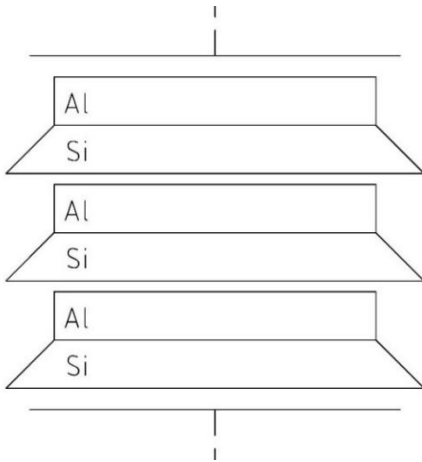


Şekil 2.3. (a) Tekli alüminyum sekizyüzlüsü (b) Sekizyüzlü levhanın izometrik görünümü



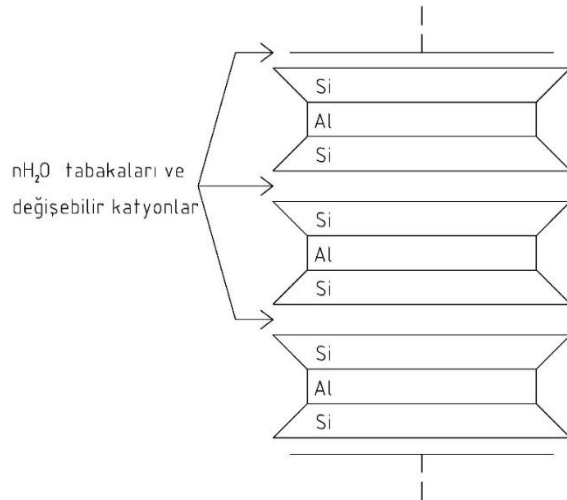
Şekil 2.4. Sekizyüzlü veya alüminyum oksit levhasının şematik görünümü

13 farklı mineral içeren 1:1 kil minerallerinin en önemlileri kaolinit ve halloysit'tir. Bu mineraller dötyüzlü silika levhasının oksijenleri ile sekizyüzlü alümina levhasının hidroksilleri arasında meydana gelen hidrojen bağları ile birbirine bağlanarak oluşmaktadır. Bu hidrojen bağları çok kuvvetli olduğundan hidrasyon önlenemekte ve daha büyük kristal yapıların oluşabilmesine imkan vermektedir. Kaolinit yapısının şematik görünümü aşağıdaki Şekil 2.5.'te sunulmuştur. [12].



Şekil 2.5. Kaolinit yapısının şematik görünümü (Lambe, 1953)

40'dan fazla mineral içeren 2:1 kil mineralinin en önemlisi smektit grubundan olan montmorillonittir. Montmorillonit iki dörtyüzlü silika levhasının arasında bir sekizyüzlü alümina levhasının birleşmesinden oluşmaktadır. Silikat levhalarının tepe noktaları arasındaki Van der Waals kuvvetiyle oluşan bağların zayıf olması nedeni ile su ve değişebilir iyonlar, katyonlar arasına girerek levhaları ayırabilmektedir. Montmorillonit kristalleri bu nedenle daha küçük yapıda fakat aralarındaki çekim kuvvetleri ise daha fazladır. Montmorillonit içeren zeminlerin su içeriği arttığında şişme yüzdeleri ve şişme basınçları oldukça fazla olmakta, yol dolgusu veya temel zemini olarak kullanıldığında yapılara zarar vermektedir. Montmorillonit yapısının şematik görünümü aşağıdaki Şekil 2.6.'da verilmiştir [12].



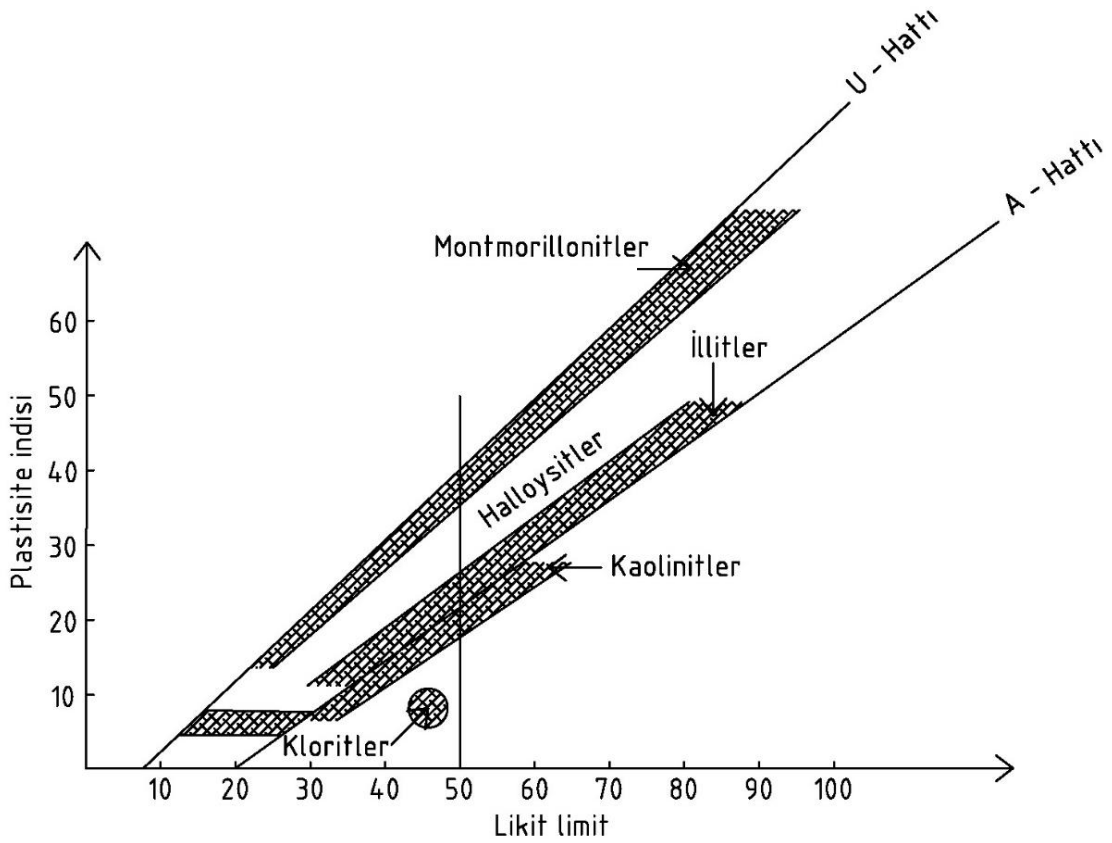
Şekil 2.6. Montmorillonit yapısının şematik görünümü

Mitchell ve Soga (2005), Mg^{++} ve Ca^{++} iyonlarının Na^{++} ve K^{+} iyonlarından daha yoğun olduğu bölgelerde smektit grubunun yer aldığını belirtmiştir. Şişme özelliğinden dolayı geçirimsizlik perdelerinin stabilizasyonunda kullanılan ve yoğun olarak montmorillonit ve diğer smektit minerallerini içeren bentonit, birbirine potasyum iyonları ile bağlanmış olan illit, birbiri ardına sıralanan, silika levhası, alümina levhası, silika levhası ve de gipsit veya brusit levhasından meydana gelen klorit diğer yaygın kil mineralleridir. Klorit minerali diziliminden dolayı 2:1:1 olarak gösterilmektedir [12].

Malzemelerin üzerine gönderilen X ışını kırılmakta ve farklı yapıya sahip malzemeler farklı kırılma Şekilleri ile yansımaktadır. Bu X-ışını kırılma Şekilleri ile mineraller

tanımlanmaktadır. Kil minerallerinin karışımında yer alan organik maddeler, karışık tabakalı kil minerali içeriği gibi etmenler, X-ışını analizini zorlaştırmaktadır fakat yine de zemin içerisinde hangi mineralin var olduğu ve kabaca oranları tespit edilebilmektedir [12].

Kil minerallerinin tespiti X-ışını kırınımı ile belirlense de bu yöntemi uygulamak her zaman kolay değildir. Prof. Casagrande tarafından daha basit bir yöntem ile yaklaşık bilgiler elde edilebilmektedir. Numuneye ait Atterberg limit değerleri, Casagrande plastisite grafiğinde işaretlenmekte ve hangi mineral içeriğine sahip olduğu tespit edilebilmektedir. Atterberg limitlerini tek başına kullanmak yeterli olmakta, ayrıca killerin aktiviteleri ile kil mineralinin türü arasındaki bağlantılar önemli bir bilgi getirmemektedir. Aşağıdaki Şekil 2.7.'de Casagrande Plastisite Kartı gösterilmiştir [12].



Şekil 2.7. Casagrande plastisite kartında yaygın kil minerallerinin alanları

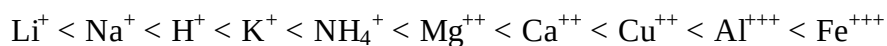
Özgül yüzey bir malzemenin yüzey alanı ile kütlesinin ya da hacminin oranıdır. Özgül yüzey çimentolu karışımlarda, kil ve çimento yüzeylerinin optimum oranda kaplanması için yeterli çimento miktarının belirlenebilmesi açısından önemlidir [12].

İnce taneli zeminlerin özgül yüzeyleri, iri taneli zeminlerin özgül yüzeylerinden oldukça büyüktür ve daha aktif yüzeye sahiptir. Yüzey aktivitesinin dane boyutuna bağlı olması nedeni ile yüzey alanı en büyük olan montmorillonit kil mineralinin kaolinit mineralinden daha aktif olması beklenmektedir. Adsorbe su tabakalarındaki ki yüzeyine yakın yerlerde yoğun olarak bulunan katyonlar, kil tanesinin yüzeyinden uzaklaşarak katyon yoğunluğunu dengeler. Bu difüzyon olayı, killerin katyon değişme kapasiteleri ve buna bağlı olarak killerin plastisite ve şişme özellikleri arasındaki etkileşimin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Aşağıdaki Çizelge 2.1.'de tipik kil minerallerinin özgül yüzey alanları ve buna bağlı olarak katyon değişim kapasiteleri verilmiştir [12].

Çizelge 2.1. Tipik kil minerallerinin özgül yüzey alanları ve katyon değişim kapasiteleri

Kil Minerali	Tipik Kalınlık (nm)	Tipik Çap (nm)	Özgül Yüzey (km ² /kg)	Katyon Değişim Kapasitesi (meq/100 g)	Referans
Montmorillonit	3	100-1000	0,7 – 0,84	80-150	12
İllit	30	10000	0,065 – 0,1	10 – 40	
Klorit	30	10000	0,08	10 – 40	
Kaolinit	50 - 2000	300 - 4000	0,01-0,02	2 - 15	

Yüksek değeriğe sahip katyonlar, düşük değeriğe sahip katyonlardan daha fazla yer değiştirme kuvvetine sahiptir. Aynı zamanda iyonların büyüklüğü de yer değiştirme kabiliyetini artırmaktadır. Aşağıda gösterildiği üzere kalsiyum iyonları sodyum iyonlarından daha yüksek yer değiştirme kuvveti olduğundan, kireç ve çimento ile yapılan stabilizasyonlarda kil içerisindeki sodyum iyonları, çimento ve kireç içerisindeki kalsiyum iyonları ile yer değiştirerek sodyum montmorillonit kilinin şişme potansiyelleri azaltılabilmektedir. İyonların yer değiştirme kapasiteleri aşağıda gösterilmiştir [12].



3. STABİLİZASYON

3.1. Zemin Stabilizasyonu Genel Bakış

Zemin stabilizasyonu, zeminin geoteknik özelliklerinin planlanan mühendislik kullanımına uygun hale getirilmesini sağlayan işlemlerdir. [13].

Stabilizasyon, zeminin geoteknik özelliklerini çeşitli katkı maddeleri ile iyileştirilmesidir. Stabilizasyon un taşıma gücünü arttırmak, oturmaları ve deformasyonları minimize etmek, permeabiliteyi azaltmak gibi hedefleri olabilmektedir [14].

Zemin ve kil, insanoğlu medeniyetlerinin en erken dönemlerinden bu yana yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Dünyanın az gelişmiş ülkelerinde düşük maliyetli evlerin inşasında stabilize edilmiş zeminin kullanım olanakları Birleşmiş Milletler Örgütü ve diğerleri tarafından dikkate alınmıştır [15].

Bazı killi zeminlerin dayanıksızlığı sebebi ile kullanılmadan önce özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Yapı endüstrisinde, killi zeminler mühendislerin kabusu olmayı başarmıştır. Killi zeminler yüksek şişme, büzülme ve çevre şartlarındaki değişimlere aşırı duyarlılık gibi özelliklere sahiptir [16].

Yapı işlerinde kullanılan killi zeminler, nemli ve kuru hava değişimlerine maruz kaldığında şişmekte ve çatlamaktadır. Bu özellikler, killi zeminleri yapı işleri için en az elverişli zemin olarak sınıflandırmaktadır.

Yüksek miktarda kil inşaat ve atık sahasından ortaya çıkmaktadır. Killi zeminlerin gerektiğinde şişme ve büzülme özelliklerinin iyileştirilerek, bu tür malzemelerin kullanılabilir hale getirilmesinin yollarının belirlenmesi gerekmektedir. İyileştirme çalışmalarında zeminin plastisite, sıkışabilirlik ve geçirgenlik gibi özelliklerinin azaltılması ve dayanımının artırılması amaçlanmaktadır. Zemin daneleleri arasındaki fiziksel ve kimyasal bağların iyileştirilmesine katkı yapan başlıca maddeler, kireç, çimento ve uçucu küldür. (Çokça E.; Özaydın, 1997).

İyileştirmenin yöntemi fiziksel veya kimyasal olabilir. Çoğu durumda, zemin özelliklerinin

değişimi kalıcıdır. Katkı maddeleri kullanılarak zeminlerin iyileştirilmesi (zemine malzeme eklenmesi) genellikle zemin iyileştirme olarak adlandırılır. Çoğu kez zeminlerde sonuçlandığı gibi mühendislik özelliklerinin değişime daha az duyarlı olması sebebiyle daha stabil olarak adlandırılır. Zemin katkıları, doğal zeminler, kimyasal ayrıştırıcılar, bağlayıcı maddeler, polimerler, endüstriyel malzemeler, tuzlar gibi çok geniş bir yelpazeye sahiptir [17].

Katkı maddeleri kullanarak zemin iyileştirme, ekonomik yol yapımı, malzemelerin dayanıklılığı, yatırımın korunması için kullanılmaktadır. Çoğu zaman, doğal yapısı sebebi ile zayıf olan zeminler, katkı maddeleri ile iyileştirilerek kullanılabilir hale getirilebilirler. Katkı maddeleri ile iyileştirme, zemin yapısının daha güçlü ve dayanıklı hale getirilmesi ile geoteknik yetersizliklerin ortadan kaldırılmasında da kullanılmaktadır. Katkı maddeleri ile iyileştirme yolların rehabilitasyonunda ve tabi ki yeni projelerde rutin olarak kullanılmaktadır [17].

Katkı maddelerinin kullanımı yapay ve doğal zeminleri iyileştirir. Bu sayede önemli ölçüde maliyetlerin azaltılması mümkün hale gelmektedir. Bunlar, düşük maliyetli temel tasarımlarının gerekmesi, hacimsel olarak daha az dolgu malzemesi kullanımı, düşük dayanımlı zeminlerden faydalanılması ve geleneksel kazı/dolgu yöntemlerinden vazgeçilerek ekonomik tasarrufların uygulanması ile başarılabılır. Bu özellikle iyi derecelenmiş zeminler için önemli ve kullanışlıdır fakat yine de kötü derecelenmiş granüler zeminler için de çok sayıda uygulama vardır. Katkı maddesi kullanımındaki diğer bir önemli etken ise, çoğu alanda kullanılabilir konvansiyonel agregaların yeterli olarak bulunmamasıdır. Çevresel kaygılar, yönetmelikler ve arazinin kullanım yapısı kullanılabilir agreganın elverişliliğine ciddi şekilde etkilemektedir. Fiziksel iyileştirme, belirli tane boyutunda zeminin eklenip çıkarılmasıyla zemin gradasyonunun değiştirilmesiyle veya herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşturmada ve zeminin minerolojik yapısında değişikliğe neden olmadan zemin partiküllerini fiziksel olarak bir arada tutmak için bağlayıcı görevi yapan maddeler kullanılarak yapılabilmektedir. Buna karşılık, zeminin minerolojik yapısındaki fizikokimyasal değişikliğe neden olan reaksiyonları meydana getiren maddeleri ekleyerek kimyasal iyileştirme yapılabilmektedir. Bu değişiklikler, zeminin esas sınıflandırılmasında bile değişikliğe yol açan, zeminin karakteristiklerinin iyileştirilmesi olarak adlandırılırlar [17].

Zemin, çimentolaşma maddesi ve nem olduğunda, zemin, çimento ve suyun fiziko-

kimyasal etkileşimi sebebi ile zemin partikülleri bir araya gelerek modifikasyona sebep olurlar. Bu modifikasyon, partikül seviyesinde gerçekleştiğinden, istenilen dayanımda homojen bir kütle edilmesi mümkün değildir. Kompaksiyon, zemin partiküllerinin birbiri üzerinde kayarak yoğun biçimde sıkışmış hale gelmesi için gerekmektedir. Bu durumda, zemin partikülleri kimyasal bağlayıcılar sayesinde birbirine kaynaşmış olabilir ve mühendislik malzemesi olarak kullanılabilir. Çoğu ülkede, uçucu kül gibi atık malzemelerin üretimi genellikle kullanımlarından fazladır. Bu küllerin Tip 1 Portland çimentosu ile belli miktarda karıştırılarak kullanılması ise ilgi çekici olmuştur. Su içeriği, çimento miktarı, kür süresi ve laboratuvardaki sıkıştırma enerjisi gibi bazı etkili faktörlerin çimento ile stabilize edilmiş zeminlerin mühendislik karakteristiklerine tesirleri kapsamlı olarak araştırılmaktadır [18-28].

Sahada yapılan uygulamalarda karıştırma oranı, su-çimento oranı ve kür şartları gibi etkenlerin çimentolu zeminlerin dayanımlarındaki iyileştirmeye olan etkisi araştırılmıştır [28-32]. Mevcut basınç ve kesme test sonuçları esas alındığında, çimentolu zeminlerin mühendislik davranışlarını betimleyen çok sayıda temel modeller geliştirilmiştir [33-36]. Bu araştırmalar, başlıca mikro yapı tarafından kontrol edilen mekanik özellikler üzerine odaklanmıştır. Bu yapı, partikül dizilimi, kümelenmeler ve çimentolaşma ile birlikte zeminde oluşan boşluk hacmi sistematığıdır [37]. Bu nedenle, etken faktörlerdeki değişimlerin mühendislik özellikleri üzerinde neden oldu değişimleri anlamak çok önemlidir.

Kalsiyum ağırlıklı kireç (sönmüş kireç, sönmemiş kireç, kireç kaymağı), yol çimentoları ve özel bağlayıcılar en çok kullanılan katkı maddeleridir. Bu maddelerin, içeriğinde su bulunan ince taneli zeminlerin ve onların killi fraksiyonlarının üzerindeki etkisi uygulamalarda dikkat çekici olmuştur [38-43]. İyileştirme çalışmaları, şişen zeminler üzerinde uygulanmaya devam etmiş ve çimento ile kirecin bu şişen zeminlerin plastisitesi ve şişme karakteristikleri üzerine etkisi teyit edilmiştir [38, 40, 43-49]. Diğer iyileştirme ürünleri (kumullar, tuz, uçucu kül, zift, taş tozu ve onların bileşimleri) şişen zeminleri ve diğer problemlili zeminleri iyileştirmede kullanılmıştır [50-57]. Elde edilen test sonuçları, üzerinde çalışılan zeminlerin geoteknik özelliklerinde iyileştirme göstermiştir.

Portland çimentosu, kireç, cüruf, sodyum silikat, fosforlu bileşikler ve bazen bu maddelerin kombinasyonu ile inorganik bileşikler stabilizasyonda kullanılmıştır. Sodyum

klorür ve kalsiyum klorür gibi çeşitli inorganik tuzlar, plastisiteyi azaltmak ve zemini sıkılaştırmak için uzun süredir kullanılmaktadır [58-64]

3.2. Stabilizasyon Gerektiren Zemin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Stabilizasyon teknikleri ile zeminin aşağıdaki özellikleri iyileştirilebilir [65]:

Hacimsel Stabilité

Zeminin su muhtevastaki değışimler, hacimsel değışikliklere yol açabilir. Hacimsel stabilitenin sağlanması için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden drenaj yapılması, sürşarj uygulanması vb. tedbirler geniş uygulama alanına sahiptir.

Mukavemet

Zeminlerin dayanımı ile ilgili sorunlar, çoğunlukla organik madde içeriğı yüksek olan zeminlerde ortaya çıkmaktadır. Sıkıştırma, sürşarj uygulaması, çimento, kireç vb. kimyasal katkı maddeleri ile iyileştirme yapılarak bu sorunlar giderilmektedir.

Permeabilite

Zeminlerin geçirgenliğinin değışkenmesinde en etkili yöntemlerin başında sıkıştırma işlemleri gelmektedir. Ayrıca, kireç, çimento, uçucu kül vb. katkı maddeleri ile yapılan ıslah çalışmaları da zeminlerin geçirgenlik özelliğini modifiye edebilmektedir.

Sıkışabilirlik ve Konsolidasyon

Kompaksiyon, zeminlerin diğer geoteknik özelliklerinde olduğu gibi, sıkışabilirlik özelliğinin ıslah edilmesinde de etkin olarak kullanılan bir yöntemdir.

Durabilite

Zeminlerin hacimsel stabilitesi, mukavemeti, permeabilitesi, sıkışabilirliği vb. özelliklerden herhangi birinin olumsuz yönde değişimine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır.

Dünyanın çoğu bölgesinde, zayıf zemin koşulları emniyetli inşaatı ve kaliteli altyapıların geliştirilmesine engel olmuştur. Çoğu insan için, yaşam ulaşım hatları zayıf alt temel zeminleri ve kalitesiz dolgu ve platform malzemeleri nedeniyle etkilenmektedir. Bu durumlar genellikle az gelişmiş veya gelişmekte olan, zemin iyileştirme tekniklerinin uygulamada aşırı yetersiz kaldığı veya hiç uygulanmadığı bölgelerde meydana gelmektedir. Bu olayların çoğunda, nispeten basit ve pahalı olmayan zemin iyileştirme teknikleri, hali hazırda mevcut olan katkı maddeleri ve teçhizatın kullanımı, hızlı bir şekilde durumu iyileştirebilir ve bozulmayı azaltabilir ki aksi takdirde sürekli onarım gerekebilir. Bu gibi iyileştirmeler yaşam kalitesinin artmasına ve acil yardım ulaşımı gibi sağlanması gereken taşımacılığın daha etkin olmasına neden olmaktadır.

Katkı maddelerinin zemine karıştırılması yaşı zeminlerin kurutulmasında, dayanımın artırılmasında, hacimsel stabilitenin sağlanmasında (şişmenin azaltılması, büzülmenin kontrolü), zemin deformasyonlarının azaltılmasında (sıkışabilirliğin ve oturmaların azaltılması, farklı oturma etkilerinin minimum indirilmesi sertliğin arttırılması), aşınmanın azaltılmasında (yüzey dayanımının artırılması ve su geçirimsizliğinin azaltılması), dinamik ve tekrarlı yükler altında sağlamlığın artırılmasında, donma çözünme gibi taneler arası dayanımın artması ve agregalardaki ayrışmanın azaltılmasında ve geçirimsizliğin kontrolünde büyük ölçekte yararlı olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, zemin iyileştirmesi, çalışma platformlarının iyileştirilmesi, zeminin işlenebilirliği, platform katman kalınlıklarının azaltılması, şevlerin stabilizasyonu, yol ve uçak pistlerinin yapımında, baraj temellerinde geçirimsiz perde oluşturulmasında, temel/yapı desteklenmesi, kazıların desteklenmesi, sıvılaşmanın azaltılması, zeminlerde sızdırmazlığın sağlanması ve yer altı suyunun kontrolünde, deniz tortullarının stabilize edilmesi, don kabarmasının kontrolünde, erozyon kontrolünde ve çevre ıslahı gibi durumlar söz konusu olduğunda gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Artırılmış zemin dayanımları daha dik eğimlerin inşa edilmesini sağlar. Artırılmış şev eğimleri, istenilen dolgu yüksekliğine ulaşmak için gerekli olan mühendislik dolgusu hacminin azalmasına, aynı dolgu yüksekliğine ulaşmak için gerekli taban alanının azalmasına, hızlı yapım sayesinde ekonomik kazanımlara sebep olur. İyileştirme projeleri neredeyse her zaman bölgeye özeldir ve uygulanabilir çözümler geliştirmek için tasarım prosedürleri ve temel analizler ile birlikte standart test metotlarının tatbikini gerektirmektedir [17].

