
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
1911

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ZEMİNLERİN MUKAVEMET PARAMETRELERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

GÖKÇE NAZLI KALBAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOTEKNİK PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET ŞÜKRÜ ÖZÇOBAN

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİLLİ ZEMİNLERİN MUKAVEMET PARAMETRELERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Gökçe Nazlı KALBAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 08.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Recep İYİSAN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Suat AKBULUT

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında; düşük plastisiteli, şişme özelliği gösteren zeminlerin, farklı sıkıştırma enerjileri etkisine bağlı olarak mukavemet davranışlarını incelediğimiz deneysel çalışmalar sunulmuştur.

Bu süreçte deneysel çalışmalarda hertürlü bilgi ve yardımı için tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi her daim yanımda olan ve olacağını bildiğim başta annem Bahar KALBAZ'a ve babam Ömer KALBAZ'a, deneysel çalışmalarımın büyük bir kısmında emeği geçen Mehmet GÜCENMEZ'e ve bu süreçte her daim yanımda olan Gözde GERÇEK'e teşekkürleri sunarım.

Nisan, 2019

Gökçe Nazlı KALBAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
ÇİZELGE LİSTESİ xv
ÖZET xvii
ABSTRACT xix
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 21
1.3 Hipotez 21
BÖLÜM 2 22
KOMPAKSİYON VE KAYMA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİ 22
2.1 Kompaksiyon 22
2.2 Kayma Mukavemeti Parametreleri 35
2.2.1 Sıkıştırılmış Killerin Mukavemeti 37
2.3 Kayma Mukavemetinin Deneysel Yöntemler İle Belirlenmesi 39
2.3.1 Kesme Kutusu Deneyi 40
2.3.2 Serbest Basınç Deneyi 41
2.3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi 43
BÖLÜM 3 46
ZEMİN PARAMETRELERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR 46
3.1 Zemin Numunelerinin Endeks Özellikleri 47
3.1.1 Hidrometre Analizi 47
3.1.2 Özgül Ağırlık Deneyi 48
3.1.3 Atterberg (Kıvam) Limitleri Deneyi 48
3.1.3.1 Likit Limit Tayini 48
3.1.3.2 Plastik Limit Tayini 49
3.2 Deney Numuneleri Üzerinde Gerçekleştirilen Kompaksiyon İşlemi 50

3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması 52
3.3.1 Kayma Mukavemeti Parametreleri 53
3.3.1.1 Serbest Basınç Deneyi Parametreleri 53
3.3.1.2 Üç Eksenli Basınç Deney Parametreleri 57
3.3.1.2.1 EP Deney Numunesine Ait Üç Eksenli Deney Sonuçları 57
3.3.1.2.2 ES-7 Deney Numunesine Ait Üç Eksenli Deney Sonuçları 60
3.3.2 Permeabilite (Geçirimlilik) Katsayısının Hesaplanması 64

BÖLÜM 4 68

DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KOHEZYONLU ZEMİNLERDE KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) TAYİNİ 68

4.1 EP, ES-7 ve EK Deney Numunelerine ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi 70
4.1.1 EP Deney Numunesi ile Gerçekleştirilen Kaliforniya T aşıma Oranı (CBR) Deneyi 70
4.1.2 ES-7 Deney Numunesi ile Gerçekleştirilen Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi 72
4.1.3 EK Deney Numunesi ile Gerçekleştirilen Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi 75
4.2 EP, ES-7 ve EK Deney Numunesine Eklenen Kum Malzemesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Olan Etkisi 77
4.2.1 Kum Malzemenin Özellikleri 77
4.2.2 EP Deney Numunesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Kullanılan Katkı Malzemesinin Etkisi 78
4.2.2.1 600 [KJ/m^3] ve 2700 [KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 1 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları 79
4.2.2.2 600 [KJ/m^3] ve [2700 KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 2 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları 80
4.2.3 ES-7 Deney Numunesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Kullanılan Katkı Malzemesinin Etkisi 81
4.2.3.1 600 [KJ/m^3] ve 2700 [KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 1 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları 81
4.2.3.2 600 [KJ/m^3] ve 2700 [KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 2 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları 83
4.2.4 EK Deney Numunesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Kullanılan Katkı Malzemesinin Etkisi 84
4.2.4.1 600 [KJ/m^3] ve [2700 KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 1 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları 84
4.2.4.2 600 [KJ/m^3] ve [2700 KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 2 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları 86
4.3 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyinde Kum Malzemenin Zeminlerin Şişme Oranlarına Olan Etkisi 87
4.4 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyinde Kum Malzemenin Zeminlerin CBR Oranlarına Olan Etkisi 90