Killi zeminlerin stabilizasyonu, mühendislik özelliklerinin belirli mertebede artırılması için yapılmaktadır ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Stabilizasyon sayesinde, zeminin plastisitesi düşer, daha işlenebilir hale getirilir, basınç dayanımı ve taşıma gücü özellikleri artar. Çoğu iyileştirme, stabilizörlerin varlığı sayesinde birçok kimyasal reaksiyonun sonucunda meydana gelmektedir [3].

3.3. Stabilizasyon Türleri

İyileştirme için zemine eklenebilen malzemeler geniş kapsamlı ve değişken özelliklere, formlara ve niteliklere sahiptir. Kullanılacak olan katkı maddesinin türü uygulanacak zeminin cinsine, kullanım amacına, amaçlanan mühendislik özelliklerine, mühendislik özelliklerinin minimum gereksinimlerine, malzemelerin bulunma durumuna, maliyetine ve çevresel kaygılara bağlıdır [17].

Uygun katkının seçimine detaylı olarak hazırlanmış, zemin sınıflandırması ve plastisitesini esas alan genel yönetmelikler takip edilerek başlanabilir [66-67]. Örneğin, çimento çeşitli zemin türleriyle kullanılabilmesine karşın tane boyutu 0.074 mm'den küçük olan her bir ince fraksiyon ile tamamen karışmış olması çok kritiktir. Bu nedenle, çimento ile karışım zor olabileceğinden fazla plastik malzemelerin kullanımından genel olarak kaçınılmalıdır. Öte yandan kireç, orta-yüksek plastisiteli zeminlere etki etmekte, dolayısıyla onların plastisitesini azaltmakta ve dayanımlarını artırıp şişme potansiyellerini azaltırken daha kolay karıştırılabilir hale getirmesini sağlamaktadır. Katkı maddelerin seçilerek veya harmanlanarak kullanımı, yukarıda bahsedilen değişkenliklerin birçoğuna veya tamamına bağlıdır. Geleneksel katkılara ek olarak, özellikle çevresel kaygılara odaklanmış, tasfiyesi ve uygulanması problemlili olan ve karıştırılması zor zeminler için geliştirilen birçok yeni tescilli kimyasal katkılar da bulunmaktadır [17].

Zeminler; ya inşaat malzemesi olarak ya da yapıların temellerine taşıyıcı tabaka olarak kullanılmaktadır. Zeminler farklı özelliklere sahiptir ve yerel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Karşılaşılan zeminler her zaman kullanım amacına uygun özellikleri sağlamayabilmektedir. Zeminin özellikleri kullanım amacı için yeterli olmadığında zeminde iyileştirme yapılır (Alkaya, 2002). Bir alandaki zemin, düşünülen yapı vb. için elverişsiz ise (yumuşak kil, gevşek kum veya çakıl vb.) iyileştirilmesi için seçenekler aşağıdaki gibidir;

- Elverişsiz zemini uzaklaştırıp yerine uygun zemin koymak
- Zemini titreşim ve mekanik stabilizasyon ile sıkıştırmak
- Zayıf zeminlerin üzerine geçici olarak yük koyarak zemini konsolide etmek
- Zemindeki boşluk suyunu uzaklaştırmak
- Katkı maddeleri ile zemindeki çatlaklara ve boşluklara enjeksiyon yapılması
- Katkı maddeleri ile zemin taneleri arasındaki bağları kuvvetlendirmek

Zemin stabilizasyon metotları, başlıca aşağıdaki gibi sınıflandırılır [65]:

- 1- Mekanik stabilizasyon ve karıştırma,
- 2- Kimyasal stabilizasyon (çimento, kireç, uçucu kül vb.),
- 3- Zemin enjeksiyonu

3.3.1. Mekanik stabilizasyon

Stabilizasyon, farklı zemin gruplarının arzu edilen içeriklerde karıştırılarak standartlara uygun malzeme haline getirilmesidir. Böylece deformasyonları minimize edilmiş duraylı bir zemin malzemesi elde edilmiş olur. Mekanik sıkıştırmadaki amaç gradasyon düzeltilmesi, LL ve PI azaltılması, dren kabiliyetinin artırılması, mukavemet ve durabilitenin artırılması, uzun dönemli oturmaların azaltılması ve don duyarlılığının azaltılması olarak sayılabilir.

3.3.2. Kimyasal stabilizasyon

Zemine çimento, kireç, zift, uçucu kül vb. katkı maddeleri dahil etmek yoluyla zemin bünyesinde kimyasal reaksiyona yol açarak zeminin mühendislik uygulamalarına uygun

hale getirilmesidir (Aytekin, 2004).

İyi stabilizörler yeterli miktarda Ca^{++} iyonları içermelidir. Öyle ki, bu iyonlar özellikle kilin çatlaklı yüzeyinde adsorbe edilen tek değerlikli Sodyum (Na^+) katyonları ile yer değiştirerek zeminin plastisitesini azalmakta ve zemini daha işlenebilir hale getirmektedir [3].

Yüksek PH'a sahip yerlerde, silis ve alümin'in çözünürlüğü artar, bu sayede kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) ve kalsiyum-alüminat-hidrat (C-A-H) formunda puzolanik reaksiyonu tetikler. Zeminin plastisitesi, stabilizörlerin çeşidi ve miktarı, karıştırma ve sıkıştırma metodu, kür metodu gibi çeşitli faktörler, stabilize edilen zeminin dayanımını ve performansını etkilemektedir [3].

Standart Portland çimentosu ve kireç zemin iyileştirmesinde katkı maddesi maksadıyla kullanıldığında birçok benzerliğe sahiptir. Bunun özünde ise her ikisinde de kimyasal reaktantların kalsiyum kökenli olması gerçeği vardır. Öyle ki, çimento kireç içerir fakat kendine ait reaktanta (puzolana) sahiptir. Zemine eklenen veya zeminde var olan reaktantların olduğu yerde saf kireç sınırlı miktarda kullanılır. Uçucu küllerin belirli formları içerisinde önemli miktarda onu çimentolama maddesine çeviren reaktif kalsiyum kaynağı içerebilir. Hatta reaktif olmayan ve kendinden çimentolaşmayan uçucu külün Portland çimentosu veya kireç ile harmanlandığında çok iyi puzolan katkısı olduğu kanıtlanmıştır. Çimentolu dengeleyiciler genellikle basınç dayanımını, kesme dayanımını, çekme dayanımını ve elastisite modülünü artırır ve bu özellikleri sürekli olarak iyileştiren reaksiyonlar aylarca devam edebilir. Çimentolu iyileştirmelerde donma ve çözünme ile neme karşı dayanımlar önemli ölçüde artmaktadır. Kalsiyum esaslı karışımlarla yapılan iyileştirmenin öncelikli amacı genellikle potansiyel şişebilen zeminlerdeki şişmenin kontrol edilmesidir. Şişebilen zeminlerde yaygın olarak bulunan sodyum ve potasyum gibi tek değerlikli katyonlar ile yüksek değerlikli kalsiyum katyonlarıyla katyon değişimi, su moleküllerinin çekimini ve böylelikle şişme potansiyelini de azaltabilir [17].

Zeminde stabilizeyi yani deformasyona karşı direnci arttıran ve kimyasal stabilizasyonda kullanılan başlıca maddeler aşağıdaki gibidir:

Kireç

Kohezyonlu zeminlerle reaksiyona girerek plastisitenin ve şişme potansiyelinin azalmasına, işlenebilirliğin ve dayanımın artmasına, neden olmaktadır. Kireç stabilizasyonu plastisitesi indisini ve şişme yetisini azaltmak, dayanımı ve durabiliteyi arttırmak gibi zemin özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamaktadır [66, 67].

Uçucu kül

Kaba gradasyonlu zeminlerde etkin bir stabilizör olarak kullanılır [66, 67].

Uçucu kül ve kireç

PI değeri 25'den fazla olmayan kaba ve orta boyutlu tanelere sahip zeminlerde etkili bir stabilizör olarak kullanılır [66, 67].

Uçucu kül, kireç ve çimento

Bu kombinasyonlar da stabilizör olarak kullanılmaktadır. Zemin ile karıştırılan kireç işlenebilirliği arttırırken, plastisiteyi azaltır. Sonrasında eklenen çimento, zeminin dayanımını hızlı bir biçimde arttırır. Kohezyonlu zeminlerde kimyasal katkı maddeleri ile yapılan iyileştirme, zeminlerin tane boyutunun azalmasıyla daha etkin hale gelmektedir. Böylece katkı maddeleri ve zemin homojen bir karışım sağlayabilmektedir [66, 67].

Çimento

Çimento, genel olarak plastisite indisi 30'un altında olan ve 4 no'lu elekte kalan kısmı %45'ten az olan granüler zeminlerde etkili bir stabilizör olarak kullanılmaktadır. Çimento ile yapılan zemin stabilizasyonu, zemine katılan çimentonun miktarına bağlı olarak, zeminin özelliklerini iyileştirmek ve değiştirmek, zeminin mukavemetini ve durabilitesini arttırmak gibi farklı amaçlar için yapılır [66, 67].

Çoğu zeminlerin dayanımları çimento eklenerek artırılır. Genellikle çakılların ağırlığının %10'u oranında, kumların ağırlığının %7-%12 oranında, siltlerin ağırlığının %12-%15 oranında ve killerin ağırlığının %12-%20 oranında çimento gerekir. Maksimum kuru birim hacim ağırlığındaki maksimum su muhtevası ve optimum miktarda çimento belirlenerek laboratuvar testleri gerçekleştirilir [69].

Uygulamada, çimento (standart Portland çimentosu, AASHTO M85 ve ASTM C150) granüler zeminler için en etkili ve en ekonomik katkı maddesidir. İdeal çimento stabilizasyonu, az siltli veya az killi kum ile çakıllı zemin içeren iyi derecelenmiş granüler zeminlere uygulanabilir. Çoğu ülkeler, çimento stabilizasyonunun uygulanabildiği zemin çeşitliliğini derecelenme özelliği ve temel özelliklere göre kısıtlayan tasarım yönetmeliklerine sahiptir. ASTM C150 yönergesi 5 çeşit Portland çimentosunu tanımlar. Farklı tipler, hidrasyon sıcaklığının kontrolü, erken dayanım kazanma, sülfat atağına karşı yardımcı kimyasal bileşimler bulundurma ve benzeri özelliklere sahiptir. Federal Karayolları İdaresi'ne göre aşağıdaki tanımlamalar yapılmıştır.

Portland çimentosu

Suyla sertleşen çimento, özünde hidrolik kalsiyum silikat içeren klinkerin öğütülmesiyle üretilir ve genellikle yeraltı şartlarından dolayı kalsiyum sülfatın bir veya birden fazla biçimini içerir. (ASTM C-1).

Çimento ile stabilize edilmiş zemin

Hesaplanan miktarda Portland çimentosu ve suyun zeminle iyice harmanlanıp, yüksek yoğunlukta sıkıştırılarak belirlenmiş kür süresince nem kaybına karşı korunmuş karışımdır.

Çimentolu zemin

Su, Portland çimentosu ve toz haline getirilmiş zeminin iyice harmanlanıp, mekanik olarak sıkıştırılıp kürlenmesiyle oluşturulmuş sertleşmiş karışımdır. Çimentolu zemin belirli dayanım testlerinden geçmeye yetecek miktarda çimento içerir.

Çimento katkılı zemin

Su, Portland çimentosu ve toz haline getirilmiş zeminin iyice harmanlanmasıyla oluşturulmuş sertleşmemiş (veya yarı-sert) karışımdır. Çimento katkılı zemin, çimentolu zeminden, belirgin Şekilde az miktarda çimento içerir.

Plastik çimentolu zemin

Su, Portland çimentosu ve toz haline getirilmiş zeminin iyice harmanlanmasıyla oluşturulmuş, sertleşmiş (yarı sert) karışımdır. Öyle ki, zemin ve çimento, pompalanabilecek kadar yüksek su içeriğinde karıştırılır. Bu karışım genellikle sıkıştırılmadan yerleştirilir ve kil veya organik zeminler haricindeki çoğu zeminler için en uygun karışımdır.

Çimento zemin karışımı kategorileri arasındaki ana farklılık eklenen çimentonun miktarıdır. Bu değişkenlik çimento katkılı zemin için yüzde bir iki iken, çimentolu zeminlerde zemin türüne bağlı olarak 6-10% oranındadır. (Kil için 15%). Genellikle ince tane miktarı fazla olan ve plastisitesi yüksek olan zeminlerin stabilizasyonu için daha fazla çimento gerekir. Stabilizasyonun derecesi ve kalitesi çimentonun öğütülmesi, zeminin öğütülmesi, karışımın kalitesi, sıkıştırma derecesi, yeterli nem ve uygun kürlenme gibi birtakım değişkenliklere bağlıdır.

Çimento ile zemin stabilizasyonunda en önemli sorunlardan bir tanesi, hidrasyon ve nem kaybından dolayı karışımdaki büzülmedir. Zemin plastisitesinin sınırlandırılması, zeminin tamamıyla toz haline getirilmesi, tamamen karıştırılması ve uygun Şekilde kürlenmesi engelleyici tedbirlerdir. Yüksek çimento içerikleri için, kontrollü veya yönlendirilmiş çatlaklar çimentolu zeminin planlandığı şekilde büzülmesini sağlayabilir ve istenmeyen gelişigüzel çatlakları önlemeye yardımcı olabilir. Çimento stabilizasyonlu zeminler değişmiş sıkışma karakteristikleri sergileyebilirler fakat kireçte olduğu kadar öngörülebilir olmayabilir [70]. Kireç üretimine benzer olarak, çimento üretiminde arta kalan atık madde, üretim işleminin ince, toz halindeki ikincil ürünü olan çimento fırın tozudur. Üretilen çimento fırın tozunun üçte ikisi ticari çimento üretiminde tekrar kullanılır. Bu malzeme 40% oranında kireç içerir ki bu, malzemenin zemin stabilizatörü olarak kullanılmasının sebebidir [70]. Buna rağmen, bu iyileştirme teknikleri

standartların eksikliği ve malzemenin çeşitliliği nedeniyle, tam anlamıyla yaygın olarak kullanılmamakta ve devlet kurumları tarafından kabul edilmemektedir [17].

3.3.3. Zemin enjeksiyonu

Enjeksiyon ile stabilizasyon tekniği, zeminin kayma mukavemetini ve/veya yoğunluğunu artırmak veya geçirgenliği azaltmak amacıyla yapılır [71].

Kum-Çimento enjeksiyonu

Kum:çimento oranı 2:1 ile 10:1 olacak şekilde hazırlanan karışıma bentonit veya uçucu kül katılarak akışkanlık ve pompalama kabiliyeti kazandırılır. Bu karışımın su:çimento oranı 2:1 ile 5:1 olacak şekilde sulandırıldığında elde edilen enjeksiyon şerbeti ile zemindeki büyük boşlukların ve çatlakların doldurulması, mukavemet artışı, tünellerde kontak enjeksiyonu veya sızma perdesi vs. gibi amaçlar için kullanılmaktadır [71].

Kil-Çimento enjeksiyonu

Tipik kil (CH) ile çimento 3:1 ile 8:1 oranında karıştırıldıktan sonra su:kil oranı 3:1 ile 10:1 olacak şekilde su ihtiva edilerek elde edilen enjeksiyon şerbeti granüler zemine enjekte edildiğinde mukavemet artışı, don duyarlılığında azalma, permabilitenin azalması vb. sağlanır. Kilin mevcudiyeti çimentonun prizini geciktirmekte ve rötre yapmasını azalttığından dolayı enjeksiyon sırasında bütün boşlukların dolmasına neden olmaktadır. Kil-çimento enjeksiyonunun 7 ile 50 kg/cm² civarında mukavemeti olduğundan dolayı zeminin taşıma gücü ve kayma mukavemeti de artmaktadır [71].

Sodyum Silikat enjeksiyonu

Sodyum silikat suyla karıştırılıp sodyum bikarbonat veya organik veya inorganik sertleştiriciler veya kalsiyum klorid ilave edilmesi ile elde edilen enjeksiyon şerbeti granüler zemine enjekte edildiğinde mukavemet artışı sağlamaktadır. (71)

İnce taneli çimento enjeksiyonu

Normal Portland çimentosunun (NPC) ince ve orta kumlara enjekte edilememesinden, kimyasal enjeksiyonların hem pahalı, hem de çevreye zarar vermesinden dolayı alternatif olarak partikül boyutu daha küçük ve büyük özgül yüzey alanlı ince taneli çimentolar üretilmektedir. İnce taneli çimentoların Portland ve cüruf kökenli olanları mevcuttur [72].

NPC'nin maksimum partikül boyutu 100 μm ve özgül yüzey alanı 225 ile 320 m^2/kg arasında iken ince taneli çimentonun ise maksimum partikül boyutu daha küçük, özgül yüzey alanı ise daha büyüktür. ACI (American Concrete Institute) tarafından ince taneli çimentolar partikül tane çapı 15 μm den küçük olan çimentolar olarak tanımlanmıştır. Avrupa ise ince taneli çimentoyu dane çapı 20 μm den küçük tane boyutlu ve 800 m^2/kg ' dan büyük özgül yüzey alanlı çimento olarak tanımlamıştır [73].

İnce taneli çimentoların bazı önemli özellikleri şunlardır [74]:

- 1-) NPC'ye göre daha küçük boşluklara girer ve enjeksiyon sonrası daha iyi geçirimsizlik sağlar,
- 2-) Çevreye karşı zararsızdır,
- 3-) Kimyasal enjeksiyonlara göre daha ekonomiktir,
- 4-) Yüksek dayanım sağlar.

İnce taneli çimentolarda hidrasyon, priz süresi, akma gerilmesi ve viskozite değerlerini iyileştirilmek için katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu maddelerin kullanımı ile daha akışkan ve düşük akma gerilmesine sahip süspansiyonlar elde edilmektedir [20].

Kimyasal enjeksiyonlar

Kimyasal enjeksiyonlarda, çimento enjeksiyonları gibi yaygın olarak kullanılan bir enjeksiyon türüdür. Zemin içine enjekte edilen kimyasallar zamanla zemin içinde jelleşerek zemin numunesinin mühendislik özelliklerini iyileştirirler. Kimyasal enjeksiyon malzemeleri aşağıdaki şekilde gruplandırılmaktadır [75]:

- Sodyum Silikatlar,
- Akrilamitler,
- Lignosulfonatlar,
- Fenoplastlar,
- Aminoplastlar,

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışmada, Portland kökenli bir çimento olan Rheocem 650 ince taneli çimentosu (MPÇ) ve yaygın olarak kullanılan standart Portland çimentosu (NPÇ) ile yüksek plastisiteli killi zemin üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Amaç, MPÇ ve NPÇ ile yapılan deneysel çalışma sonuçları incelenerek, stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi zeminin geoteknik özellikleri üzerinde çimento tane boyutunun etkisi araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar 3 farklı aşamada yürütülmüştür: İlk aşamada doğal killi zemin numunesinin minerolojik özellikleri incelenmiştir. Sonrasında doğal killi zemin numunesi üzerinde doğal su muhtevası tayini, özgül ağırlık tayini, yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyi, Atterberg limitleri tayini, organik madde tayini, kompaksiyon (Proctor) deneyi, ıslanma ve kuruma deneyi, şişme deneyi, yük oturma deneyi, permeabilite deneyi, tek eksenli basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiş ve taramalı elektron mikroskobu ile kil numunelerinin mikroyapısı incelenmiştir.

İkinci aşamada, doğal killi zemin numunesi açık havada kurumaya bırakılmış ve sonrasında çelik tokmak yardımı ile öğütülerek elekten geçirilmiştir. Elekten geçirilen killi zemin numuneleri etüvde kurutulduktan sonra kuru killi zemin numunesi ağırlığının %8, %10 ve %12 oranlarında çimento ile karıştırılmıştır ve farklı su muhtevası değerlerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası belirlenmeye çalışılmıştır.

Son aşamada ise, %8, %10 ve %12 NPÇ ve MPÇ katkılı killi zemin numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler üzerinde Atterberg limitleri tayini, kompaksiyon deneyi, ıslanma kuruma deneyleri, şişme deneyleri, yük oturma deneyleri, permeabilite deneyleri, serbest basınç deneyleri ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1. Stabilizasyon Deneylerinde Kullanılan Killi Zeminin Özellikleri

Ankara'nın Gölbaşı ilçesinde, jeolojik formasyonlar incelenerek belirlenen lokasyondan (Resim 4.1.) stabilizasyon deneylerini gerçekleştirmek üzere zemin numuneleri alınmıştır.



Resim 4.1. Numune alma alanına ait yer bulduru haritası (maps.google.com.tr)

Açılan araştırma çukurundan, yerleşim alanında bulunan yapılara zarar vermeyecek uzaklıktan ve zemin yüzeyinden 4.0-5.0 m derinlikte ince cidarlı Shelby tüpleri ile örselenmemiş numuneler alınmıştır (Resim 4.2.). Shelby tüpleri kepçe yardımı ile zemine itilmiş, sonrasında Shelby tüplerinin içinde olduğu zemin kütlesi kepçe yardımı ile çıkarılarak numuneler elde edilmiştir. Tüplerin alt ve üst kısımları parafin ile kaplanmış ve poşetlenmiştir. Alınan örselenmemiş numuneler ile birlikte yaklaşık olarak 400 kg örselenmiş zemin numunesi laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarına aktarılmıştır.



Resim 4.2. (a) ve (b) İnceleme alanında kazı çukurundan UD numunelerinin alınması

4.1.1. Doğal su muhtevasının tayini

Kil numunelerinin doğal su muhtevası ASTM D2216 standartların uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numunelerin konulacağı kap 0.01 g doğruluk ile tartılarak not edilir (M_1). Sonrasında numune kabının içerisine 20g (zemin dane dağılımına bağlı olarak) killi zemin numunesi konularak tartılır ve not edilir (M_2). Killi zemin numunesi ile doldurulan kap etüvde kurumaya bırakılır. Kurutma işlemi (105 ± 5) °C sıcaklıkta 12-16 süre ile yapılır. Süre sonunda numune etüvden çıkarılarak desikatöre konur ve oda sıcaklığına kadar kurumaya bırakılır. Kurutulan numune kütlesi tartılır. Ölçümler arasındaki fark %0.1'den az ise numune değişmez kütleyle ulaşılmış olarak kabul edilir ve tartılarak not edilir. (M_3). Ölçümler arasındaki fark %0.1'den fazla ise kurutma işlemi minimum 2 saat olmak üzere tekrarlanır. Zemin su muhtevası değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$W = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100$$

Burada,

M_1 Boş kap kütlesi (g)

M_2 Kap + yaş numune kütlesi (g)

M_3 Kap + kuru numune kütlesi (g)

Alınan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan deneylerde doğal kilin su muhtevası ortalama %44 bulunmuştur.

4.1.2. Özgül ağırlık deneyi

Deneylerde kullanılacak kil numunelerin özgül ağırlıkları ASTM D854’de belirtilen standartlara göre bulunmuştur [76].

Zemin numuneleri 4 no’lu elekten geçirilerek piknometre vasıtasıyla özgül ağırlığı hesaplanır. İlk olarak piknometre tartılarak ağırlığı not edilir (m_L). 500 mL piknometre için yaklaşık 100 gr kuru zemin numunesi kullanılır. Zemin numunesi piknometre içerisine konulduktan sonra piknometrenin geniş hacminin 1/3-1/2’si kadar saf su konularak vakum altında en az 2 saat çalkalanır. Bu işlem sırasında piknometrenin ortam sıcaklığına gelmesi beklenir ve sonrasında piknometrenin boş olan kısmı saf su ile doldurulur. Piknometrenin dışı iyice kurulandıktan sonra, piknometre içindeki zemin numunesi ve su ile birlikte tartılır ve not edilir ($M_{pws,t}$). Son olarak piknometre havası alınmış saf su ile doldurulup tartılır ($M_{pw,t}$) ve aşağıdaki formülasyon kullanılarak özgül ağırlıklar hesaplanır (Eş. 3.1).

$$G_s = \frac{p_s}{p_{w,t}} \frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)} (\%)$$

Burada;

M_s kuru zemin ağırlığı

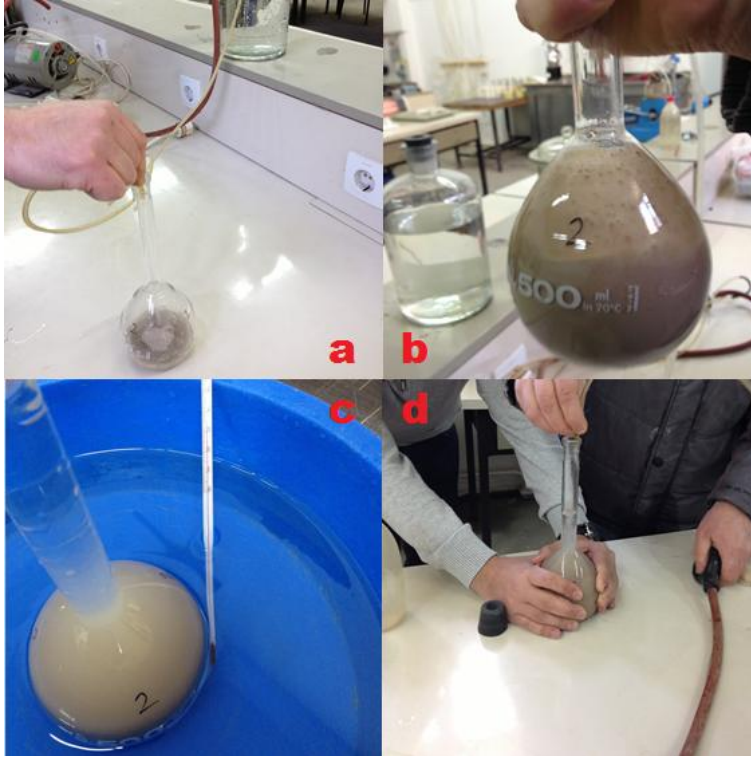
$M_{pws,t}$ piknometre, kuru zemin ve saf suyun toplam ağırlığı

$M_{pw,t}$ piknometre ve saf suyun toplam ağırlığı

p_s zeminin yoğunluğu

$p_{w,t}$ saf suyun yoğunluğu

Özgül ağırlık deneyi yapım aşamaları Resim 4.3.’te gösterilmiştir.



Resim 4.3. (a) Numunenin piknometreye konması (b) Piknometrenin vakum altında çalkalanması (c) Piknometrenin oda sıcaklığına getirilmesi (d) Piknometrede kalan boşluğun saf su ile doldurulması

Yapılan deneyler sonucunda killi zemin numunesi için özgül ağırlık (G_s) 2.80 olarak bulunmuştur.

4.1.3. Dane boyu analizi

Deneylerde kullanılacak kil numunelerin dane boyu dağılımı ASTM D422’de belirtilen standartlara göre tayin edilmiştir. [77].

Bu deneyde numuneye ait dane boyutu analizleri 200 no’lu elek üzerinde kalan numuneler için eleme yöntemiyle, 200 no’lu elekten geçen malzemeler ise hidrometre ile yapılır. Örselenmiş numuneler etüvde kurutulduktan sonra 0.01 g doğrulukla tartılır. Geniş bir tepsi içine konur ve üzeri her bir litresi için 40 g sodyum heksametafosfat katılan su ile örtülür ve iyice karıştırılır. Numune suyu yavaşça göz açıklığı 75 mikron olan elekten geçirilir. Elekten geçen su duru hale gelinceye kadar numuneye su eklenip elekten geçirilmeye devam edilir. Elekte kalan malzeme etüvde $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kurumaya bırakılır. Kurutulan malzeme elek serisinden geçilir ve her elekte kalan miktar tartılarak kaydedilir.

Göz açıklığı 75 mikron olan elekten geçen malzeme miktarı hesaplanır ve yüzdeleri bulunur. Eleklerde kalan yüzdelerin toplamının 100'den çıkarılması ile her elekten toplam geçen elde edilir ve tane dağılımı eğrisi çizilir. Elek analizi deneyi yapım aşamaları Resim 4.4.'te gösterilmiştir.



Resim 4.4. (a) Numunenin tartılması (b) su katılan numunenin 200 no'lu elekten geçirilmesi (c) 200 no'lu elek üstü malzemenin tartılması (d) 200 no'lu elek üstü malzemenin elek serisinden geçirilmesi

Hidrometre deneyi için 50g civarında numune alınır ve 0.01g doğrulukla tartılır (M_a). Üzerine 150 mL hidrojen peroksit çözeltisi eklenir ve cam çubuk ile karıştırılarak şişenin ağzı cam kapakla örtülür. En az 16 saat beklendikten sonra numune hafif ateşte ısıtılır. Karışım kaynatılarak hacmi 50mL'ye düşürülür. Konik şişedeki karışım porselen potaya aktarılır ve etüve konularak $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kurutulur, desikatörde soğumaya bırakılır ve tartılır. Tartılan ağırlıktan kap kütesinin çıkarılarak kaydedilir (M_b). Porselen potanın içindeki numuneye 100 mL sodium heksametafosfat çözeltisi katılır ve hafif ateşte 10dk ısıtılır. Karışım karıştırma kabına aktarılır 15 dakika mekanik karıştırıcı ile karıştırılır. Karışım 75 mikronluk elekten geçen süspansiyon 1000 mL'lik mezüre aktarılır ve damıtık su eklenerek 1000 mL'ye tamamlanır. 75 mikronluk eleğin üzerinde kalan malzeme $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ sıcaklıkta etüvde kurutulur ve 4.75 mm, 600 mikron, 200 mikron ve

75 mikron'luk elek dizisinden elenir. Elekler üzerinde kalan malzeme tartılır ve kaydedilir. Mezür'ün ağzı kapatılarak çalkalanır, çalkalama işlemi sonrasında 0,5., 1, 2 ve 4. dakikalarda hidrometre okumaları alınır. Sonrasında tekrardan 8, 15, 30, 60, 120, 480 dakika okumaları alınır. Bundan sonrasında ise iki gün arayla 1 veya 2 kez okuma alınır ve çökme süreleri kaydedilir. Ön işlemler sonucu numunede meydana gelen kütle kaybı yüzdesi (P) hesaplanır:

$$P = 100 - \frac{M_b * (100 - w)}{M_a} (\%)$$

M_a Açıkta kurutulan zemin kütlesi, (g)

M_b İşlemler sonu numenin kütlesi, (g)

w Kurutma sonucu zeminin su muhtevası, (g)

Deney başlangıcındaki numunenin her bir elekte kalan bölümünün yüzdesi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\text{Elek göz açıklığından iri zemin kütlesi} = \frac{M_c}{M_b} * 100 (\%)$$

Çökeltilen bölümün hesapları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$R_h 1$ menisküsün üst sınır düzeyindeki hidrometre okuması

t Çöktürmenin başlamasından sonra geçen süre

C_m Menisküs düzeltmesi

M_t 20°C sıcaklıkta kalibre edilen hidrometreler için sıcaklık düzeltmesi

X Dağıtma maddesi düzeltmesi

Eşdeğer tane çapı (D), Stokes Kanunu ile aşağıdaki eşitlikten bulunur:

$$D = 0.005531 * \sqrt{\frac{\mu}{p_s - p_w}} * \sqrt{\frac{H_R}{t}}$$

μ Suyun viskozitesi

p_s Numunenin yoğunluğu

p_w Suyun yoğunluğu

H_R Hidrometre kalibrasyon eğrisinden alınan değer

İlgili eşdeğer tane çapından daha küçük tanelerin yüzdesi (K), aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$K = \frac{100 * \gamma_s}{M_b * (p_s - p_w)} * (R_h + M_t - X)$$

γ_s Zemin tanelerinin bağıl yoğunluğu

Stabilizasyon deneylerinde kullanılacak killi zemin numunesi ile hidrometre deneyi yapılmış (Resim 4.5.) ve tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Resim 4.5. (a) Numunenin tartılması (b) Numuneye sodyumheksametafosfat eklenmesi (c) Karışımın mekanik karıştırıcıda karıştırılması (d) Hidrometre okumalarının alınarak çökme sürelerinin tespit edilmesi



Şekil 4.1. Killi zemin numunesinin tane boyutu dağılım eğrisi

Dane çapı dağılımları incelendiğinde doğal killi zeminin sadece %1.5 oranında kum içerdiği, geriye kalan %98.5 gibi bir değer in ince daneli zemin olduğu görülmektedir. Hidrometre deneyinden elde edilen veriler ışığında killi zeminin yaklaşık %65 oranında kil, %33 oranında ise silt içerdiği tespit edilmiş olup, silt içeriği %40'tan az olması nedeni ile kil zemini olarak adlandırılmaktadır.

4.1.4. Atterberg limitleri tayini

Deneylerde kullanılacak killi zemin numunelerin Atterberg Limitleri tayini ASTM D4318'de belirtilen standartlara uygun olarak yapılmıştır (Resim 4.6.), [78].

Örselenmiş numunelerden 425 mikron'luk elekten geçirilen yaklaşık 200 g numune alınır ve elekten geçen yüzde bulunur. Kap içerisine konarak su katılır, iyice karıştırılır ve suyun numunenin her yanına yayılmasını sağlamak için hava geçirmez bir kap içerisinde en az 16 saat bekletilir.

Numune kaptan çıkarılır en az 10 dk tekrar karıştırılır. Karışımdan bir miktar alınarak likit limik cihazının kabı içine konur, yüzeyi tabana paralel olacak şekilde düzlenir ve oluk açma bıçağı ile menteşenin ortasından geçen çap boyunca kap içinde hareket ettirilerek numune ikiye bölünür. Krank kolu saniyede 2 devirlik hızla çevrilirken oluğun dip

kısımındaki ayrılmış numune 13mm boyunca birbirine değene kadar kap kaldırılıp düşürülür. Oluktaki bu kapanmayı sağlayan düşüş sayısı kaydedilir.

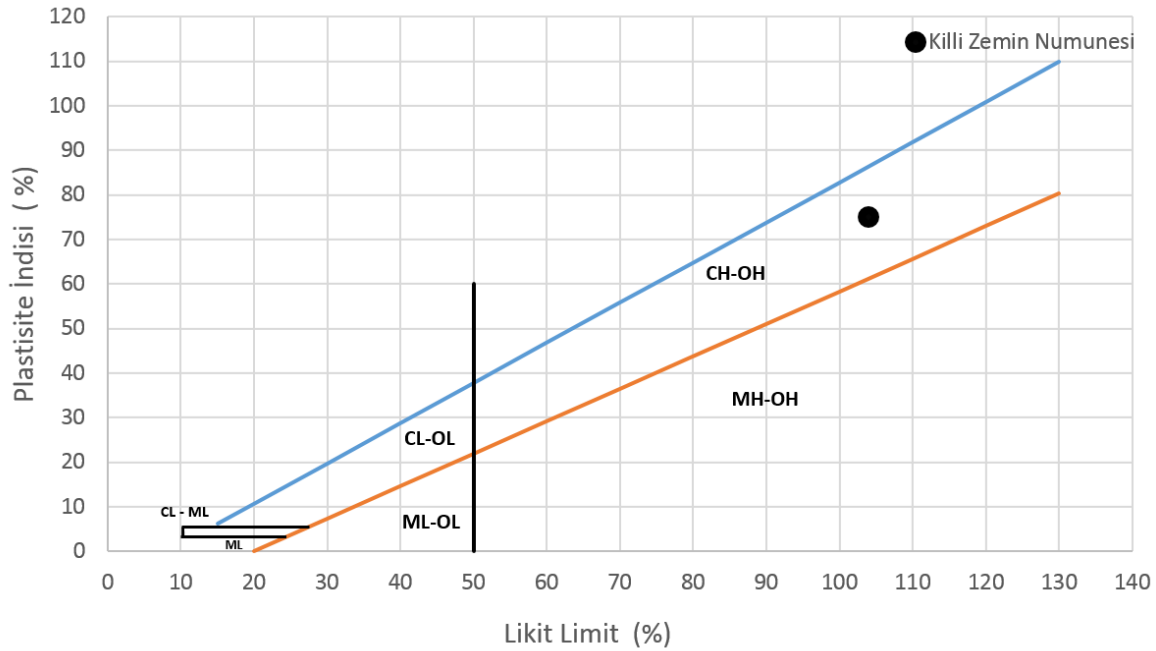
Oluğun kapanmış olan kesiminin çevresinden numune alınarak deney kabına konur ve su muhtevası bulunur. Kalan numune kullanılarak ve su muhtevası gittikçe artarak aynı işlemler en az 5 defa uygulanır. Her denemede elde edilen su muhtevasına karşı düşüş sayısı, yarı logaritmik bir grafik kağıdı üzerine işaretlenir. Elde edilen noktalardan en iyi doğru çizilir. Bu doğru üzerinden 25 düşüş'e denk gelen su muhtevası zeminin likit limitini verir.

Plastik limit deneyi için, likit limit deneyi için hazırlanmış olan numunedan 20 g alınır. Numune küçük bir top biçimini alana kadar cam plaka üzerinde damıtık su ile karıştırılarak yoğrulur. Numune iki eşit parçaya bölünür ve yeniden top şekli verilir. Küre halindeki numune 3mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar el ayası ve cam plaka arasında yuvarlanır. Çap tam 3 mm'ye indiği anda, yuvarlanan zeminde çatlayıp dağılmalar görülene kadar bu işlem tekrarlanır. Numunenin dağılan parçaları toplanıp en az 10g numune kabına konur ve su muhtevası ölçülür.



Resim 4.6. (a) Numunenin karıştırılması (b) LL deneyinin yapılması (c) Numunelerin yuvarlanması (d) Yuvarlanan numune çapının 3 mm'ye indirilmesi

Yapılan deneyler neticesinde doğal killi zemin numunesinin likit limit değeri %104, plastik limit değeri ise %29 olarak bulunmuştur. Numuneye ait Atterberg limitleri Casagrande plastisite grafiğinde işaretlenmiştir. Dane boyu analizinde killi zemin olarak sınıflandırılan deney numunelerinin yüksek plastisiteye sahip olduğu belirlenmiş ve bu verilere göre USCS'e göre killi zemin yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Casagrande plastisite kartında killi zemin numunelerinin sınıflandırılması

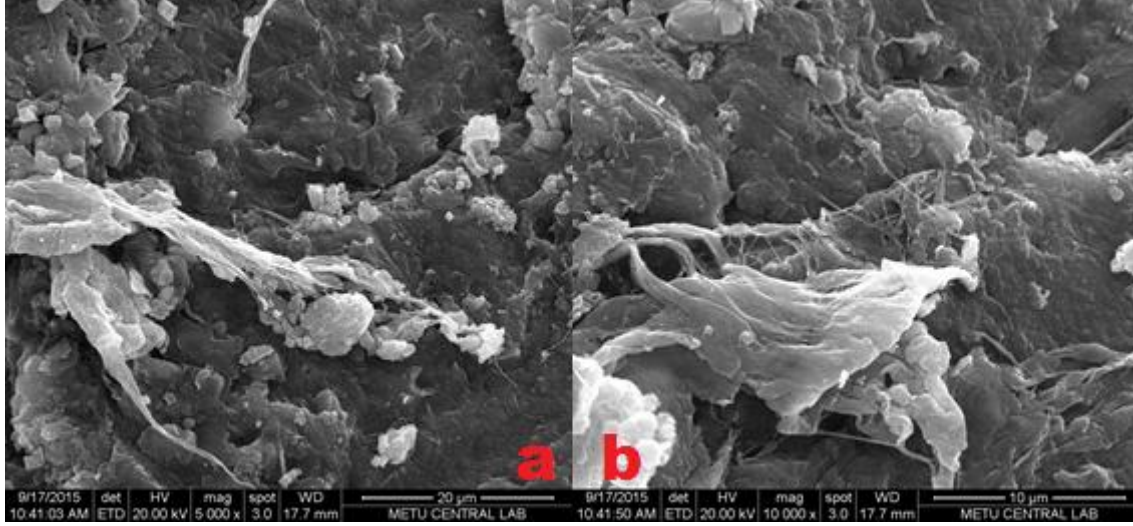
4.1.5. Organik madde tayini

Deneylerde kullanılan killi zemin numunelerinin organik madde tayini ASTM D2974 belirtilen standartlara göre bulunmuştur [79].

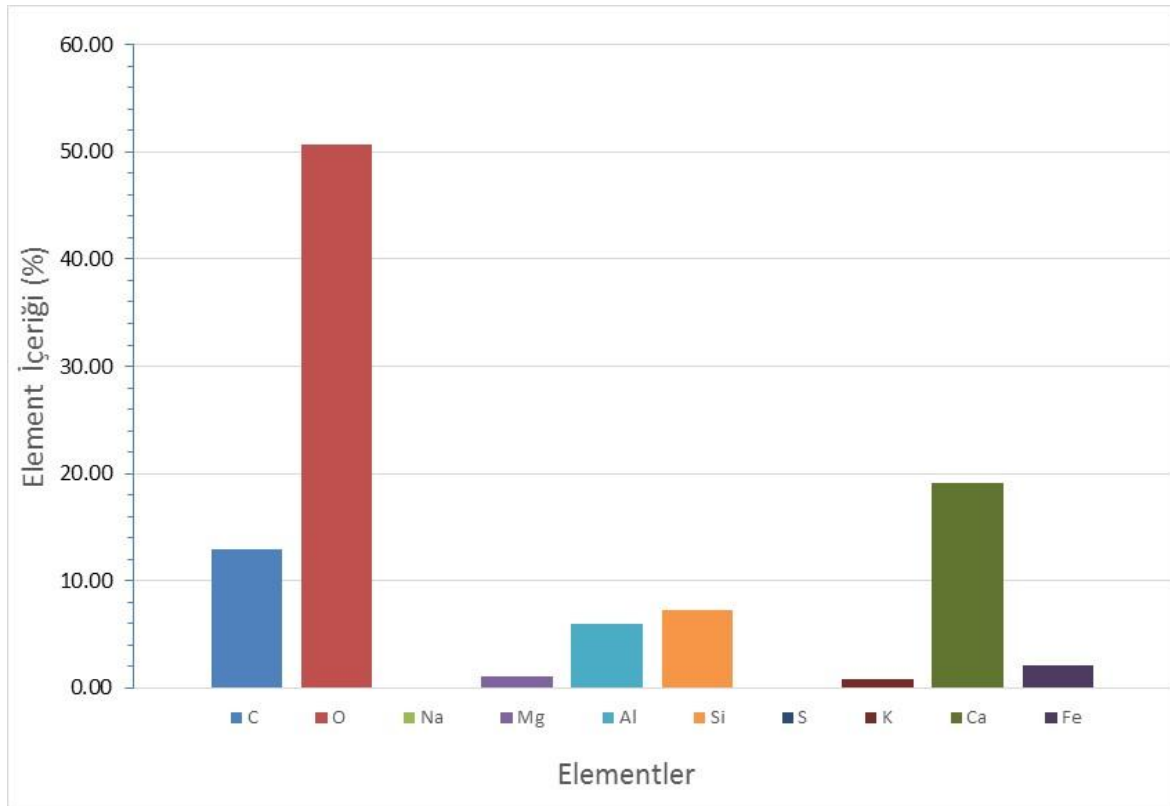
Numune tavaşı 0.01 g doğrulukta tartılır. Test numunesi tavaya konularak tava ve numunenin toplam ağırlığı tartılır. Numune 440 °C sıcaklıkta tamamen kül haline gelene kadar yakılır. 1 saatlik periyodlar ile tartılarak numune değişmez kütleye geldiğinde kül haline gelen numune desikatörde soğumaya bırakılır. Külün ağırlığının başlangıç numune ağırlığına oranının yüzde cinsinden karşılığı organik madde yüzdesini verir.

Yapılan deney sonrasında, yüksek plastisiteli killi zeminin organik madde yüzdesi %2.29 olarak bulunmuştur. Ayrıca elektron mikroskobu ile yapılan analizlerde organik maddenin

varlığı tespit edilmiş (Resim 4.7.) ve EDS analizi yapılarak mineral içeriği belirlenmiştir (Şekil 4.3.)



Resim 4.7. (a) Killi zemin numunelerin SEM analizi görüntülerinde organik madde tayini (b) Tespit edilen organik maddenin yakın görünümü



Şekil 4.3. SEM analizinde görüntülenen organik maddenin EDS analizinden elde edilen element içeriği

Organik maddelerin yapıtaşını oluşturan karbon ve oksijen ile kalsiyum elementinin yüzde olarak değerlerinin ani artış gösterdiği EDS analizleri, SEM analizinde tespit edilen organik maddenin kimyasal yapısını doğrulamaktadır. Organik maddeler hidrasyon reaksiyonuna etki eden organik asitler içerir ve bu asitler dayanımının düşmesine neden olur.

Organik madde yüzdesi (%2.29) yüksek olmaması nedeni ile killi zemin numunelerinin dayanımına etki etmesi beklenmemektedir. Zemine ait likit limit değeri, numune etüvde kurutulmadan önce ölçülen likit limit değerinin %75'inden daha az olduğunda killi zemin organik kil olarak adlandırılır. Killi zemin numunesinin doğal haldeki likit limit değeri %104 olarak tespit edilmiş ve sonrasında etüvde kurutularak gerçekleştirilen deneyde likit limit değeri 99.51 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında elde edilen likit limitlerin oranının %95'den fazla olduğu ve zeminin organik kil olmadığı tespit edilmiştir.

4.1.6. Kompaksiyon (Proctor) deneyi

Deneylerde kullanılan killi zemin numunelerinin Proctor deneyi ASTM D698'de belirtilen standartlara göre yapılmıştır [80].

Elek analizinden elde edilen tane çapı dağılımından 4.75 mm, 9.50 mm ve 20 mm göz açıklığına sahip eleklerde kalan malzeme yüzdeleri belirlenir. 4.75 mm elekte kalan malzeme oranı %20 ve daha az olduğundan üç tabaka halinde her tabakaya 25 vuruş gerçekleştirilerek sıkıştırma işlemi sağlanır.