BÖLÜM 5 94
SONUÇ VE ÖNERİLER 94
KAYNAKLAR 97
EK-A 101
ESANPLAST (EP), ESBKA-7 (ES-7) VE ESBAKAS (EK) DENEY NUMUNELERİNE AİT MİNERALOJİK ÖZELLİKLER 101
A-1 Esanplast (EP) Deney Numunesine Ait Özellikler 101
A-2 Esbka-7 (ES-7) Deney Numunesine Ait Özellikler 102
A-3 Esbakas (EK) Deney Numunesine Ait Özellikler 102
EK-B 103
ESANPLAST (EP) DENEY NUMUNESİNE AİT KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) DENEYİ SONUCU ELDE EDİLEN VERİLER 103
B-1 600 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EP Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri 103
B-2 2700 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EP Deney Numunesine Ait. 105
Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri 105
B-3 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak EP Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları 107
B-4 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak Kum Katkılı EP Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları 109
EK-C 113
ESBKA-7 (ES-7) DENEY NUMUNESİNE AİT KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) DENEYİ SONUCU ELDE EDİLEN VERİLER 113
C-1 600 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EP Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri 113
C-2 2700 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan ES-7 Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri 115
C-3 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak ES-7 Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları 118
C-4 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak Kum Katkılı ES-7 Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları 119
EK-D 121
EK DENEY NUMUNESİNE AİT KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) DENEYİ SONUCU ELDE EDİLEN VERİLER 121
D-1 600 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EK Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri 121
D-2 2700 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EK Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri 123
D-3 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak EK Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları 124

D-4 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak Kum Katkılı ES-7 Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları 125

EK-E 128

EP, ES-7 VE EK DENEY NUMUNELERİNE AİT FİZİKSEL ÖZELLİKLER 128

E-1 EP Deney Numunesine Ait Fiziksel Özellikler 128
E-2 ES-7 Deney Numunesine Ait Fiziksel Özellikler 130
E-3 EK Deney Numunesine Ait Fiziksel Özellikler 132

SİMGE LİSTESİ

c	Kohezyon
C_u	Drenajsız Kayma Mukavemeti
D_r	Relatif Sıkılık
E	Kompaksiyon Enerjisi
G_s	Özgül Ağırlık
I_P	Plastisite İndisi
k	Hidrolik İletkenlik Katsayısı
M_t	Sıkıştırılmış Zemin Ağırlığı
q_u	Serbest Basınç Mukavemeti
r	Korelasyon Katsayısı
V_t	Kompaksiyon Kalıbı Hacmi
ω_n	Doğal Su Muhtevası
$\omega_{optimum}$	Optimum Su Muhtevası
$\omega_{optimum}$+3	Optimum Su Muhtevasının Islak Tarafı
$\omega_{optimum}$-3	Optimum Su Muhtevasının Kuru Tarafı
W_L	Likit Limit
W_P	Plastik Limit
ρ	Yaş Yoğunluk
ρ_k	Kuru Yoğunluk
ρ_S	Dane Yoğunluğu
γ_k	Kuru Birim Hacim Ağırlık
o	Normal Gerilme
σ_0	Ön Konsolidasyon Basıncı
τ	Kayma Gerilmesi
ΔL	Şekil Değişimi
Ø	İçsel Sürtünme Açısı
Φ_{cal}	Kolon Çapı