Kap, taban plası ile birlikte 1 g hassasiyet ile tartılır (M_k). Kalıp sert düz bir yüzeye konur ve içerisine üç eşit tabaka halinde zemin numunesi konur. Her biri tabakaya 305 mm serbest düşü yapan tokmakla 25 darbe uygulanır. Kalıp ve zemin, 1 g hassasiyet ile tartılır (M_{ks}). Sıkıştırılmış zemin kalıptan çıkarılır ve su muhtavasını bulunur. Artan numune atılır. Deney en az 5 kez tekrarlanır. Sıkıştırılmış zeminin yaş birim hacim ağırlığı, aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$p_n = \frac{M_{ks} - M_k}{V} * 9.81$$

- p_n Zemin numunesinin yaşı birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
 M_k Kalıp ve tabanın kütlesi, (g)
 M_{ks} Kalıp, tabanı ve sıkıştırılmış zemin kütlesi, (g)
 V Kalıbın iç hacmi, (cm^3)

Zeminin kuru birim hacim ağırlığı, aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$p_k = \frac{100 * p_n}{100 + w} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

- p_k zemin numunenin kuru birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
 w zemin numunenin su muhtevası, (%)

Bir seri deney sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve bunlara karşılık gelen su muhtevası değerleri bir grafik üzerine işlenir ve karşılaştırma amacıyla grafik üzerine sıfır, 5% ve 10% hava boşluğunu gösteren eğriler çizilir. Bu eğrilerin aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir:

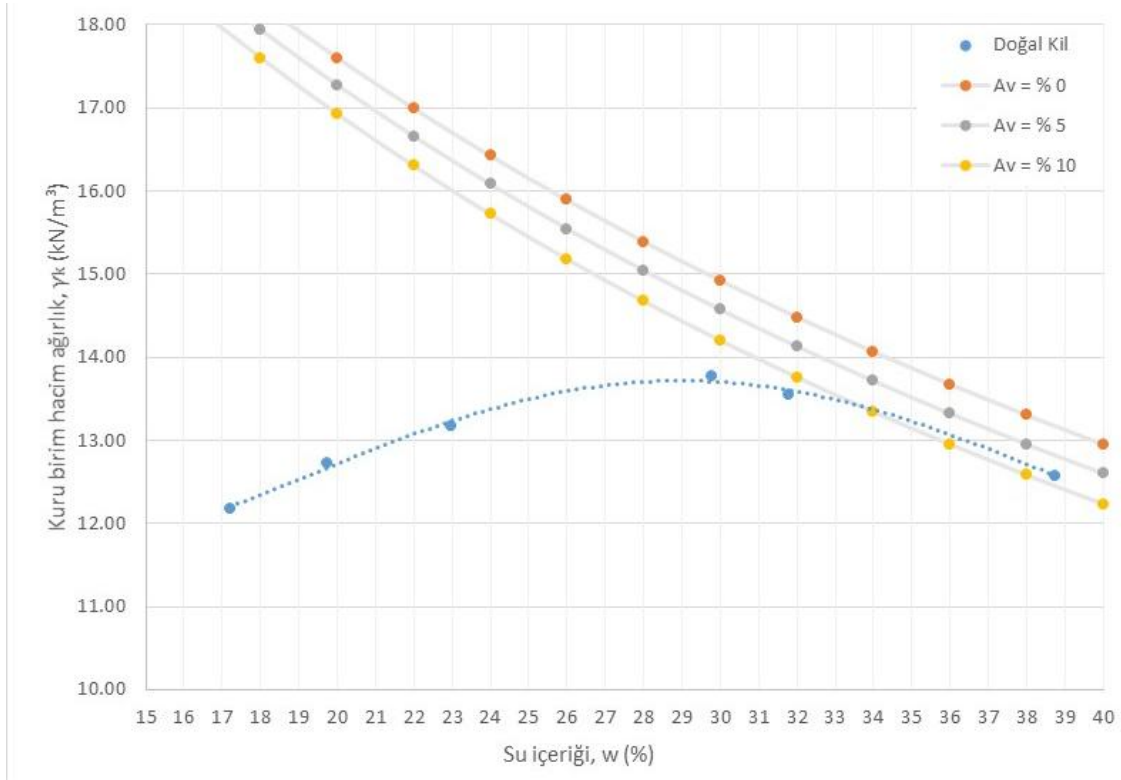
$$p_k = \frac{G_s * \left(1 - \frac{V_a}{100}\right)}{\left(1 - \frac{V_a}{100}\right) + \frac{G_s * w}{100}} * 9,806 \text{ kN/m}^3$$

- V_a hava içeriği, %
 G_s Zemin tanelerinin bağıl yoğunluğu,

Yapılan deneyler neticesinde doğal killi zemin numunesinin optimum su muhtevası değeri %29, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 13.75 kN/m^3 olarak bulunmuştur (Resim 4.8.). Aşağıdaki Şekil 4.4. 'Te doğal killi zemin numunesine ait kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası ilişkisi verilmiştir.



Resim 4.8. (a) Proctor kalıbının yağlanması (b) Numunenin sıkıştırılması (c) Sıkıştırılan numunenin ve numune kalıbının tartılması (d) Numunenin kalıptan çıkartılması

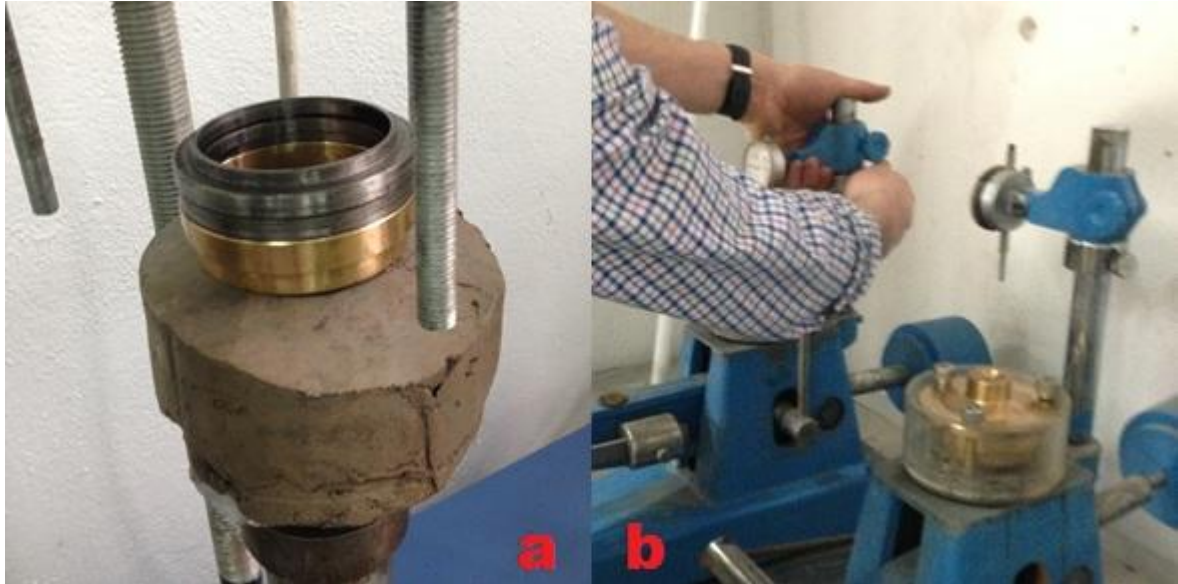


Şekil 4.4. Doğal haldeki killi zemin numunesine ait kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası ilişkisi

Kompaksiyon deneyinden elde edilen grafik incelendiğinde, su muhtevası değeri arttırıldıkça, zemin partikülleri arasındaki adsorbe su tabakasının giderek kalınlaşması ile daneler birbiri üzerinde kolayca kaymaya başlamış ve daha iyi sıkışma göstermiştir. Su içeriğinin arttırılmasına devam edilmesi ile zemin partikülleri birbiri üzerinde kaymaya başlamış ve sıkışabilirlik azalmıştır. Deneylerde kullanılan kil numunesinin maksimum sıkışabilirliği %29 su içeriğinde elde edilmiştir.

4.1.7. Serbest şişme deneyi

Deneylerde kullanılan killi zemin numunelerin şişme deneyi ASTM D4546’da belirtilen standartlara göre yapılmıştır (Resim 4.9.), [81].



Resim 4.9. (a) Konsolidasyon halkası ile numune alınması (b) Numunelerin konsolidasyon cihazına yerleştirilmesi

Konsolidasyon halkasını rijit bir biçimde ve numune tüpünün üst ucundan 3 mm ile 6 mm arası bir uzaklıkta tutabilecek özel bir cihaz, tüpün ucuna takılır ve numune tüpten çıkarılırken doğrudan konsolidasyon halkası içine itilir. Halka içindeki numune kesilip alınır, alt ve üst yüzeyleri traşlanır ve tartılır.

Alt gözenekli disk, kuru olarak konsolidasyon hücresi içine yerleştirilir. Halka içindeki numune, alt ve üstüne birer süzgeç kağıdı konarak gözenekli diskin ortasına yerleştirilir. Üst gözenekli disk ve yükleme plaskası numunenin ortasına yerleştirilir. Konsolidasyon

hücresi yükleme cihazındaki yerine oturtulur ve dengelenmiş yükleme kolu yatay duruma getirilip yükü numuneye aktaran parçası yükleme plaskasına geçecek biçimde ayarlanır. Komparatör saat, konsolidasyon hücresinin tabanı ile yükleme plakası arasındaki bağıl hareketi ölçecek biçimde yerleştirilir. 1 kPa sürşarj yükü altında suya doyurulan numune şişme tamamlanıncaya kadar beklenir.

Serbest şişme yüzdesinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

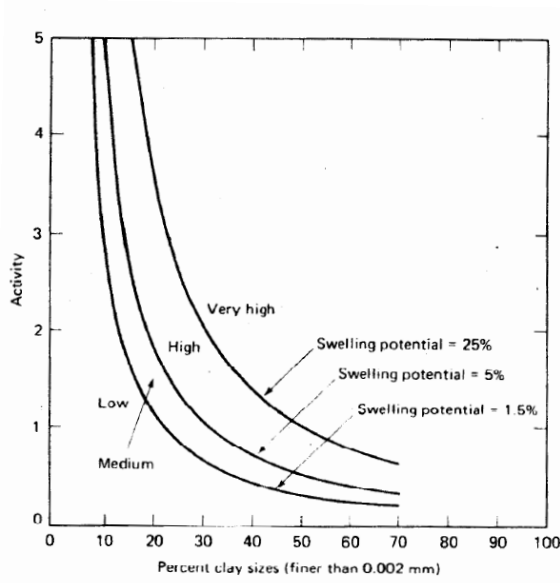
$$S = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100$$

S Serbest şişme yüzdesi, (1 kPa yük altında)

H_0 Numunenin deney öncesi yüksekliği, (cm)

H_1 Numunenin şişme sonrası yüksekliği, (cm)

Killi zemin numunesinin serbest şişme yüzdesi ise %17,7, optimum su muhtevasında ve Proctor sıkılığında hazırlanan killi zemin numunesinin serbest şişme yüzdesi ise %9.82 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, aktif olmayan ve yüksek aktiviteye sahip killerin sınıflandırılmasında kullanılan aktivite, killi zeminin plastisite indisinin, 2 mikrondan küçük tane boyutuna sahip kil yüzdesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Deneylerde kullanılan killi zeminin plastisite indisi %75 mikrondan küçük tane boyutuna sahip olan kil yüzdesi ise %65 olarak tespit edilmiş olup, bu veriler ışığında killi zemin numunesinin aktivitesi 1.15 olarak bulunmuştur. Aşağıdaki grafikte (Şekil 4.5.) killerin şişme potansiyelinin belirlenebilmesi amacı ile aktivite-kil yüzdesi bağıntısı verilmiştir [Seed et al., 1962]. Deneylerde kullanılacak olan killi zemin numunesinin aşağıdaki grafikten aktivite-kil yüzdesi bağıntısı incelendiğinde şişme potansiyelinin %25'den fazla olduğu ve önemli derecede yüksek şişme özelliğinin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5. Şişme potansiyelinin aktivite-kil yüzdesi bağıntısından bulunması

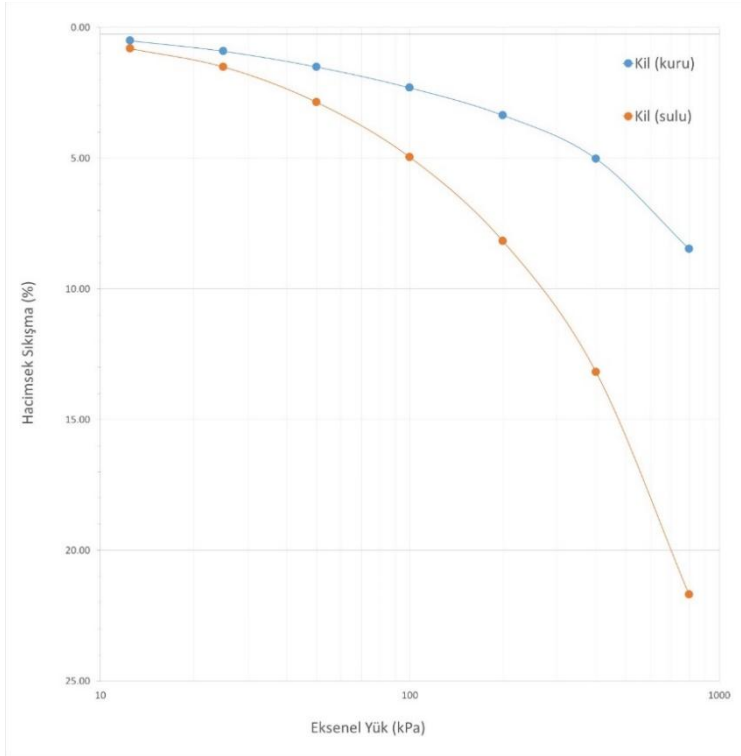
4.1.8. Sıkışabilirlik Deneyi

Deneylerde kullanılan killi zemin numunelerin yük oturma deneyleri ASTM D4546 – 14 ve ASTM D-2435’de belirtilen standartlara göre yapılmıştır. [81, 82].

Numune serbest şişme deneyinde olduğu gibi deneye hazır hale getirilir. Deneyde 12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 kPa basınç dizisi, 0,1, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 30 dakika, 1, 2, 4, 8, ve 24 saat süresince uygulanır. Basınç deneyi sırasında elde edilen eğriden kontrol edilerek zeminin birincil sıkışması sona erdiği görülene kadar genellikle 24 saatlik süre sonunda gösterge ve kronometre okumaları alınır. Bundan sonra numune üzerine etkiyen basıncı, dizedeki bir üst değere arttıracak şekilde kütle eklenir ve okuma alma işlemi tekrarlanır. Uygulanmış en yüksek konsolidasyon basıncı altındaki gösterge okumaları tamamlandıktan sonra, yükler boşaltılır. Zeminin sıkışma özelliği, numunenin ilk kalınlığına göre sıkışma miktarı doğrusal düşey eksene (%), bu değere karşılık olan basınç σ (kPa), logaritmik yatay eksene işaretlenerek gösterilebilir.

Killi zemin numunesileri optimum su muhtevasında ve Proctor sıkılığında hazırlanmış ve plastik torbalar içerisinde 28 gün kürlenmiştir. Hazırlanan 2 numunenin biri konsolidasyon cihazında suya batık halde, diğeri ise susuz halde yüklemeye tabi tutulmuştur. Kuru halde yüklenen killi zemin numunelerinin deney sırasında nem kaybını önlemek için,

konsolidasyon hücrelerinin üstü ıslak bez ile örtülmüştür. Hacimsel sıkışma yüzdeleri susuz hücrede yüklenen killi zemin numuneleri için %8,5, suya dolu hücrelerdeki killi zemin numuneleri için % 21,7 olarak bulunmuştur (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Doğal killi zemin numunesine ait hacimsel sıkışma grafiği

Montomorillonit killerinin temel özelliği suya karşı hassasiyetinin olmasıdır. Konsolidasyon hücresine suyun eklenmesi ile kil partikülleri arasında su girişi olur. Partikül konfigürasyonunda değişim meydana gelir ve yüklemenin yapılması ile boşluklardaki suyun partiküller arasından dışarı çıkarak zemin danelerinin daha stabil hale gelene kadar sıkışmasına neden olur. Bu sebepten, killi zemin numunesinde zemin partikülleri arasındaki boşluk suyu basıncı sönmöleninceye kadar hacimsel azalma meydana gelir. Su dolu konsolidasyon hücresinde yüklenen killi zemin numunesi, kuru konsolidasyon hücresinde yüklenen killi zemin numunesinden ortalama 2,5 kat fazla hacimsel deformasyona uğramıştır.

4.1.9. Permeabilite deneyi

MPÇ ve NPC stabilizasyonu öncesinde, killi zemin numuneleri üzerinde permeabilite katsayısının belirlenebilmesi amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır

(Resim 4.10.). Deneylerde kullanılacak kil numunelerin permeabilite katsayıları ASTM D5084’de belirtilen standartlara göre belirlenmiştir [83].



Resim 4.10. (a) Plastik moldlara sıkıştırılmış killi zemin numunesi (b) Moldların hazırlanması (c) Moldların bağlanması (d) Hidrolik yük uygulaması

Çalışma kapsamında, permeabilite deneyi için kuru numuneye optimum su muhtevası oranında su katılarak homojen bir şekilde numune karıştırılmıştır ve standart kompaksiyon enerjisi uygulanarak permeabilite kalıbına sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numune düşen seviyeli permeabilite düzeneğine yerleştirilmiş ve numune doygün hale gelinceye kadar beklenmiştir. Borulardaki su seviyesindeki azalma cetvel yardımı ile ölçülerek, suyun zemin içerisinden geçişinin ne kadar sürede ve hangi miktarda olduğu gözlemlenmiştir. Permeabilite katsayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$k = \frac{a * L}{A_o * t} \ln \frac{h_1}{h_2} \text{ (cm/s)}$$

a Düşey borunun yüzey alanı, (cm²)

A_o Zemin numunesinin düşey alanı, (cm²)

h₁ Deney başlangıcında numune boyunca uygulanan hidrolik basınç yüksekliği, (t=0)

h_2	Deney sonunda hidrolik basınç yüksekliği, ($t=t_2$)
L	Numune yüksekliği, (cm)
t	Deney süresince geçen zaman

Sıkıştırılmış killi zeminlerde sabit sıkıştırma enerjisinde ve optimum su muhtevası permeabilite değeri en düşük değerine ulaşmaktadır. Killi zemin numunesi için permeabilite katsayısı $7,03 \times 10^{-8}$ cm/s olarak hesaplanmıştır. Permeabilite katsayısının bu değeri, killi zemin numunesinin pratikte geçirimsiz olduğunu göstermektedir.

4.1.10. Serbest basınç deneyi

Deneylerde kullanılan killi zemin numuneleri üzerinde serbest basınç testleri ASTM D2166'da belirtilen standartlara göre yapılmıştır [84].

Sahadan elde edilen örselenmemiş çelik tüp içerisindeki numuneler, kalıba çıkarılır. Numune kalıptan çıkartılıp kütlesi 0,01 g, boyutları 0,1 mm hassasiyetle ölçülür. Numune serbest basınç testi cihazının alt platformuna merkezlenerek oturtulduktan sonra üst başlık numune üst yüzüne rahatça ve tam olarak geçecek şekilde indirilir. Boy değişmeyi ölçen komparatör saati, alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilerek sıfırlanır. Deney, numunede kesin göçme elde edilene veya %20 birim boy kısalması meydana gelene kadar sürdürülür. Deney sona erdiğinde ise numune yeniden tartılarak su muhtevası bulunur.

Sahadan alınan örselenmemiş kil numunelerinin serbest basınç dayanımları ile optimum su içeriği ve maksimum sıkılıkta çelik moldlar ile hazırlanan örselenmiş kil numunelerinin serbest basınç dayanımları tespit edilmiştir. UCS testi sonunda test numunesinin deformasyonu Resim 4.11.'da gösterilmiştir.



Resim 4.11. (a) Serbest basınç dayanımı testinin yapılması (b) Serbest basınç dayanımı testi sonunda test numunesinin deformasyonu

Numune de eksenel birim Şekil değiştirme aşağıda belirtilen Şekilde hesaplanır:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

ΔH Numunede ölçülen eksenel Şekil değiştirme, (mm)

H_0 Numunenin ilk boyu, (mm)

Sahadan numune tüpleri ile elde edilen doğal killi zemin numunesinin serbest basınç dayanımı 68.42 kPa ve doğal su muhtevası değeri ise %41.78 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevasında hazırlanan killi zemin numunesinin serbest basınç dayanımı ise 107 kPa ve su muhtevası değeri %27.79 olarak bulunmuştur. Burada, su içeriğinin azalması ile serbest basınç dayanım değerinin arttığı tecrübe edilmiştir. Su içeriğinin azalması ve zemin partikülleri arasındaki boşluk suyu azalmakta ve sıkıştırma enerjisi uygulanan killi zemin partikülleri arasındaki efektif basınç azalarak zemin partiküllerinin birbirine yaklaşmasına sebep olmaktadır. Killi zemin partikülleri arasındaki efektif direncin artması nedeni ile daha sıkı fraksiyonlar meydana gelmiş, bu nedenle daha düşük su içeriklerinde hazırlanan killi zemin numunesinde daha yüksek dayanım elde edilmiştir.

4.1.11. Üç Eksenli basınç deneyi

Deneylerde kullanılan killi zemin numuneleri üzerinde üç eksenli basınç testleri ASTM D2850’de belirtilen standartlara göre yapılmıştır [85].

Sahadan elde edilen örselenmemiş çelik tüp içerisindeki numuneler, kalıba çıkarılır. Hazırlanan deney numunesi, üç eksenli basınç hücresi tabanına oturtulur. Hücre eksenel yüklemeye hazır hale getirilir ve çevre basıncı için kullanılacak akışkan hücreye doldurulur. Hücre basıncı istenilen değere yükseltilir. Yükleme cihazı, pistonun ucu numunenin üst başlık yatağından çok az yukarıda kalacak biçimde ayarlanır ve kuvvet ölçme göstergesinin ilk değeri kaydedilir ve sıfırlanır. Bundan sonra ölçülecek ilk değer deviator gerilme eşdeğeridir. Yükleme cihazı, pistonun ucu numunenin üst başlık yatağına değee Şekilde ayarlanır ve numunenin boy kısalmasını ölçen göstergenin ilk değeri kaydedilir.

Eksenel boy kısalması hızı, numunenin yaklaşık olarak 5-10 dakikalık bir sürede göçeceği biçimde seçilir. Yüklemeye başlanır ve gerilme - eksenel birim Şekil değiştirme bağıntısını belirlemeye yetecek sayıda yük göstergesi okuması ve bunlara karşılık olan kısalma okumaları alınır. Deney, en büyük eksenel gerilme değeri aşılan veya birim boy kısalması %20’ye ulaşınca kadar sürdürülür. Bundan sonra numune üzerindeki yük kaldırılır ve kuvvet ölçme göstergesinin son okuması ilk okumayı denetlemek amacıyla kaydedilir.

Hücredeki akışkan boşaltılır ve hücre açılarak deney numunesi yerinden alınır. Numunenin üzerindeki kılıf çıkarılır ve numunenin son şekli çizilir. Deney numunesi tartılır ve su muhtevasının bulunması için numuneler etüve konur.

Numunenin drenajsız deney sırasında eksene dik alanı A , numunenin hacmi değişmez bir dik silindir olarak biçim değiştirdiği varsayılarak hesaplanır. Eksenel birim Şekil değiştirmesinin olduğu anda bu alan aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$$

A_0 Numunenin başlangıçtaki kesit alanı, (mm^2)

ϵ Eksenel birim Şekil değiştirmesi

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0}$$

ΔH Numunede ölçülen eksenel Şekil değiştirme, (mm)

H_0 Numunenin ilk boyu, (mm)

Deneyin herhangi bir aşamasında deviator gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{dev} = P_a / A$$

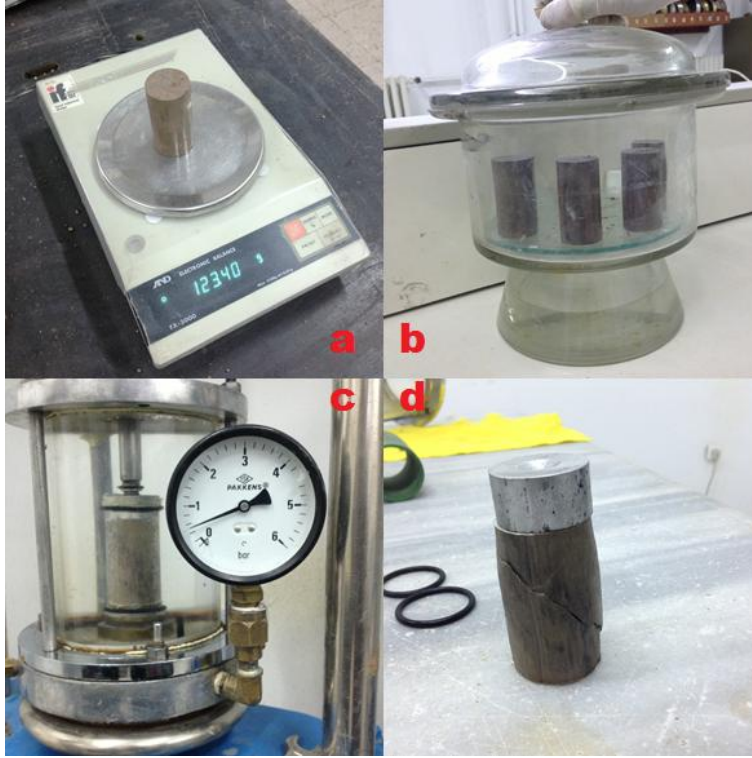
P_a Numuneye uygulanan eksenel yük, (kN)

A Eksenel yüke karşılık gelen numune alanı, (m²)

Sahadan shelby tüpleri yardımı ile elde edilen numunelerin üç eksenli basınç deneyine hazırlanması ve testin uygulanması aşamaları Resim 4.12. ve Resim 4.13’de gösterilmiştir.



Resim 4.12. (a) UD tüplerinin çıkartılması (b) UD tüplerindeki numune yüzeylerinin düzeltilmesi (c) Numunelerin UD tüpünden çıkartılması (d) Numune boyutlarının kontrolü

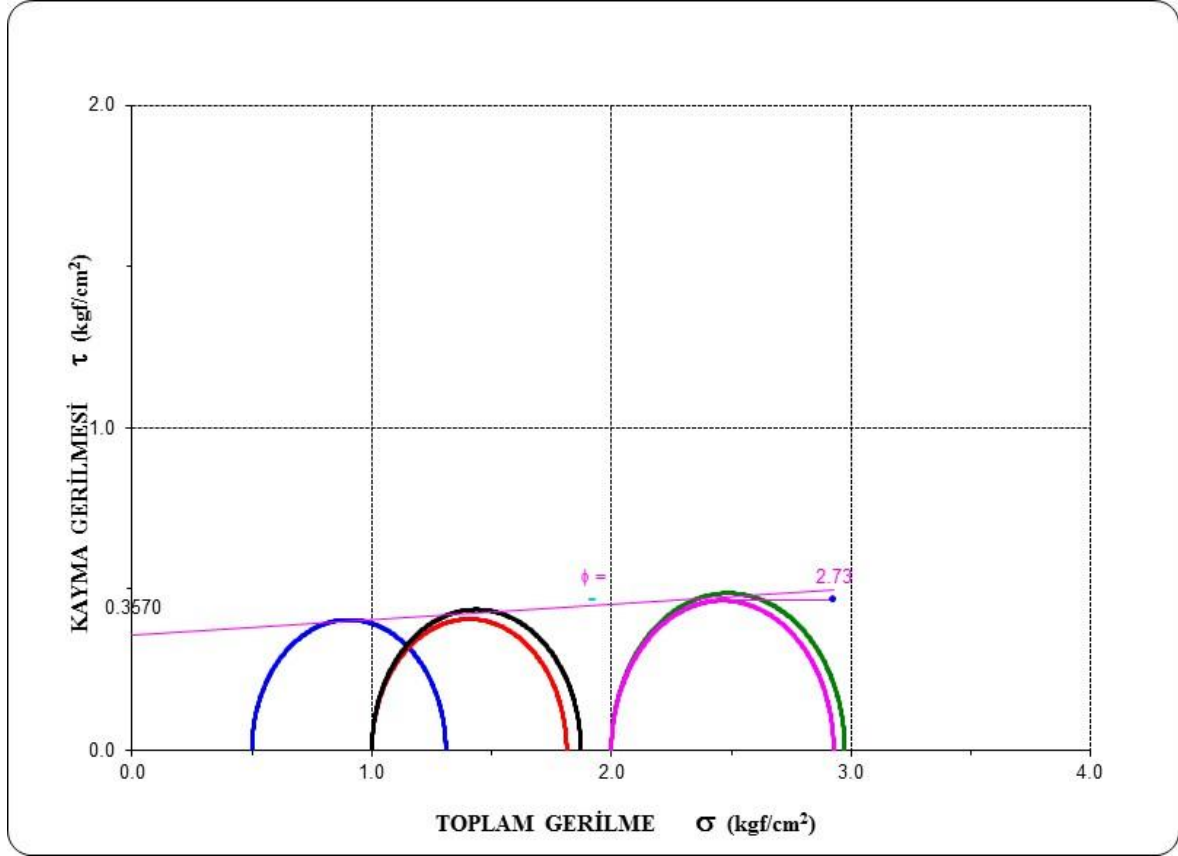


Resim 4.13. (a) UD tüpünden çıkarılan numunenin tartılması (b) Çıkarılan numunelerin desikatörde saklanması (c) Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyinin yapılması (d) Deney sonunda numune deformasyonu ve kırılma şekli

Doğal killi zemin numunesinin konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç dayanımı test sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1. ve Şekil 4.7.'te verilmiştir.

Çizelge 4.1. Doğal killi zemin numunesinin üç eksenli basınç dayanımı test sonuçları

Numuneler		1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune
Çap d_0	cm	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
Yükseklik H_0	cm	6.95	6.98	6.97	7.39	7.36
Alan	cm ²	9.62	9.62	9.62	9.62	9.62
Hacim	cm ³	66.865	67.153	67.057	71.098	70.809
Yaş kütle	gr	119.18	120.96	122.39	129.52	130.15
Yaş BHA	kN/m ³	17.82	18.01	18.25	18.22	18.38
Başlangıç Su İçeriği W	%	44.21	45.33	41.37	46.28	43.08
σ_3	kgf/cm ²	0.5	1.0	2.0	1.0	2.0
$\max. \Delta \sigma_1$	kgf/cm ²	0.8082	0.8125	0.9731	0.8720	0.9274
σ_1	kgf/cm ²	1.308	1.813	2.973	1.872	2.927
Kohezyon $c =$		0.357 kgf/cm² (35.007 kN/m²)				
İçsel sürtünme açısı $\phi =$		2.73 °				



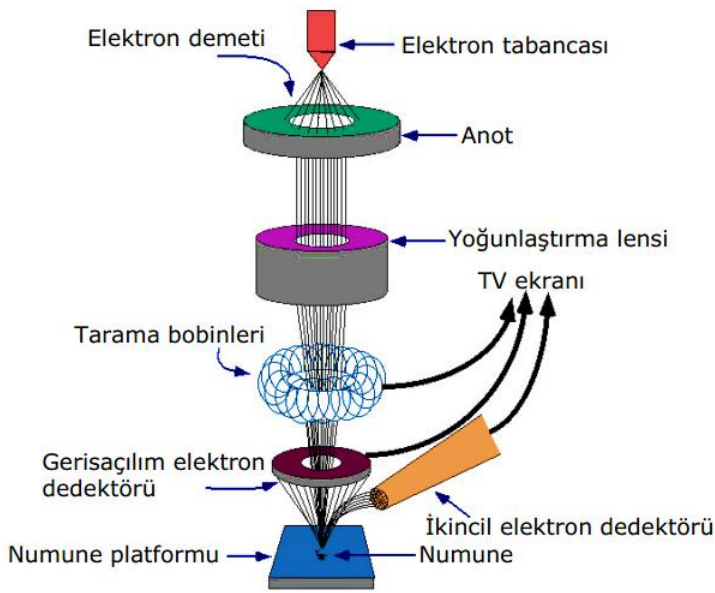
Şekil 4.7. Doğal killi zemin numunesinin üç eksenli basınç dayanımı Mohr daireleri ve kırılma zarfı

Numune alanından shelby tüpleri ile alınan doğal killi zeminin konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç testi sonunda kohezyon değeri 35 kPa, içsel sürtüme açısı ise 2.7° olarak tespit edilmiştir. Numunelerin kırılma şekline bakıldığında ise (Resim 4.13.d.) kırılma düzleminin yaklaşık 45° açı yaptığı görülmekte ve Mohr dairesinde elde edilen kırılma düzlemi $(45+\phi/2)$ ile yaklaşık olarak aynı doğrultuda olduğu gözlemlenmiştir.

4.1.12. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Elektron mikroskopları temelde bir elektron kaynağından salınan elektronların numune ile etkileşimleri sonucu elde edilen verilerin algılayıcılar tarafından işlenerek görüntü oluşumu sağlanır. Elektron mikroskoplarında elektron kaynağı olarak elektron tabancaları kullanılmaktadır. Elektron tabancası içerisinde volfram flaman tel yer almaktadır. Flaman tele uygulanan voltaj neticesinde telin sıcaklığı 2700°K 'e kadar çıkabilmekte ve telden elektron salınımı gerçekleştirmektedir. Salınan elektronların tekrar flaman tel üzerine

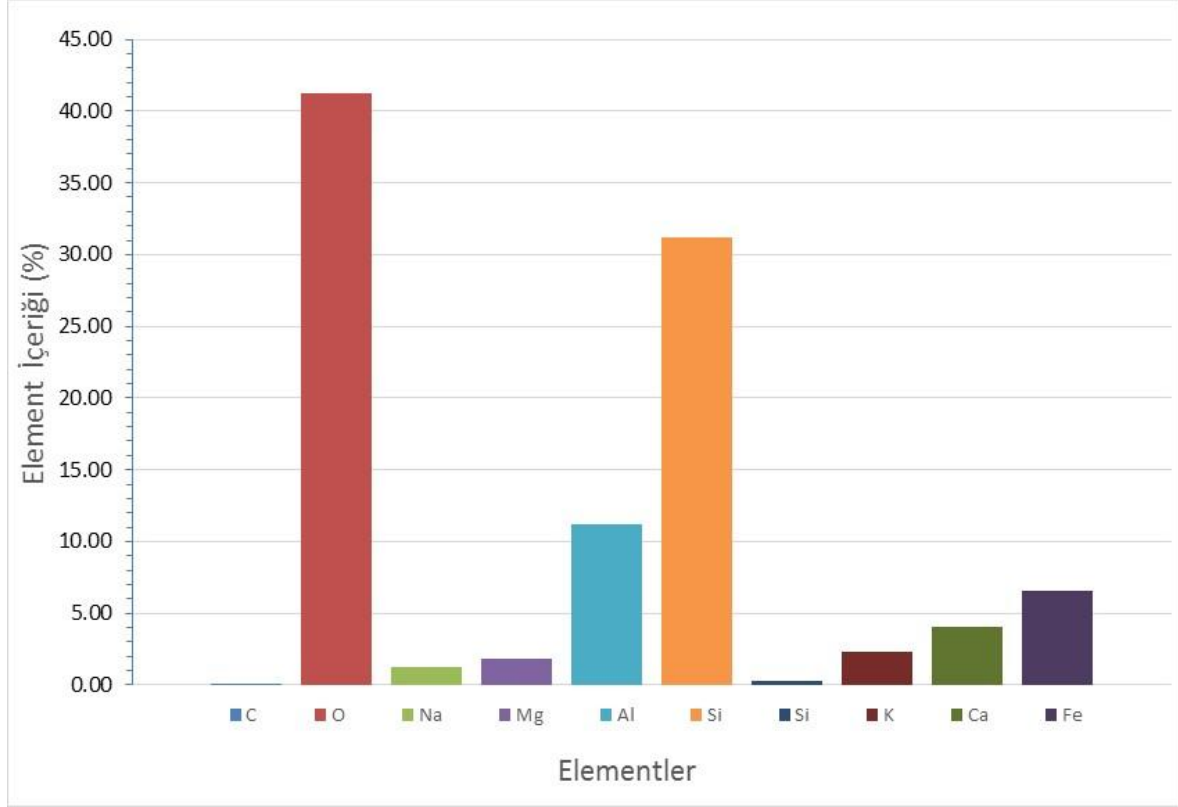
düşmesini önlemek ve numune yüzeyine doğru hızlandırmak maksadıyla anot plaka kullanılır. Anot plaka vasıtasıyla yönlendirilen elektronlar sırasıyla kondansör mercekten ve objektif mercekten geçmektedirler. Bu mercekler elektromanyetik özellik gösterir. kondansör mercek elektron demetini yoğunlaştırarak objektif merceğe göndermekte, objektif mercek de elektron demetini numune üzerine odaklamaktadır. Salınan elektronların sistem içerisindeki gaz molekülleriyle etkileşimini önlemek maksadıyla bütün işlemler vakum ortamında gerçekleştirilmektedir. Taramalı elektron mikroskobunun şematik görünümü Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Taramalı elektron mikroskobunun şematik görüntüsü [97]

EDS analizinde numune üzerine taramalı elektron demeti gönderilerek analiz işlemi gerçekleştirilir. Numune yüzeyine çarptırılan yüksek enerjili elektronlar numuneden elektron koparır. Kopan elektron iç yörüngeden kopmuş ise, atomik kararlılığı sağlamak üzere dış yörüngeden elektronlar bu boşluklara sıçrama yaparlar. Daha yüksek enerjili olan dış yörüngedeki elektron fazla enerjisini ışıma yaparak kaybeder. Bu kaybedilen enerji de X-ışını olarak karşımıza çıkar. Yayımlanan X-ışınının karakteristik özelliği, yapının element atomunu barındırdığı ve hangi enerji kabuğundan yayımlandığı ile ilgili bilgiler verir. Açığa çıkan X-ışınları elektronik alıcılar tarafından algılanırlar. Elde edilen veriler bilgisayar monitöründe pikler oluşturur ve elementel analiz yapılmış olur. Elementlerin yaptıkları pikler altlarındaki alanlarla orantılıdır.

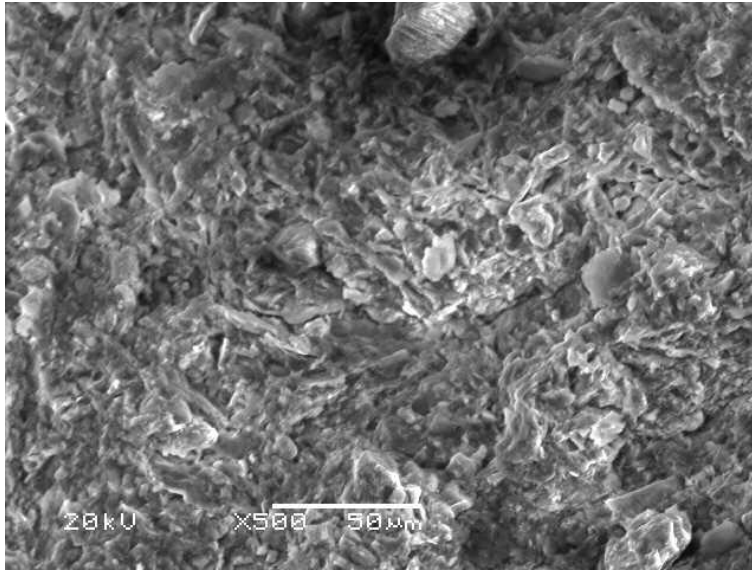
Stabilizasyon deneylerinde kullanılan killi zemin numunesine ait Elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) ve EDS analizleri Resim 4.14. ve Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. EDS analizlerinden elde edilen doğal haldeki killi zemin numunelerine ait element içerikleri

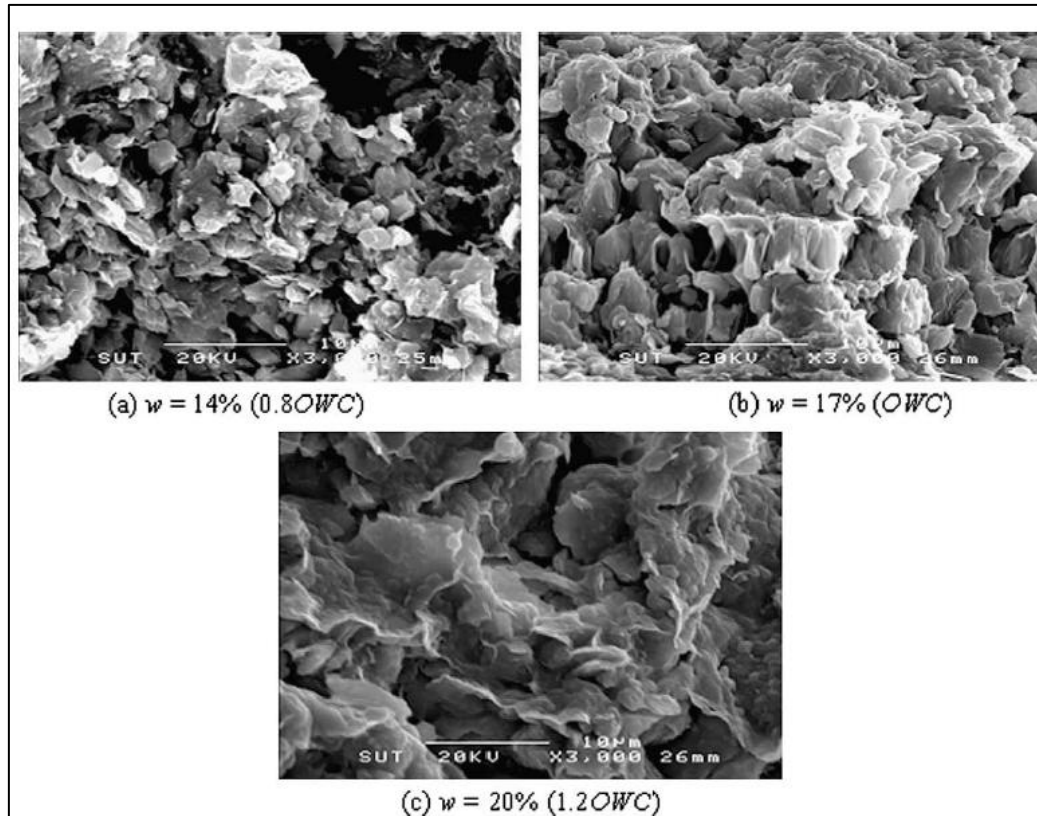
Montmorillonit olarak adlandırılan 2:1 grubu kil mineralleri 2 silika levhası ve 1 alumina levhasından oluşmaktadır. EDS analizlerinde ise kil minerallerinin ağırlıklı olarak 2,5:1 oranında silisyum ve alüminyum elementlerini içerdiği tespit edilmiştir. Ayrıca Mitchell ve Soga (2005) simektit grubunun, silikanın çokça bulunduğu, Mg^{++} ve Ca^{++} iyonlarının Na^{++} ve K^{+} iyonlarından fazla olduğu ortamlarda yer aldığını ifade etmiştir [87].

EDS analizlerinde Mg^{++} ve Ca^{++} iyonlarının Na^{++} ve K^{+} iyonlarına oranla daha yoğun olduğu tespit edilmiş ve killi zemin numunesinin kalsiyum montmorillonit olduğu taramalı elektron mikroskobu deneyleri ile de teyit edilmiştir. Ca Montmorillonit kilinin aktivitesinin tipik değeri 1,5 olup, hidrometre deneyinden elde edilen veriler ışığında killi zemin numunesinin aktivitesi 1,15 olarak tespit edilmiş ve tipik değerler ile benzerlik göstermiştir.



Resim 4.14. Doğal killi zemin numunesinin SEM analizi görüntüleri

Optimum su muhtevası değerinde sıkıştırılan killi zeminden elde edilen elektron mikroskobu görüntülerine bakıldığında, montmorillonit kilinin tipik özelliği olan yapraksı yapılanma görüntülenmiştir. Literatürde yer alan SEM analizleri ile tipik benzerlik göstermiştir. (Resim 4.15.)



Resim 4.15. Farklı su muhtevalarında sıkıştırılmış killi zemin numunlerinin SEM analizi görüntüleri [86]

4.2. Stabilizasyon Deneylerinde Kullanılan Çimentoların Özellikleri

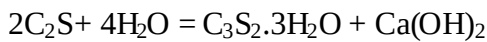
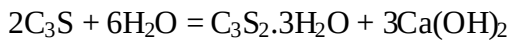
Doğal halde bulunan kalker taşları ile kil karışımının yüksek sıcaklıkta (1400 °C) ısıtılarak öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bağlayıcı malzeme çimento olarak tanımlanır [88].

Kalsiyum silikatlardan elde edilen çimento malzemesinin yapısında $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ve bunlara ek olarak Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 içerir. Portland çimentosu karışımında ortalama olarak 22% SiO_2 , 7% Al_2O_3 , 63% CaO , 2.5% MgO , 3% Fe_2O_3 , 1.7% SO_3 içerir. Pratik olarak Portland çimentosu aşağıdaki 4 ana bileşenden meydana gelmektedir [89];

Trikalsiyum Silikat	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_3S)
Dikalsiyum Silikat	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C_2S)
Trikalsiyum Alüminat	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)
Tetrakalsiyum Alüminoferrit	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

Portland çimentosu Kireç, kum ve kil karışımından elde edilir. Bu karışımın %25-40'sini killi kireç oluşturmaktadır. Üretim aşamasında kireç kalker ya da marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan karışıma girerken, silis için ise başlıca kaynak kildir. Üretim sonunda ortaya çıkan klinker ürününün kalsiyum sülfat (alçı) ile öğütülmesi ile çimento üretilir. Bu işlem çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonlarının ve katılaşma sürecinin kontrolü için uygulanmaktadır [89].

Çimentonun su ile tepkimesi sonrasında katılaşma tamamlanır. Aşağıdaki tepkimelerle kristalize malzeme oluştuğu varsayılarak katılaşma mekanizması tanımlanmaya çalışılmıştır [89];



Bu tepkimelerde, su ile C_3S hızlı sertleşerek ilk dayanımı sağlar ve iki günde tepkimenin çoğu tamamlanır. C_2S ise daha yavaş tepkimeye girer ve birinci haftadan sonra dayanım artışından sorumludur [89].

Bu deneysel çalışmada TS En 197-1 çimento standardında genel çimentolar olarak adlandırılan standart Portland çimentosu (Cem I) ve Portland kökenli ince taneli Rheocem 650 çimentosu kullanılmıştır. Portland Cem I Çimentosu ve Rheocem 650 Mikroçimentosu'nun yüzey alanları aşağıda yer alan Çizelge 4.2.'de, tane boyu dağılımı Çizelge 4.3.'de, kimyasal kompozisyonları ise Çizelge 4.4.'de gösterilmiştir;

Çizelge 4.2. Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun yüzey alanları

	Yüzey Alanı (m ² /kg)
CEM I 42.5	383 m ² /kg
RHEOCEM® 650	694 m ² /kg

Çizelge 4.3. Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun tane boyu dağılımı

	Portland Cem I 42.5	RHEOCEM® 650
< 120 mikron	%100	
< 86 mikron	%99	
< 60 mikron	%95	
< 40 mikron	%92	%100
< 30 mikron	%84	%99
< 20 mikron	%73	%98
< 15 mikron	%61	%94
< 10 mikron	%48	%77
< 5 mikron	%33	%44
< 2 mikron	%17	%16
< 1 mikron	-	-

Çizelge 4.4. Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun kimyasal kompozisyonları

Kimyasal Bileşim	Portland Cem I 42.5	Rheocem 650
SiO ₂	18.8	19.8
Al ₂ O ₃	4.0	4.2
Fe ₂ O ₃	5.3	4.1
CaO	62.2	62.5
MgO	2.0	2.8
SO ₃	3.25	2.1

Çizelge 4.4. (devam) Portland Cem I ve Rheocem 650 çimentosunun kimyasal kompozisyonları

Kimyasal Bileşim	Portland Cem I 42.5	Rheocem 650
D50 (μm)	10.8	5.9
D95 (μm)	60	16.2
Specific Gravity	3.19	3.10
Fineness (cm^2/g)	3,830	6,940

4.3. Stabilizasyon Deneylerinin Yapılması

Deneylerde kullanılacak killi zemin numuneleri sahadan temin edildikten sonra küçük parçalara ayrılarak açık havada kurumaya bırakılmıştır. Kuruma işlemi tamamlandıktan sonra çelik tokmak yardımı ile numuneler öğütülmüştür (Resim 4.16.). Öğütülen numuneler 4.75 mm elekten geçirilerek etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta kurutularak stabilizasyon deneylerinde kullanılmıştır.