KISALTMA LİSTESİ

CBR	Kalifoniya Taşıma Oranı
CH	Yüksek Plastisiteli Kil
CL	Düşük Plastisiteli Kil
COLE	Lineer Genişleyebilirlik Katsayısı
PVC	Potansiyel Hacim Değiştirme Deneyi
USCS	Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
UU	Konsolidasyonsuz ve Drenajsız Üç Eksenli Deneyi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Kil ve silt miktarının hacim değişimi üzerine etkisi [6] 5
Şekil 1.2 Kum ve kil miktarının hacim değişimi üzerine etkisi [6] 5
Şekil 1.3 Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve kompaksiyon enerjisi ile ilişkisi [9] 7
Şekil 1.4 Kompaksiyon enerjisinin şişme üzerine etkisi [9] 7
Şekil 1.5 CBR değerleri ve γd arasındaki ilişki 9
Şekil 1.6 Kompaksiyon enerjisi ve CBR değerleri arasındaki ilişki 9
Şekil 1.7 Saf kaolin konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney grafiği [15] 11
Şekil 1.8 %80 kaolin ve %20 illit içeren zemin için deviatorik gerilmeye karşılık birim uzama miktarı eğrisi [15] 12
Şekil 1.9 %20 kaolin, %40 illit ve %40 montmorillonit içeren zemin için deviatorik gerilmeye karşılık birim uzama miktarı eğrisi [15] 13
Şekil 1.10 Standart proktor ile kompakte edilen kil zeminde, CBR ve su muhtevası arasındaki ilişki [23] 14
Şekil 1.11 Modifiye proktor ile kompakte edilen kil zeminde, CBR ve su muhtevası arasındaki ilişki [23] 14
Şekil 1.12 Drenajsız kayma mukavemetindeki değişim [26] 16
Şekil 1.13 Stabilizasyonun zeminin kalifornia taşıma oranı (CBR) üzerindeki etkisi [26] 16
Şekil 1.14 Farklı kompaksiyon enerjilerinin düşük plastisiteli (CL) Wisconsin-A zeminde hidrolik iletkenliğe olan etkileri [27] 17
Şekil 1.15 Farklı kompaksiyon enerjilerinin yüksek plastisiteli Wisconsin-C zeminde hidrolik iletkenliğe olan etkileri [27] 18
Şekil 1.16 Zeminin permeabilite (relatif) katsayısına, ince daneli malzeme oranı ve su emme basıncının etkisi [34] 19
Şekil 1.17 Kum kolon yarıçapının oturma miktarındaki azalma oranına etkisi [35] 20
Şekil 2.1 Buzul zeminden elde edilmiş standart ve modifiye Proktor Eğrileri [1] 26
Şekil 2.2 Sıkıştırma etkisinin zemin yapısı üzerindeki etkisi [43] 28
Şekil 2.3 Kompaksiyon yönteminin kohezyonlu zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisi [41] 29
Şekil 2.4 Farklı kompaksiyon enerjisi ve su muhtevası oranlarının kohezyonlu zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti üzerine olan etkileri [42] 30
Şekil 2.5 Kohezyonlu sıkıştırılmış killerde büzülme olayının birer fonksiyonu olan, kompaksiyon yöntemi ve su muhtevasının etkileri [42] 31
Şekil 2.6 Su muhtevası ve zemin yapısının yüksek plastisiteli bir kilin şişme potansiyeli üzerine etkisi [1] 32

Şekil 2.7 Siltli kil bir zeminde kompaksiyon su muhtevası ile hidrolik iletkenlik arasındaki ilişki (a) ve kuru birim hacim ağırlık değeri ile kompaksiyon su muhtevası arasındaki ilişki (b) [45] 35
Şekil 2.8 Mohr-Coulomb göçme zarfı [47] 36
Şekil 2.9 Konsolidasyonsuz ve drenajsız (UU) deneyleri için mohr kırılma zarfları: (a) % 100 doygun kil; (b) doygun olmayan kil [1] 38
Şekil 2.10 CBR deneyi ile ölçülen darbeli sıkıştırma yöntemi için kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası ilişkisi [1] 39
Şekil 2.11 Kesme kutusu deney cihazı [46] 40
Şekil 2.12 Kesme kutusuna ait deney sonuçları [44] 41
Şekil 2.13 Serbest basınç deneyinde silindirik zemin numunesine etkiyen yük [46] 42
Şekil 2.14 Mohr kırılma zarfı [44] 42
Şekil 2.15 Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney sistemi 44
Şekil 2.16 Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney sistemi [46] 44
Şekil 2.17 Kompaksiyon su muhtevasının kayma mukavemeti üzerine etkisi [41] 45
Şekil 3.1 Deney numunelerinin casagrande kartındaki yerleri 49
Şekil 3.2 EP deney numunesine ait standart proktor ve modifiye proktor yöntemi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki 50
Şekil 3.3 ES-7 deney numunesine ait standart proktor ve modifiye proktor yöntemi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki 51
Şekil 3.4 EK deney numunesine ait standart proktor ve modifiye proktor yöntemi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki 52
Şekil 3.5 Standart proktor yöntemi ile sıkıştırılan EP zemin numunesinin tek eksenli yükleme durumuna ait gerilme şekil değiştirme davranışı 54
Şekil 3.6 Standart proktor yöntemi ile sıkıştırılan ES-7 zemin numunesinin tek eksenli yükleme durumuna ait gerilme şekil değiştirme davranışı 54
Şekil 3.7 Modifiye proktor yöntemi ile sıkıştıran EP zemin numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışı 55
Şekil 3.8 Modifiye proktor yöntemi ile sıkıştırılan ES-7 zemin numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışı 56
Şekil 3.9 Zeminlerin kompaksiyon enerjisindeki değişime göre su muhtevası (Wn) ve drenajsız kayma mukavemeti (Cu) arasındaki ilişki 57
Şekil 3.10 EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$ ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri 58
Şekil 3.11 EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$-3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri 59
Şekil 3.12 EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$+3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri 60
Şekil 3.13 ES-7 deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası woptimum ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri 61
Şekil 3.14 ES-7deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$-3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkisi 62