Resim 4.16.(a) Açık havada kurutulmuş killi zemin numuneleri (b) Killi zemin numunelerinin çelik kalıplara konması (c) Killi zemin numunelerinin çelik tokmak ile öğütülmesi (d) Öğütülen killi zemin numuneleri

4.3.1. Atterberg limitleri tayini

Deneyleerde kullanılacak karışım numuneleri 8%, 10% ve 12% çimento oranlarında ve %29 optimum su muhtevası değerinde hazırlanmıştır (Resim 4.17.). Hazırlanan numuneler streçlenerek kür odasında 7 gün, 14 gün, 28 gün, 56 gün bekletilmiştir. Kürleme sonrasında karışım numuneleri üzerinde Atterberg deneyleri yapılmıştır



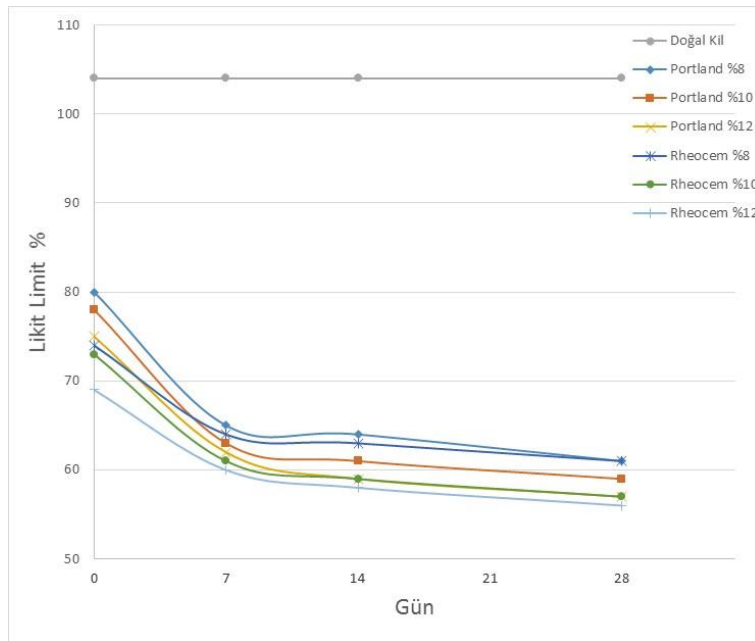
Resim 4.17. (a) Çimentolu numunenin görünümleri (b) Çimentolu numuneye suyun eklenmesi (c) Çimentolu numunenin karıştırılması (d) Spatula yardımı ile suyun karışıma eşit olarak dağıtılması

28 günden daha uzun süre kürlenmiş karışım numunelerinin likit limit ve plastik limit değerleri tespit edilememiştir. Çünkü 28'inci günden sonra çimentolu zemin numuneleri agregalaşma göstermiştir (Resim 4.18).

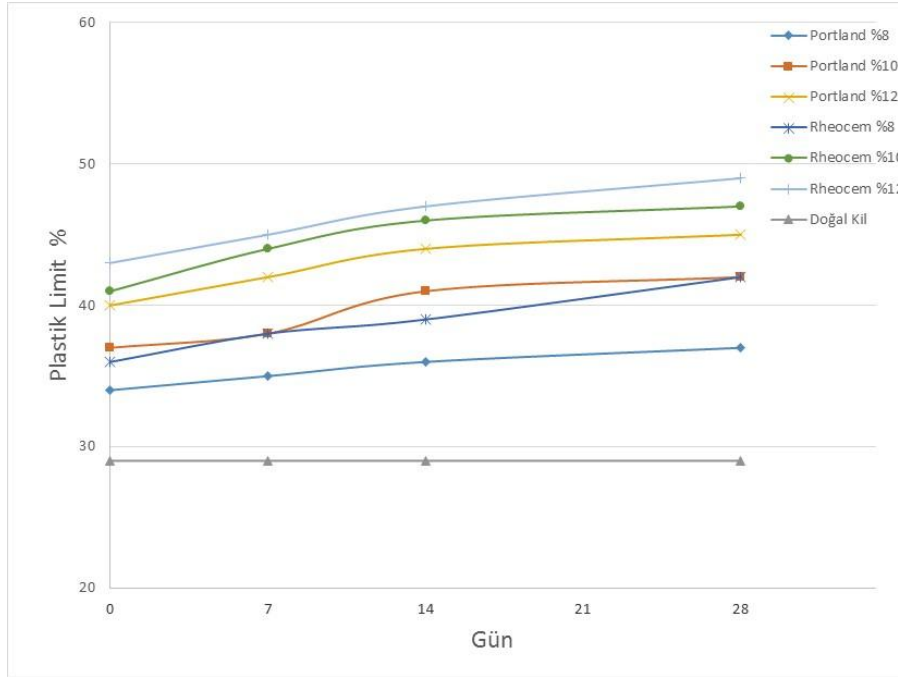


Resim 4.18: Atterberg limit tayini için 56 gün kür süresi uygulanmış numune

Çimento ile stabilize edilmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen Atterberg deney sonuçlarında elde edilen likit limit ve plastik limit aşağıdaki Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin zamana bağlı likit limitleri



Şekil 4.11. NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin zamana bağlı plastik limitleri

NPC ve MPC ile stabilize edilen killi zemin numunelerinin likit limitlerinin azaldığı ve plastik limitlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, çimento oranının ve kür süresinin artması ile likit limit değerlerinin azalma, plastik limit değerlerinin ise artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin, çimento katkısı ile topaklaşması ve agregalaşmasından dolayı plastik limitlerin arttığı düşünülmektedir. Resim 4.17.'de agregalaşma sebebi ile plastik özelliğini kaybetmiş killi zemin numunesini görülmektedir. Aşağıda Çizelge 4.5'te literatürden alınan veriler sunulmuştur. Bu veriler, deneysel çalışmalarımızda elde edilen veriler ile benzerlik göstermektedir. Çimento katkısı ve kür süresinin artmasıyla likit limit değerlerinin azaldığı ve plastik limit değerlerinin arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.5. Çimento ile stabilize edilmiş killi zeminlerin LL, PL ve PI değerleri

	Zemin Tipi	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndeksi (%)	Referans No #
Teksas 1	CH	63	21	42	3
Teksas 1 + 3% çimento		49	40	9	
Teksas 1 + 6% çimento		47	40	7	
Teksas 1 + 9% çimento		NP	NP	NP	

Çizelge 4.5. (devam) Çimento ile stabilize edilmiş killi zeminlerin LL, PL ve PI değerleri

Siltli Kil	CH	74	28	46	86
Siltli Kil + 3% çimento		74	45	29	
Siltli Kil + 5% çimento		73	45	28	
Siltli Kil + 10% çimento		71	45	26	
Siltli Kil	CH	90	32	58	90
Siltli Kil + 6% çimento		84	47	37	
Siltli Kil + 8% çimento		78	50	28	
Siltli Kil + 10% çimento		76	48	28	
Siltli Kil + 12% çimento		75	48	27	
Kumlu Kil	CH	68	28	40	91
Kumlu Kil + 5% çimento		65	30	35	
Kumlu Kil + 9% çimento		62	32	30	
Kumlu Kil + 13% çimento		59	33	26	

4.3.2. Kompaksiyon (Proctor) deneyi

Numune karışımlarında kullanılan standart Portland çimentosu ve Portland kökenli Rheocem 650 ince taneli çimento etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta kurutularak karışım için hazır hale getirilmiştir. Sonrasında, öğütülmüş kil numuneleri büyük bir kap yardımı ile ağırlıkça %8, %10 ve %12 oranlarında çimento ile homojen bir görünüm elde edilinceye kadar karıştırılmıştır (Resim 4.19.).



Resim 4.19. (a) Kıl numunelerin karıştırma kabına konması (b) Çimentonun eklenmesi (c) Çimento ve kılın homojen bir görünüm alana kadar karıştırılması (d) Homojen kıl - çimento karışımı

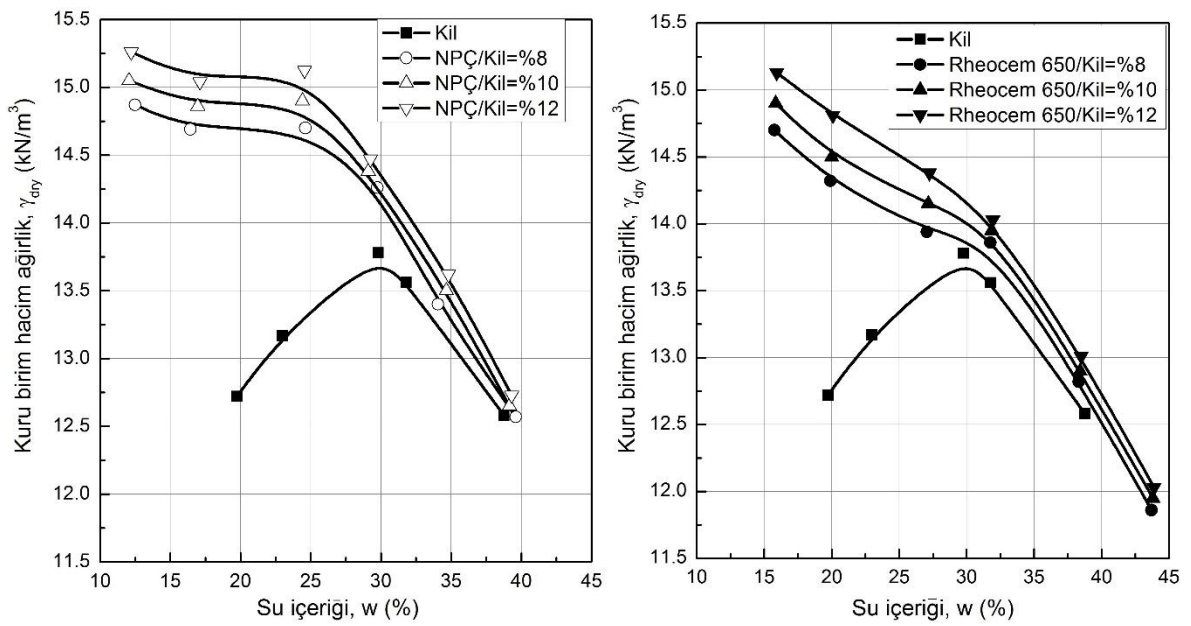
Karıştırılan numuneler farklı su oranlarında kompaksiyon kalıbında sıkıştırılmıştır.

Numunelerin sıkıştırılma aşamaları Resim 4.20.'de gösterilmiştir.



Resim 4.20. (a) Kompaksiyon moldarının yağlanması (b) Kompaksiyon deneyinin yapılması (c) Sıkıştırılan numunenin çelik moldardan çıkartılması (d) Sıkıştırılmış numunenin görünümü

Bir seri deney sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve bunlara karşılık gelen su muhtevası değerleri grafik olarak Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. NPC ve MPC katkıli killi zemin numunelerinin kuru birim hacim ağırlık – su muhtevası bağıntıları

Yapılan stabilizasyon deneylerinde, NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin Proctor eğrilerinin, tipik eğriden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Islah edilmemiş kohezyonlu zeminlerde tipik Proctor eğrisinin davranışı su şekidedir: optimum su muhtevasının sol tarafında yer alan bölgede, kil partiküllerinin oluşturduğu boşluğu kaplayacak yeterli miktarda boşluk suyu bulunmamaktadır. Zemin partikülleri arasındaki mesafenin azalması ile taneler birbirine van der Waals çekim kuvveti ile tutunur. Bu çekim kuvveti ile yüzey-kenar bağı olan kümelenmeler (düzensiz yığılımlar) artar. Su içeriğinin artması ile düzensiz yığılımlar sıkıştırma enerjisinin etkisiyle daha stabil bir konfigürasyon meydana getirirler. Su içeriği arttıkça zemin partiküllerinin hareketi kolaylaşır. Optimum sıkışmanın sağlandığı noktaya ulaşıldığında, bu su içeriği optimum su muhtevası olarak adlandırılır. Optimum su içeriğinden yüksek su içeriklerinde zemin partikülleri arasındaki boşlukların boşluk suyu ile dolarak makaslama etkisinde birbiri üzerinde kaymaya başlamasıyla sıkışabilirliğin azalması, dolayısı ile optimum su içeriğinin sağında kalan bölgede maksimum kuru birim hacim ağırlığın azalması beklenir.

NPC ve MPC ile yapılan stabilizasyonlarda su içeriğinin düşük olduğu yerlerde düzensiz ve boşluklu kümelenmelerdeki partiküllerin birbiri ile daha sıkı kenetlenme gösterdiği ve bu sıkı kümelenmeler neticesinde maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Kümelenmelerdeki bu sıkı kenetlenmenin, zayıf olarak nitelendirilen van der Waals çekim kuvvetleri ile oluşan kenar-yüzey birleşimlerindeki dengelenmemiş kuvvet alanlarındaki katyon değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

NPC ve MPC'nin %60'ından fazlası Ca^{++} mineralinden oluşmakta ve Ca^{++} mineralleri, yüksek yer değiştirme enerjisinden dolayı kil yüzeyine tutunarak, çift katman difüzyonundaki itme kuvvetini azaltır ve kil levhaları arasındaki sıkışabilir genel yapıyı oluşturur. Bu sebeple kenar-yüzey birleşimlerinin daha sıkı kenetlenme göstermesiyle yüksek kuru birim hacim ağırlık elde edilir.

Kilin yüzeyinden uzaklaştıkça, suyun kil yüzeyine çekim kuvveti azalmaktadır. Su içeriğinin artması ve adsorbe su tabakasının kalınlaşması sebebi ile partiküller arasındaki çekim kuvveti de azalmakta ve taneler arası kenetlenmenin zayıflamasıyla oluşan topraklanmalarda daha düzensiz yapılar oluşmaktadır. Oluşan bu düzensiz yığılımların maksimum kuru birim hacim ağırlıkları da azalmaktadır.

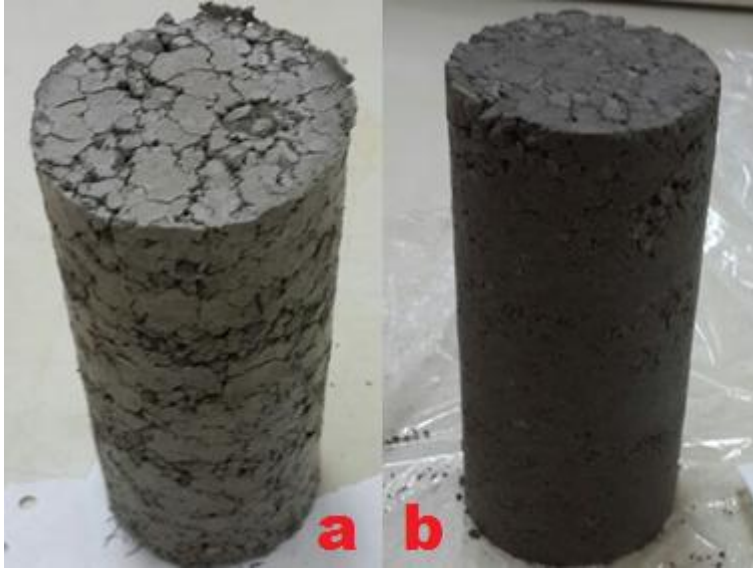
NPÇ ve MPÇ katkılı killi zemin numuneleri üzerinde yapılan sıkıştırma işlemlerinde, su içeriğinin düşük olduğu bölgelerde kenar-yüzey (kenar-kenar veya yüzey-yüzey de olabilir) birleşimlerinin yapısı, sıkışabilirliği kontrol etmektedir. Su içeriğinin artması ile daneler arasındaki kapiler dirençte azalma meydana gelir, sıkışabilirlik kümelenmeler arasındaki boşluk suyu tarafından kontrol edilir. Yapılan deneyler neticesinde, Proktor eğrisinin oluşumunda düşük su içeriklerinde kimyasal yapının, yüksek su içeriklerinde ise fiziksel yapının hakim olduğu anlaşılmıştır.

4.3.3. Islanma kuruma deneyi

Islanma Kuruma deneyi ASTM D559’da verilen standartlara göre yapılmıştır. 7 gün kürde bekletilen numune oda sıcaklığındaki suya daldırılır ve 5 saat bekletildikten sonra çıkarılır. Daha sonra 42 saat süre ile 71°C fırında kurutulur. Numunenin tüm yüzeyi tel fırça ile fırçalanarak ıslanma-kuruma esnasında gevşeyen malzeme giderilir. Bu işlem 12 defa tekrarlandıktan sonra numune 110°C fırında sabit ağırlığa gelene kadar bekletilip tartılır ve test başlangıcına göre ağırlık kaybı belirlenir.

Islanma kuruma deneyleri yapılan 8%, 10% ve 12% MPÇ ve NPÇ katkılı ve açık havada 7 gün kürlenmiş olan tüm numuneler su içinde dağılmıştır. Benzer şekilde, nemli olarak 7 gün kürlenen numuneler ise ilk 5 saat içerisinde dağılmış ve bu nedenle hem açık havada hem de nemli olarak kürlenmiş numuneler üzerinde ıslanma-kuruma deneyleri gerçekleştirilememiştir.

Açık havada kürlenen numunelerde oluşan rötre çatlakları (Resim 4.21.) nedeniyle numuneler su içerisinde ani dağılma göstermiştir (Resim 4.22.). Diğer taraftan, nemli ortamda kürlenen numuneler su içerisinde yumuşamış ve zamanla numune kayıplarının devam etmesi ile bu numuneler dağılmaya ancak 5 saat kadar direnebilmişlerdir.



Resim 4.21. (a) Açık havada kürlenmiş numunelerde oluşan çatlaklar (b) Plastik poşetlere sarılarak kürlenmiş numunelerde oluşan çatlaklar



Resim 4.22. (a) Numunelere suyun eklenmesi (b) Su eklenen numunelerin dağılması

MPÇ ve NPÇ ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin ıslanma ve kuruma çevrimine dayanıklı olmadıkları gözlemlenmiştir.

Her iki çimento ile stabilize edilmiş numunelerin ıslanma-kuruma çevriminde erken dağılmasının nedeninin, killi zeminin çimento ile ikincil reaksiyonunda hızlı biçimde topaklaşmaya ve agregalaşmaya (Bknz sem analizi) yol açması, makro boşlukların artması ve agregalar arasında yeteri kadar bağlayıcı madde bulunmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3.4. Serbest şişme deneyi

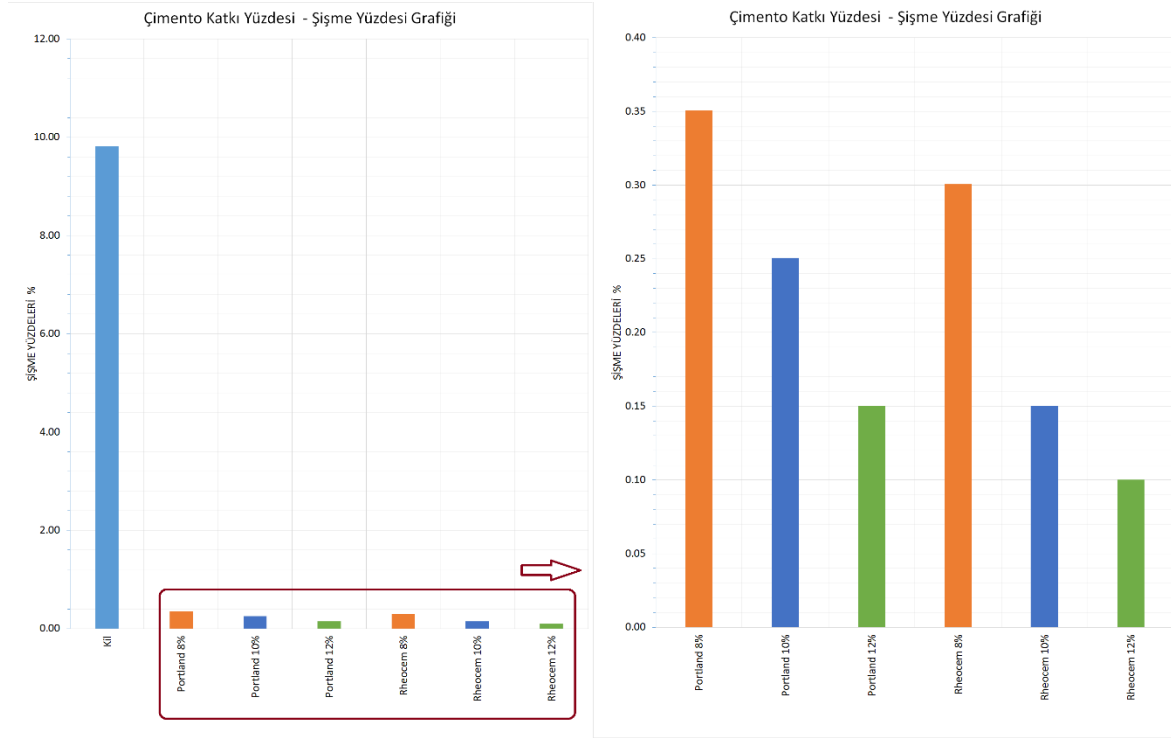
Karışımında kullanılan standart Portland çimentosu ve Portland kökenli Rheocem 650 ince taneli çimento etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta kurutularak karışım için hazır hale getirilmiştir. Öğütülmüş kil numuneleri, büyük bir kap içerisinde ağırlıkça %8, %10 ve %12 oranlarında çimento ile homojen bir görünüm elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Karışımların su muhtevası değeri 29%, kür süreleri ise 28 gün olarak belirlenmiştir. Karışımlar konsolidasyon halkasında Proctor sıkılığında hazırlanmış, streçlenerek kür odasında 28 gün bekletilmiş ve sonrasında konsolidasyon cihazında hacimsel şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şişme deneyleri için çimentolu killi zemin numunelerinin konsolidasyon ringine sıkıştırılmasına ait fotoğraflar Resim 4.23.'de gösterilmiştir.



Resim 4.23. (a) Numunelerinin çelik moldlar ile sıkıştırılması (b) çelik moldlar ile hazırlanmış şişme deneyi numunesi (c) Sıkıştırılan numunenin şişme deneyine hazırlanması (d) Hazırlanan numunenin konsolidasyon cihazına yerleştirilmesi

Yapılan deneyler neticesinde, Proctor sıkılığında katkısız killi zemin numunesinin %9.82 olan serbest şişme yüzdesi, %12 NPC katkısı ile %0,15 ve %12 MPC katkısı ile de %0.10 değerine kadar azaltılabilmektedir. Rheocem 650 ince daneli çimentonun, standart Portland

çimentosuna göre şişmeyi azaltmada biraz daha etkili olduğu ve çimento oranı arttıkça şişme yüzdesinin de azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.13.).



Şekil 4.13. Çimento katkılu killi zemin numunelerinin serbest şişme yüzdesleri

Literatürde yer alan çalışmalarda yüksek plastisiteli killerin çimento ile stabilizasyonunda killerin şişme yüzdesi azalmakta, çimento oranı arttıkça şişme potansiyelini azaltmaya olan etki de artmaktadır (Çizelge 4.6.).

Çizelge 4.6. Literatürde yer alan önceki çalışmalarda çimento lu kil numunelerinin şişme yüzdesleri

	Zemin Türü	Şişme Yüzdesi	Referans
Kil	CH	5	93
Kil + 3% çimento		1.32	
Kil + 8% çimento		0.14	
Kumlu Kil	CH	35	92
Kumlu Kil + 5% çimento		15	
Kumlu Kil + 10% çimento		9	

Çimento ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin ikincil reaksiyon sonucu oluşan topaklaşma ve agregalaşma nedeni ile şişmeye karşı hassasiyetinin azaldığı düşünülmektedir. Kil partikülleri arasındaki düşük değerlikli (sodyum, potasyum vs.) iyonların yerini yüksek değerlikli kalsiyum iyonlarının alması ile su moleküllerinin kil yüzeyine tutunma oranında azalma meydana gelir. Bu nedenle NPÇ ve MPÇ katkılı kil numunelerinin şişme potansiyellerinin azaldığı düşünülmektedir.

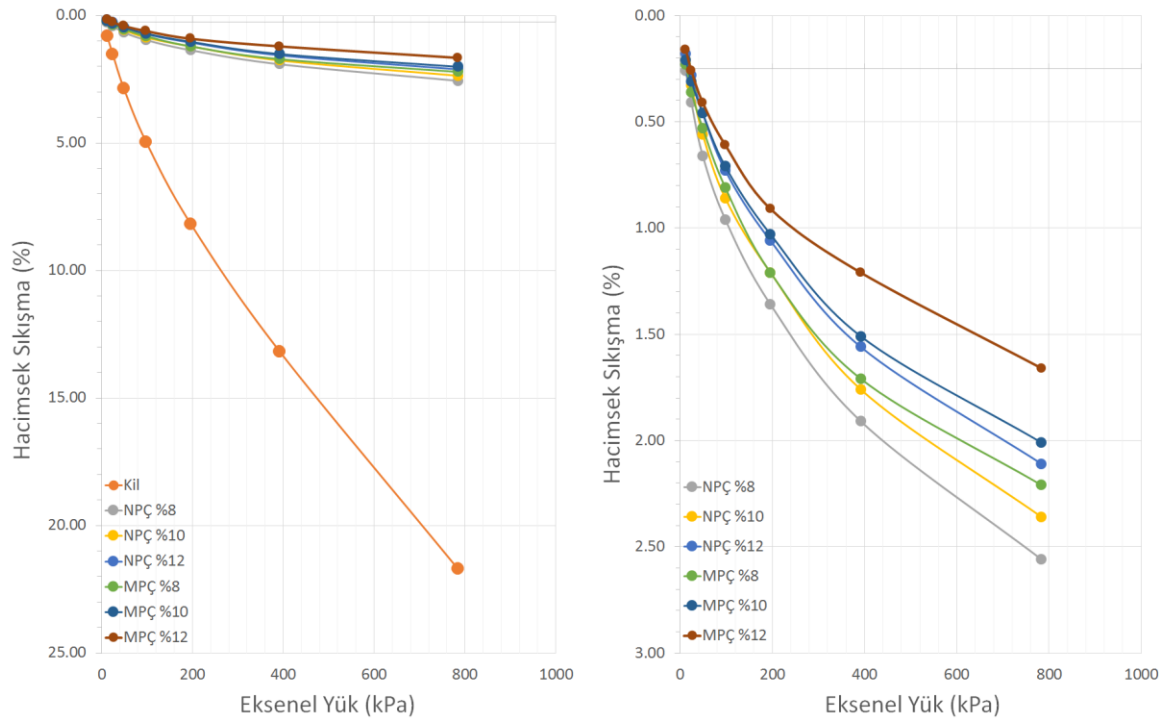
4.3.5. Sıkışabilirlik Deneyi

Yük oturma deneyleri için çelik moldlar yardımı ile hazırlanan numuneler (Resim 4.24.) konsolidasyon cihazına yerleştirilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.24. Yük oturma deneyi numuneleri

NPÇ ve MPÇ katkılı ve katkısız killi zemin numunelerinin nemli kür şartlarındaki yük-oturma ilişkileri, aşağıda Şekil 4.14.'da yarı logaritmik grafikte sunulmuştur.



Şekil 4.14. Katkısız, NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerin hacimsel sıkışma yüzdeleri

Plastik torbalar içerisinde nemli halde kürlenmiş katkısız killi zemin numunesinin hacimsel sıkışma yüzdesi %21.7 olarak tespit edilmiştir. NPC katkılı nemli halde kürlenmiş killi zemin numunelerinin hacimsel sıkışma yüzdesi %2.7 - %2.1'e azalırken, bu değer MPC katkılı nemli halde kürlenmiş numuneler için %2.2 - %1.6 olarak bulunmuştur. Hem MPC hem de NPC, killi zemin numunelerinin hacimsel sıkışabilirliğini önemli derecede azaltmıştır. İlaveten, MPC katkılı killi zemin numunelerinin hacimsel sıkışma yüzdesi NPC katkılı olanlardan daha azdır. NPC ve MPC benzer kimyasal bileşime sahip olmalarına rağmen, ince taneli çimento partiküllerinin iki kat fazla spesifik yüzey alanına sahip olmasından dolayı kil partikülleri ile temas yüzeylerinin artmasına neden olmakta ve hidrasyon ve puzolanik reaksiyonların daha efektif olmasını sağladığı düşünülmektedir.

4.3.6. Permeabilite deneyi

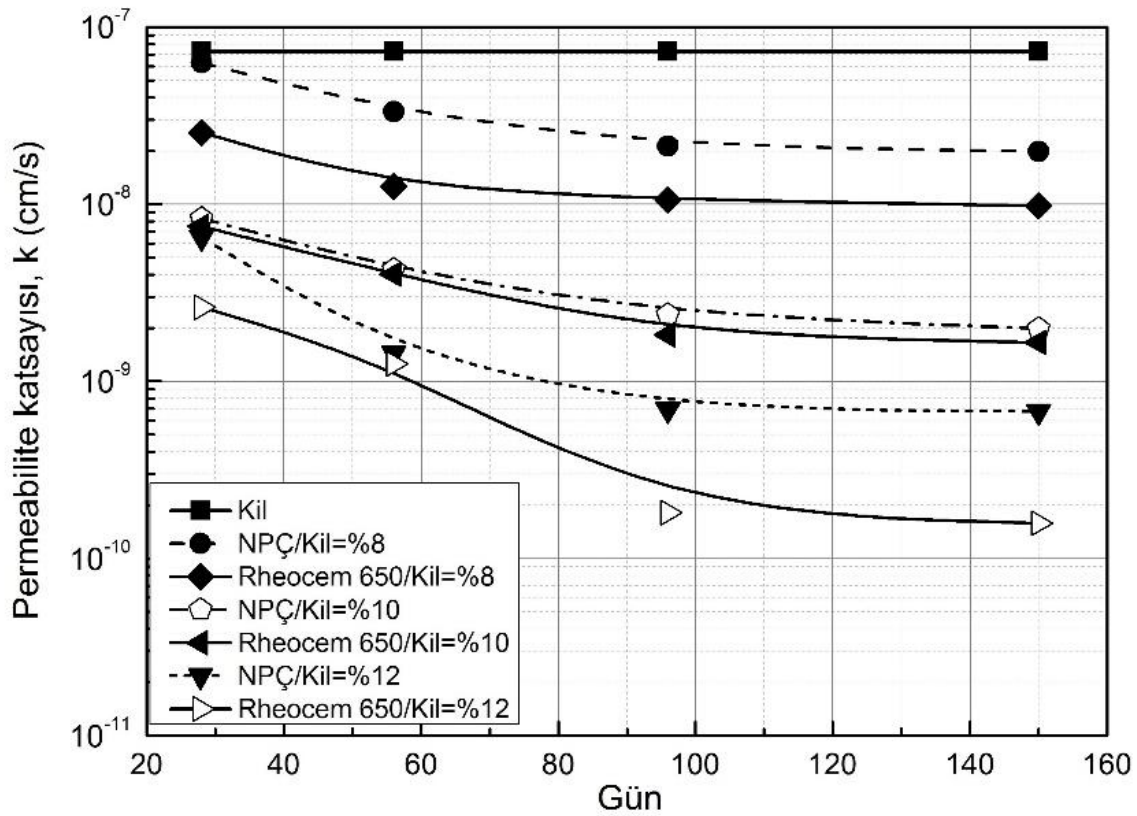
NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin permeabilite katsayılarının belirlenebilmesi amacıyla düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, permeabilite deneyi için 8%, 10% ve 12% oranında NPC ve MPC katılarak elde edilen killi zemin numuneleri optimum su muhtevasında (%29) su katılarak standart permeabilite moldlarında sıkıştırılmıştır. Numuneler daha sonra plastik torbalar içinde nemli ortamda küre bırakılmıştır (Resim 4.25.) Daha sonra düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmış ve elde edilen veriler kullanılarak numunenin permeabilite katsayıları hesaplanmıştır.



Resim 4.25. Permeabilite deneyi numuneleri

Permeabilite deneyinde zaman faktörü de dikkate alınarak 28 gün ile 150 gün arasında değişen zamanlarda düşen seviyeli permeabilite deneyleri yürütülmüş ve elde edilen verilerden zamana bağlı permeabilite katsayıları hesaplanarak Şekil 4.15.'te verilmiştir.



Şekil 4.15. NPC ve MPC katkılı killi zemin numunelerinin zamana bağlı permeabilite (k) katsayıları

Şekil 4.15.'te görüldüğü gibi NPC ve MPC, killi zemin numunesinin permeabilitesini önemli derecede azaltmıştır. Çimento miktarının artması ile permeabilite değerleri daha da azalmıştır. Ayrıca kür süresi arttıkça permeabilite değerinde düşüş de artmıştır. İnce taneli çimentonun, killi zemin permeabilitesini azaltmada daha etkili olduğu görülmüştür. Çimento partikül boyutunun azalmasıyla, reaksiyon yüzey alanı ve ikincil reaksiyon sonucu oluşan çimento lu ürünlerin (etrenjit) miktarı artmaktadır. Çimentolaşma ürünleri ile makro boşlukların dolarak porozitenin düştüğü dolayısıyla permeabilitenin azaldığı düşünülmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde (Çizelge 4.7.) çimento ile stabilize edilen killi zemin numunelerinin çimento oranı ve kür süresi arttıkça permeabilite katsayılarının azaldığı görülmektedir. Stabilizasyon deneyi sonuçları literatürdeki çalışmalar ile benzer sonuçlar vermiştir.

Çizelge 4.7. Çimentolu killi zemin numunelerinin permeabilite katsayıları

	Zemin Tipi	Hidrolik İletkenlik			Referans No #
		7. Gün m/s	28. Gün m/s	91. Gün m/s	
Teksas 1	CH				3
Teksas 1 + 3% çimento		1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	
Teksas 1 + 6% çimento		1.2E-05	9.0E-06	8.0E-06	
Teksas 1 + 9% çimento		3.5E-07	1.0E-07	3.0E-08	
Teksas 2	CH				
Teksas 2 + 3% çimento		2.3E-05	2.0E-05	1.8E-05	
Teksas 2 + 6% çimento		1.4E-05	1.0E-05	8.0E-06	
Teksas 2 + 9% çimento		1.5E-06	1.0E-06	7.0E-07	
Kumlu Kil	CH				94
Kumlu Kil + 4% çimento		1.50E-07			
Kumlu Kil + 6% çimento		1.26E-07			
Kumlu Kil + 8% çimento		1.00E-07			
Kumlu Kil + 10% çimento		7.50E-08			
Kumlu Kil + 12% çimento		5.00E-08			
Kumlu Kil + 15% çimento		1.00E-08			
Kumlu Kil + 20% çimento		3.00E-09			

4.3.7. Serbest basınç deneyi

Öğütülmüş kuru killi zemin numunesi ağırlığının %8, %10 ve %12 oranında NPC ve MPC ile optimum (%29) su muhtevasında homojen görünüm alana kadar karıştırılmış ve karışım numuneleri 5cm çapında 10cm yüksekliğinde çelik moldlar yardımı ile Proctor sıkılığında hazırlanmıştır (Resim 4.26.).



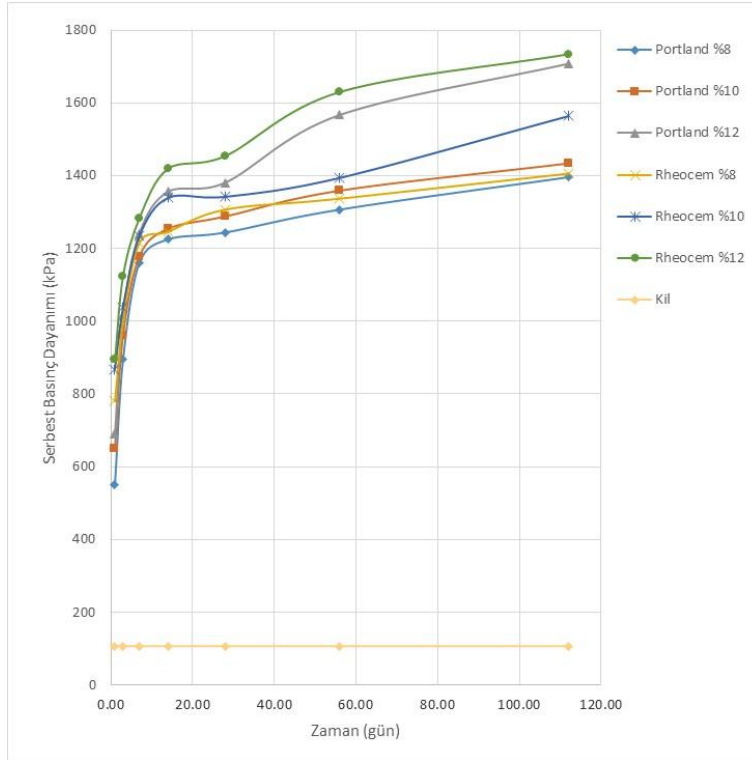
Resim 4.26. (a), (b) ve (c) Serbest basınç dayanımı testi için numune hazırlama moldu

Standart Portland çimentosu ve Portland kökenli Rheocem 650 ince taneli çimento ile ayrı ayrı hazırlanan karışımlar için, 2 farklı kürleme tipi, her bir kür tipi için 7 farklı kür süresi ve her farklı kür süresinde 3 adet numune örneği hazırlanarak toplamda 252 adet serbest basınç testi gerçekleştirilmiştir. Serbest basınç altında çimento katkılı killi zemin numunelerinin yenilme biçimleri Resim 4.27.'de gösterilmiştir.

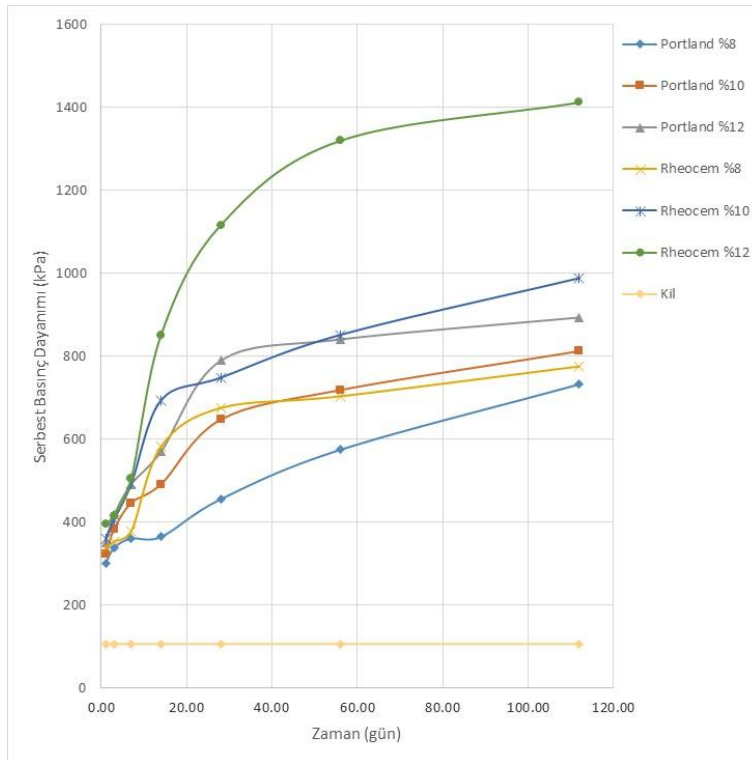


Resim 4.27. (a) ve (b), NPCÇ katkılı killi zemin numunelerinin yenilme biçimleri, (c) ve (d) MPCÇ katkılı killi zemin numunelerinin farklı yenilme biçimleri

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Açık havada kürlemeye bırakılan NPC ve MPC katkıli killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları



Şekil 4.17. Plastik torbalar içinde nemli ortamda kürlemeye bırakılan NPC ve MPC katkıli killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları

NPC ve MPC katkı killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımlarının önemli derecede arttığı görülmüştür. Her iki katkı maddesi ile hazırlanan killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları hem kür süresinin hem de çimento oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Açık havada kürlen numuneler, nemli ortamda kürlen numunelerden daha yüksek dayanım göstermiştir. Bunun nedeni ise, zemin partikülleri arasındaki suyun buharlaşmasından dolayı zemin partikülleri arasındaki çekme gerilmeleri artarak, sürtünme dayanımını da arttırmaktadır. Genel olarak çimentolu numunelerdeki dayanım artışının sebebi, kalsiyum iyonlarının çözünmesi ile zemindeki silikatlar ve alüminatlar ile reaksiyona girmesi ve puzzolanik reaksiyon ürünlerinin oluşmasıdır. Puzzolanik reaksiyon ürünleri kil partikülleri, topaklaşmaları veya mineralleri arasında bağ oluşturur ve daha güçlü bir matriks ortaya çıkarır ki bu da dayanımı artırır. MPC partiküllerinin reaksiyona giren yüzey alanı, NPC partiküllerinden iki kat daha fazla olması nedeniyle de matriksin daha güçlü olmasına ve daha yüksek dayanım elde edilmesine yol açmıştır .

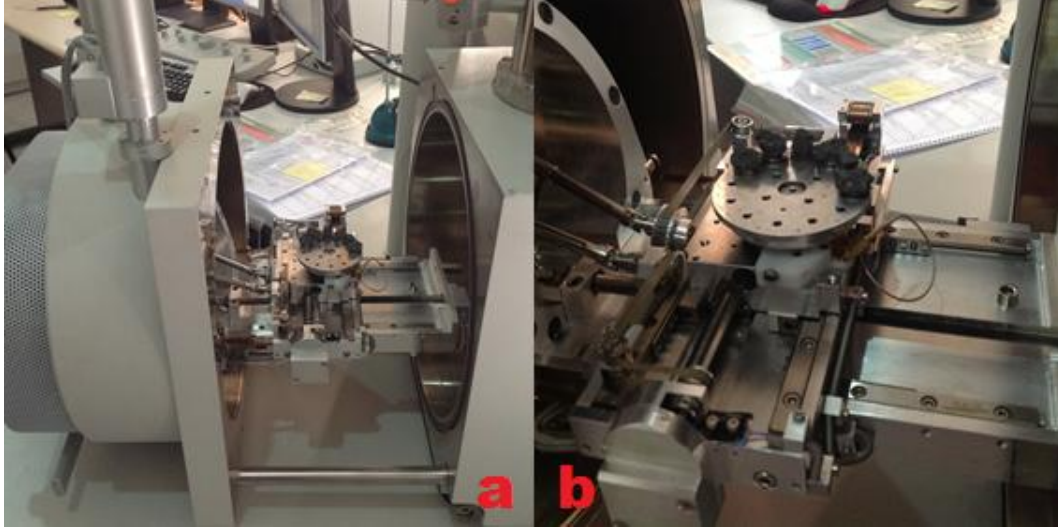
Serbest Basınç testleri neticesinde zemindeki dayanım artışı literatürdeki çalışmalar ile benzerlik göstermektedir (Çizelge 4.8.).

Çizelge 4.8. Çimento katkı killi zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları

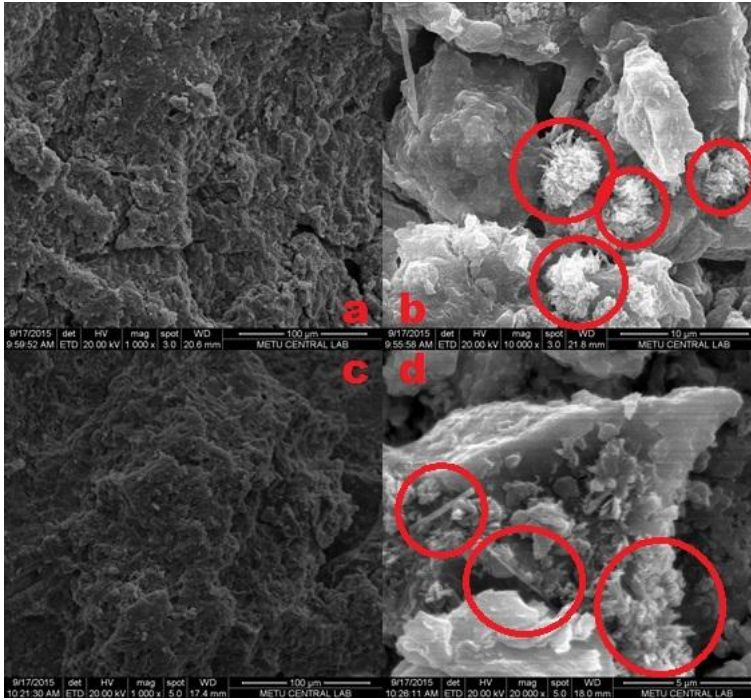
Zemin Tipi		Serbest Basınç Dayanımı			Referans
		7. Gün kN/m ²	28. Gün kN/m ²	91. Gün kN/m ²	
Teksas 1	CH	372	372	372	3
Teksas 1 + 6% çimento		1310	1655	1931	
Teksas 1 + 9% çimento		1724	2275	2482	
Teksas 2	CH	393	393	393	
Teksas 2 + 6% çimento		1379	1931	2137	
Teksas 2 + 9% çimento		2068	2206	2517	
Kumlu Kil	CH	1100	1100	-	94
Kumlu Kil + 6% çimento		2000	2600	-	
Kumlu Kil + 8% çimento		2200	3200	-	
Kumlu Kil + 10% çimento		2500	3500	-	
Kumlu Kil + 12% çimento		2750	3700	-	
Kumlu Kil + 15% çimento		3200	5100	-	

4.3.8. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

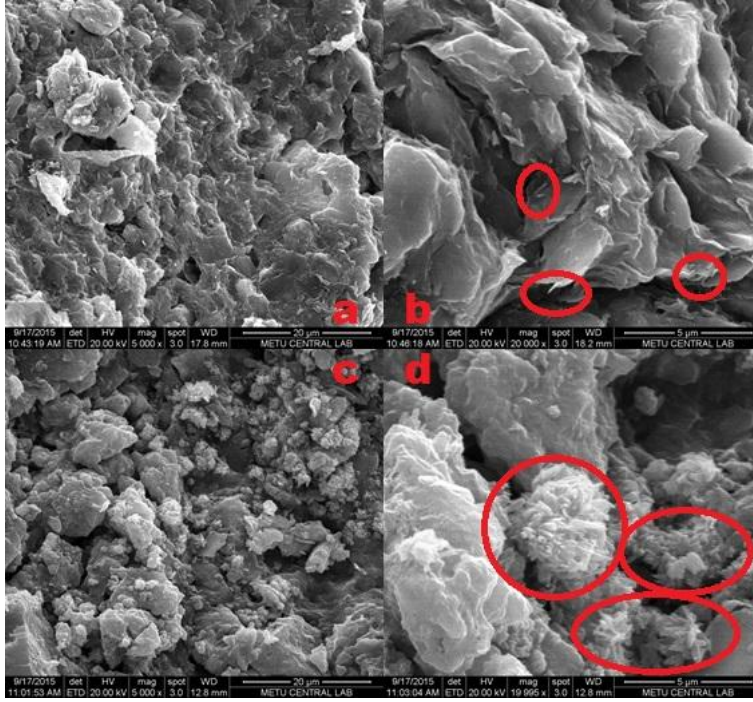
Optimum (%29) su muhtevasında sıkıştırılmış %8 ve %12 NPÇ ve MPÇ katkılı killi zemin numunelerinin 28 günlük kür süresi sonunda taramalı elektron mikroskobu ile analizleri yapılmıştır. (Resim 4.28., Resim 4.29., Resim 4.30.)



Resim 4.28. (a) ve (b) Taramalı elektron mikroskobu



Resim 4.29. (a) %8 NPÇ katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (b) %8 NPÇ katkılı numunedeki etrenjit oluşumu (c) %12 NPÇ katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (d) %12 NPÇ katkılı numunedeki etrenjit oluşumu



Resim 4.30. (a) %8 MPC katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (b) %8 MPC katkılı numunedeki etrenjit oluşumu (c) %12 MPC katkılı numunenin SEM analizi görüntüsü (d) %12 MPC katkılı numunedeki etrenjit oluşumu

SEM analizlerinde görüldüğü üzere hem NPC hem de MPC katkılı killi zemin numunelerinde zaman içerisinde etrenjit oluşumları göze çarpmaktadır. Ayrıca topaklaşma ve agregalaşmanın MPC katkılı killi zemin numunelerinde NPC'li olanlara kıyasla daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bunun da MPC'nin spesifik yüzey alanının daha büyük olması ve dolayısıyla daha fazla kimyasal reaksiyonlara yol açması olarak yorumlanabilir. Ayrıca iri tane konsantrasyonu arttığı için makro boşluk hacmi artar, mikro boşluk hacmi ise çimentolaşma ürünü (etrenjit) ile dolar ve azalır. İlerleyen zamanda ise, makro boşluklar çimentolaşma ürünü ile dolmaya devam eder ve makro boşluk hacmi azalırken, makro boşluklar mikro boşluklara dönüşür ve mikro boşluk hacmi artış gösterir. Genel olarak bakıldığında, toplam boşluk hacminde azalma meydana geldiği gözlemlenebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylerde kullanılan yüksek plastisiteli killi zemin numunesinin %104 olan likit limit değerinde, NPC ve MPC katkılarıyla belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. NPC ile hazırlanan numunelerin likit limit değerleri, kür süresi 28 güne ulaştığında %57'ye kadar azalmıştır. Aynı oranda ince daneli çimento ile hazırlanan numunelerin likit limit değerleri kür süresi 28 güne ulaştığında %56'ya kadar azalmıştır. NPC ile hazırlanan numunelere ait plastik limit değerleri %45 olarak belirlenmiş olup, MPC ile hazırlanan numuneler için bu değer %49 olarak tespit edilmiştir.

NPC ve MPC katkı maddeleri ile stabilize edilen killi zemin numunelerinin dayanıklılığının tespiti amacı ile yapılan ıslanma-kuruma deneyleri incelendiğinde; açık havada kürlenmiş olan numunelerde kurumaya bağlı çatlaklar oluşmuş ve bu çatlaklar suyun eklenmesi ile numunelerin dağılmasına sebep olmuştur. Nemli ortamda kürlenmiş çimentolu karışım numunelerinde ise suyun etkisi ile numune kayıpları gözlemlenmiş bu kayıpların sürekli devam etmesi ile numunelerin 5 saatten kısa bir süre içerisinde dağılmasına neden olmuştur.

Proctor sıklığında hazırlanan killi zemin numunesinin serbest şişme yüzdesi %9.75 olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında %8, %10 ve %12 NPC katkılı killi zemin numunelerinin serbest şişme yüzdesi %0,35, %0,25 ve %0,15 olarak tespit edilmiştir. %8, %10 ve %12 MPC katkılı killi zemin numunelerinin serbest şişme yüzdesi ise %0,30, %0,15 ve %0,10 olarak tespit edilmiştir. Su içeriğindeki artışa bağlı olarak meydana gelen hacimsel artış çimento stabilizasyonu ile önemli ölçüde azaltılmıştır. Ayrıca, MPC ile hazırlanan killi zemin numunelerinin şişme potansiyelleri, NPC ile hazırlanan killi zemin numunelerinden daha az olduğu tespit edilmiştir.

Katkısız killi zemin numunesinin hacimsel sıkışma yüzdesi %21.7 olarak tespit edilmiştir. %8, %10 ve %12 NPC katkısı ile killi zemin numunelerinin hacimsel sıkışma yüzdesi %2.7, %2,5 ve %2.1'e azalırken, bu değer MPC katkılı killi zemin numuneleri için %2.2, %1,8 ve %1.6 olarak bulunmuştur.

Deneyleerde kullanılan killi zemin numunesinin $7,3E-8$ olan permeabilite değeri, %8, %10 ve %12 NPC katkı ile $1,1E-08$, $2,1E-09$ ve $7,2E-10$ cm/s değerlerine düşürülmüşken, %8, %10 ve %12 MPC katkı ile $9,9E-09$, $1,8E-09$ ve $1,6E-10$ cm/s değerlerine düşürülmüştür. MPC ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerinin geçirgenliğinin, NPC ile stabilize edilmiş killi zemin numunelerine kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir.

NPC ve MPC katkılı killi zemin numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinde kür süresi ve çimento oranının artmasıyla serbest basınç dayanımının arttığı, açık havada kürlenmiş numunelerinin dayanımlarının nemli ortamda kürlenmiş numunelerinin dayanımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Optimum su içeriğinde sıkıştırılan doğal killi zemin numunesinin serbest basınç dayanımı 0,1 MPa olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak, en yüksek serbest basınç dayanımı değeri, %12 MPC katkılı ve 112 günlük kür süreli numunede 1,73 MPa olarak tespit edilmiş iken, aynı oran ve kür süresinde NPC katkı ile hazırlanan killi zemin numunesinde 1,70 MPa olarak tespit edilmiştir.

İnce daneli çimento ve standart Portland çimentosu ile hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanımları arasındaki fark nemli ortamda kür uygulandığında daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Nemli ortamda en yüksek serbest basınç dayanımı değeri %12 MPC katkılı ve 112 günlük kür süreli numunede 1,41 MPa olarak tespit edilmiş olup, aynı oran ve kür süresinde NPC katkı killi zemin numunesinde 0,89 MPa olarak tespit edilmiştir.

İnce taneli Rheocem 650 çimentosunun, standart Portland çimentosu ile aynı kimyasal kompozisyona sahip olmasına rağmen yüksek plastisiteli killi zemini iyileştirmede spesifik yüzey alanının daha büyük olması nedeni ile daha etkin olduğu bu deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir.

Öneri

Her geçen gün teknolojinin ilerlemesi ve yeni ürünlerin piyasa çıkması ile birlikte Rheocem 650'den daha ince olan dane boyutuna sahip olan çimentolar ile çalışılmalıdır. Bu etkinin daha detaylı incelemesi için düşük plastisiteli killi zeminlerle de yeni çalışmalar yapılmalı ve kohezyonlu zeminlerin mühendislik özelliklerine olan iyileştirme etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Nelson, J.D. and Miller, R.D. (1992). *Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering* (First edition). New York: John Wiley and Sons. Inc. 259.
2. Gourly, C.S., Newill, D., and Schreiner H.D. (1993). Expansive soils: TRL's research strategy. *Proceedings of the First International Symposium On Engineering Characteristics of Arid Soils*, London.
3. Bhattacharja, S. and Bhatta, J. (2003). Comparative performance of portland cement and lime instabilization of moderate to high plasticity clay soils. *Portland Cement Association.*, RD125, Skokie, Illinois. 26.
4. Bhattacharja, S., Bhatta, J.I., and Todres, H.A., (2003). Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime. A Critical Review of Literature. *Portland Cement Association.*, RD2066, Skokie, Illinois. 60.
5. Bell, F.G., (1976). Influence of the mineral content of clays on their stabilization by cement. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 13(4), 267-278.
6. Bell, F.G., (1994). Assessment of cement-PFA and lime-PFA used to stabilize clay-size materials. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. 49, 25-32.
7. Petry, T.M., Kelly, S., (1988). Effects of pulverization on the strength and durability of highly active clay soils stabilized with lime and portland cement. *Transportation Research Record*. 1190, 38-45.
8. Lasisi, F., Ogunjide, A.M., (1984). Effect of grain size on the strength characteristics of cement-stabilized lateritic soils. *Building and Environment*. 19(1), 49-54.
9. Prusinski, J.R., Bhattacharja, S., (1999). Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1652(1), 215-227.
10. Mohammad, L.N., Raghavandra, A., Huang, B., (2000). Laboratory performance evaluation of cement-stabilized soil base mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1721(1), 19-28.
11. Druss, D.L., 2003. Guidelines for design and installation of soil-cement stabilization. *Geotechnical Special Publications*. 120. 527-539.
12. Holtz, R.D., Kovacs, W.D., and Sheahan, T.C., (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering* (Second edition). New Jersey: Pearson Education Inc. 77-109.
13. Winterkorn, H.F., (1995). The science of soil stabilization. *Highway Research Board Bulletin*. 108, 1-24
14. Uzuner, B.A. (2014). *Temel Zemin Mekaniği* (Dokuzuncu Baskı). Türkiye: Derya Kitabevi, 200-400.

15. Middleton, G.F., (1953). *Build your house of earth: a manual of pise and adobe construction* (First edition). London: Angus and Robertson, 111.
16. Narasihma, A. V, Penchalaiah, B., Chittranjan, M., and Ramesh, P. (2014). Compressibility behaviour of black cotton soil admixed with lime and rice-husk ash, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 3(4), 11473–11480.
17. Nicholson, P.G., (2015). *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (First edition). Boston: Butterworth-Heinemann, 19-60
18. Clough, G.W., Sitar, N., Bachus, R.C., and Rad, N.S. (1981). Cemented sands under static loading. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*. 107(6), 799-817.
19. Kamon, M., and Bergado, D.T. (1992). Ground improvement techniques. *Proceedings of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 526-546.
20. Yin, J.H., and Lai, C.K. (1998). Strength and stiffness of hong kong marine deposit mixed with cement. *Geotechnical Engineering Journal*. 29(1), 29-44.
21. Miura, N., Horpibulsuk, S., and Nagaraj, T.S. (2001). Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *Soils and Foundations*, 41(5), 33-45.
22. Horpibulsuk, S., and Miura, N. (2001). A new approach for studying behavior of cement stabilized clays. *Proceedings Of 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*. Istanbul, Turkey: 1759-1762.
23. Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj, T.S. (2003). Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with abrams' law as a basis. *Geotechnique*, 53(4), 439-444.
24. Horpibulsuk, S., Bergado, D.T., and Lorenzo, G.A. (2004a) Compressibility of cement admixed clays at high water content. *Geotechnique*. 54(2), 151-154.
25. Horpibulsuk, S., Miura, N., and Bergado, D.T. (2004b). Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 30(10), 1096-1105.
26. Horpibulsuk, S., Miura, N., and Nagaraj T.S. (2005). Clay-Water/Cement ratio identity of cement admixed soft clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 131(2), 187-192.
27. Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006). Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: laboratory and field study. *Soils and Foundations*. 46(3), 351-366.
28. Horpibulsuk, S., Rachan, R., and Suddeepong, A. (2011a). assessment of strength development in blended cement admixed bangkok clay. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1521-1531.

29. Nishida, K., Koga, Y., and Miura, N. (1996). Energy consideration of the dry jet mixing method. *Proceedings of 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*. 1, 643-648.
30. Horpibulsuk, S., Miura, N., Koga, H., and Nagaraj, T.S. (2004c). Analysis of strength development in deep mixing: a field study. *Ground Improvement Journal*. 8(2), 59-68.
31. Horpibulsuk, S., Katkan, W., Sirilerdwattana, W., and Rachan, R. (2006). Strength development in cement stabilized low plasticity and coarse grained soils: laboratory and field study. *Soils and Foundations*, 46(3), 351-366.
32. Horpibulsuk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., and Chinkulkijniwat, A. (2011b). Strength development in cement admixed bangkok clay: laboratory and field investigations. *Soils and Foundations*. 51(2), 239-251.
33. Gens, A., Nova, R. (1993). Conceptual bases for constitutive model for bonded soil and weak rocks. *Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rocks*. 485-494.
34. Kasama, K., Ochiai, H., and Yasufuku, N. (2000). On the stress-strain behaviour of lightly cemented clay based on an extended critical state concept. *Soils and Foundations*. 40(5), 37-47.
35. Horpibulsuk, S., Liu, M.D., Liyanapathirana, D.S., and Suebsuk, J. (2010a). Behavior of cemented clay simulated via the theoretical framework of the structured cam clay model. *Computers and Geotechnics*. 37, 1-9.
36. Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., and Liu, M.D. (2011). A critical state model for overconsolidated structured clays. *Computers and Geotechnics*. 38, 648-658.
37. Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior* (Third edition). New York: John Wiley and Sons, Inc. 437.
38. Bahar, R., Benazzoug, M., and Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement stabilized soil. *Cement and Concrete Composites*. 25(6). 633-641.
39. Bell, F.G. (1989). Lime stabilization of clay soils. *Engineering Geology and Environment*. 39(1), 67-74.
40. Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology and Environment*. 42, 223-237.
41. Derriche, Z., Lazzali, F. (1997). Analyse des mécanismes de stabilisation d'un sol gonflant par apport de chaux sous différentes formes. *Engineering Geology and Environment*. 79-84.
42. Mellas, M., Hamdane, A., Benmeddour, D., and Mabrouki, A. (2012). Improvement of the expansive soils by the lime for their use in road works. *Proceeding of 10th International Congress on Advance in Civil Engineering*. 1-8.

43. Tonož, M.C., Gockceoglu, C., and Ulusay, R. (2006). Stabilization of expansive Ankara clay with lime. In: A.A. Al-Rawas and M.F.A. Goosen (Eds.), *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Netherlands: Taylor and Francis – Balkema Publishers. 317–339.
44. Afès, M., Didier, G. (2000). Stabilisation des sols gonflants: cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie). *Bulletin of Engineering and Geology and Environment*. 59(1), 75–83.
45. Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., and Alcover, J.F. (2010). Behavior and mineralogy changes in lime treated expansive soil at 20 °C. *Applied Clay Science*. 50(2), 191–198.
46. Al-Rawas, A.A., Hugo, A.W., and Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*. 40, 267–281.
47. Mahamedi, A., Khemissa, M. (2013). Cement stabilization of compacted expansive clay. *Online Journal of Science and Technology*. 3(1), 33–38.
48. Nalbantoglu, Z. (2006). Lime stabilization of expansive clay. In: A.A. Al-Rawas and M.F.A. Goosen (Eds.), *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Netherlands: Taylor and Francis – Balkema Publishers. 341–348.
49. Stavridakis, E.I. (2006). Stabilization of problematic soils using cement and lime. In: A.A. Al-Rawas and M.F.A. Goosen (Eds.), *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Netherlands: Taylor and Francis – Balkema Publishers. 385–397.
50. Brooks, R.M. (2009). Soil stabilization with fly ash and rice husk ash. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. 1(3), 209–217.
51. Harichane, K., Ghrici, G., Kenai, S., and Grine, K. (2011). Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. 29, 759–769.
52. Khabbaz, H., Fatahi, B. (2011). Chemical stabilization of closed landfill sites using chemical agents. In: A. Anagnostopoulos, et al. (Eds.), *Proceeding 15th Euran. Conference of Soil Mechanic and Geotechnical Engineering*. Greece: IOS Press. 1777–1782.
53. Louafi, B., Bahar, R. (2012). Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils. *International Journal of Geoscience*. 3, 719–725.
54. Mohamedzein, Y.E.A., Al-Rawas, A.A., 2011. Cement-stabilization of sabkha soils from AlAuzayba, Sultanate of Oman. *Geotechnical and Geological Engineering*. 29, 999–1008.
55. Muntohar, A.S. (2006a). Swelling characteristics and improvement of expansive soil with rice husk ash. In: A.A. Al-Rawas and M.F.A. Goosen (Eds.), *Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment*. Netherlands: Taylor and Francis – Balkema Publishers. 435–451.

56. Ramadas, T.L., Darga Kumar, N., and Yesuratnam, G. (2011). Study of swelling and strength characteristics of expansive soil treated with stone dust and fly ash. In: A. Anagnostopoulos, et al. (Eds.), *Proceeding 15th European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Greece: IOS Press. 659–664.
57. Sharma, N.K., Swain, S.K., and Sahoo, U.C. (2012). Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 30, 1197–1205.
58. Hogentogler, C.A. (1937). *Engineering Properties of Soil* (First edition). New York: McGraw – Hill. 434.
59. Slate, F.O., and Johnson, A.W. (1958). Stabilization of soil with calcium chloride. *Highway Research Board*. 24-96.
60. Sheeler, J.B. (1961). Sodium chloride stabilized roads in Iowa. *Bulletin of Highway Research Board*. 282, 59-65.
61. Slate, F.O. (1961). Preliminary findings and future programming of basic research project involving calcium chloride with pure clays. *Bulletin of Highway Research Board*. 282, 98-103.
62. Salt Institute. (1967). *Salt for Road Stabilization*. Chicago: Salt Institute, 24.
63. Yamanouchi, T. (1975). Problems in the development of soil stabilization. *Shire and Municipal Record*. 68(7), 363-374
64. Habercom, G.E.H. (1976). Soil stabilization (abibliography with abstracts). *National Technical Information Service Biblio*. 221.
65. TUNÇ, A. (2007). *Yol Mazemeleri ve Uygulamaları* (İkinci baskı). Ankara: Nobel Yapım Dağıtım. 840.
66. Federal Highway Administration. (1992a). *Soil and Base Stabilization and Associate Drainage Considerations: Volume I, Pavement Design and Construction Considerations*. Washington: Federal Highway Administration (FHWA-SA-93-004). 160.
67. Federal Highway Administration. (1992b). *Soil and Base Stabilization and Associate Drainage Considerations: Volume II, Mixture Design Considerations*. Washington: Federal Highway Administration (FHWA-SA-93-005). 208.
68. Joint Departments of the Army and Air Force. (1994). *Soil Stabilization for Pavements*. Washington: Joint Departmens of the Army and Air Force. 57.
69. Catton, M.D, (1940). Advances in the uses of concrete in Transportation. *Syposium on the New Materials in Transportation*. 52-57.
70. İnternet: Washington State Department of Transportation, Web: <http://www.wsdot.wa.gov> adresinden 19 Eylül 2016'da alınmıştır.

71. Avcı, E. (2015). *Spinor A6 Süspansiyon Enjeksiyonunun, Solüsyon Türü Kimyasal Enjeksiyonlara Alternatifliğinin Araştırılması*. Yayınlanmış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
72. Mollamahmutoğlu, M., and Yılmaz, Y. (2011). Engineering properties of medium to fine sands injected with microfine cement grout. *Marine Georesources and Geotechnology*, 29(2), 95-109.
73. Perret, S., Palardy, D., and Ballivy G. (2000). rheological behaviour and setting time of microfine cement based grouts. *ACI Materials Journal*. 97(4), 472-477.
74. Kutzner, C. (1996). *Grouting of Rock and Soil*. Amsterdam/The Netherland: A.A. Balkema, 190-195.
75. Karol, R.H. (2003). *Chemical Grouting and Soil Stabilization*. New Jersey/USA: Marcel Dekker Inc, 130-150.
76. ASTM D854-14 (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-8.
77. ASTM D422-63 (2007). *Standard Test Methods for Particle Size Analysis of Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-8.
78. ASTM D4318-10e1 (2010). *Standart Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-16.
79. ASTM D2974-14 (2014). *Standart Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-4.
80. ASTM D698-12e2 (2012). *Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standad Effort*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-13.
81. ASTM D4546-14 (2014). *Standart Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-10.
82. ASTM D2435-11 (2011). *Standart Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-15.
83. ASTM D5084-10 (2010). *Standart Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-24.
84. ASTM D2166/D2166M-13 (2013). *Standart Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-6.
85. ASTM D2850-03a (2007). *Standart Test Methods for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. Pennsylvania/USA: ASTM International, 1-6.

86. Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., and Suddeepong, A. (2010b). Analysis of Strength Development in Cement-Stabilized Silty Clay based on Microstructural Considerations. *Construction and Building Materials*. 24, 2011-2021.
87. Mitchell, J.K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (Third edition). New York: John Wiley and Sons, Inc. 592.
88. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. (2013). 12. TÇMB Uluslararası Teknik Seminer ve Sergisi. Antalya : Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
89. İnternet: AKÇANSA, Web: http://www.akcansa.com.tr/docs/20120216160047_teknik-notlar-3.pdf adresinden 19 Eylül 2016'da alınmıştır.
90. Victor, R. Too, J.K. and Kaluli, J.W. (2014). Cement effects on the physical properties of expansive clay soil and the compressive strength of compressed interlocking clay blocks. *European International Journal of Science and Technology*. 3(8), 74-82.
91. Gharib, M. Saba, H. and Barazesh, A. (2012). An experimental study for identification and comparison of plastic index and shrinkage properties of clay soils with the addition of cement. *European Journal of Experimental Biology*. 1(4): 1034-1038.
92. Estabragha, A.R., Pereshkaftib, M.R.S., Parsaeic B., and Javadi, A.A. (2013). Stabilised expansive soil behaviour during wetting and drying. *International Journal of Pavement Engineering*. 14(4), 418-427.
93. Abdelkrim, M., Mohamed, K. (2013). Cement stabilization of compacted expansive clay. *The Online Journal of Science and Technology*. 3(1), 33-38.
94. Kenai, S., Bahar, R., and Benazzoug, M. (2006). Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil. *Journal of Material Science*. 6956-6964.
95. Federal Highway Administration. (2006). *Geotechnical Aspects of Pavement Reference Manual*. Washington: Federal Highway Administration (FHWA-NHI-05-037). 888.
96. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M., and Ouhadi, M.H. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. *Applied Clay Science*. 95, 111-118.
97. İnternet: Kuark Bilim Topluluğu, Web: <http://www.kuark.org> adresinden 19 Eylül 2016'da alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDEM, Altan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 23.03.1986, Konya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (532) 408 81 85
 e-mail : altanerdem@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2011
Lise	Ankara Süleyman Demirel Anadolu Lisesi	2004

İş Deneyimi

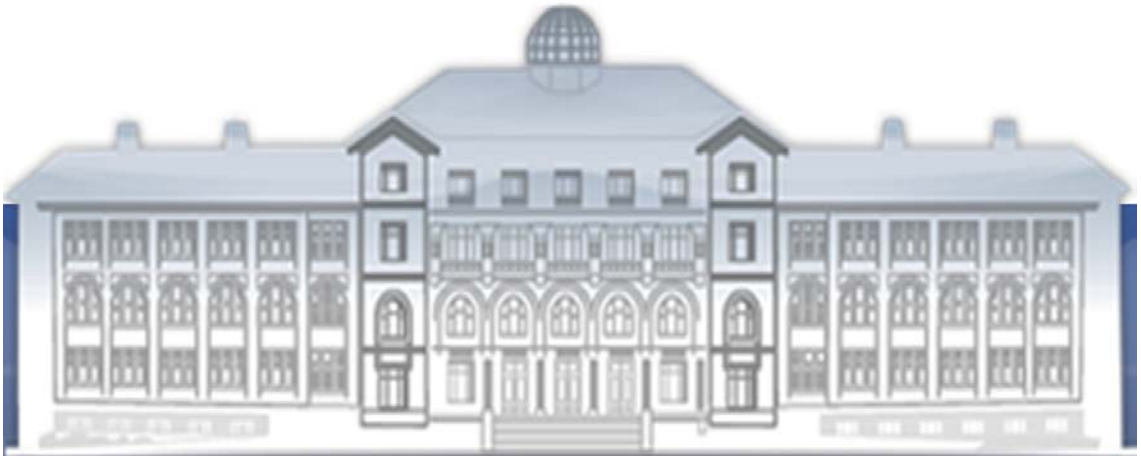
Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Yapı Merkezi İnşaat ve Sanayi A.Ş.	Uzman Geoteknik Tasarım Mühendisi
2016-2017	Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş.	Uzman Geoteknik Mühendisi
2014-2016	Prokon Müh. ve Müş. A.Ş.	Geoteknik Tasarım Mühendisi
2011-2014	Es Proje Müh. ve Müş. Ltd. Şti	Yapı Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Mollamahmutoğlu, M., Avcı, E., ve Erdem, A. (2017). *Volume Change Control CH-Clay by the Stabilization of Fine-Grained Cement*. International Conference on Geotechnical Research and Engineering (ICGRE'17), Barcelona, Spain.



GAZİ GELECEKTİR..