Şekil 3.15 ES-7deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$+3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkisi 62
Şekil 3.16 Kompaksiyon enerjisi ve su muhtevasının kayma mukavemeti açısı (Ø) değerlerine olan etkileri 63
Şekil 3.17 Kompaksiyon enerjisi ve su muhtevasının kohezyon (c) değerlerine olan etkileri 64
Şekil 3.18 Sabit seviyeli permeabilite sistemi 66
Şekil 3.19 EP deney numunesine ait; farklı su muhtevalarında hidrolik geçirgenlik değerleri 67
Şekil 4.1 Standart basınç ve penetrasyon ilişkisi [52] 69
Şekil 4.2 600 [KJ/m3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları 70
Şekil 4.3 2700 [KJ/m3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları 71
Şekil 4.4 EP deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m3'den 2700 KJ/m3'e yükselmesi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki 71
Şekil 4.5 EP deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m3'den 2700 KJ/m3'e yükselmesi ile CBR (%) değerleri arasındaki ilişki 72
Şekil 4.6 600 [KJ/m3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları 72
Şekil 4.7 2700 [KJ/m3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları 73
Şekil 4.8 ES-7 deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m3'den 2700 KJ/m3'e yükselmesi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki 73
Şekil 4.9 ES-7 deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m3'den 2700 KJ/m3'e yükselmesi ile CBR (%) değerleri arasındaki ilişki 74
Şekil 4.10 600 [KJ/m3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları 75
Şekil 4.11 2700 [KJ/m3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları 75
Şekil 4.12 EK deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m3'den 2700 KJ/m3'e yükselmesi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki 76
Şekil 4.13 EK deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m3'den 2700 KJ/m3'e yükselmesi ile CBR (%) değerleri arasındaki ilişki 76
Şekil 4.14 Kullanılan kum malzemesinin dane çapı dağılım eğrisi 77
Şekil 4.15 Dış çapı 2 cm olan çelik boru ile sıkıştırılmış EP deney numunesinin merkez noktasında oluşturulan boşluk ve kum ile doldurulmuş hali 78
Şekil 4.16 600 KJ/m3 sıkıştırma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 79
Şekil 4.17 2700 KJ/m3 sıkıştırma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 79
Şekil 4.18 600 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 80

Şekil 4.19 2700 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 81
Şekil 4.20 600 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 82
Şekil 4.21 2700 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 82
Şekil 4.22 600 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 83
Şekil 4.23 2700 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 84
Şekil 4.24 600 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 84
Şekil 4.25 2700 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 85
Şekil 4.26 600 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 86
Şekil 4.27 2700 KJ/m3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları 86
Şekil 4.28 600 KJ/m3 ve 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EP deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde şişme oranlarındaki değişim 87
Şekil 4.29 600 KJ/m3 ve 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış ES-7 deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde şişme oranlarındaki değişim 88
Şekil 4.30 600 KJ/m3 ve 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EK deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde şişme oranlarındaki değişim 89
Şekil 4.31 600 KJ/m3 ve 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EP deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde CBR oranlarındaki değişim 91
Şekil 4.32 600 KJ/m3 ve 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış ES-7 deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde CBR oranlarındaki değişim 92
Şekil 4.33 600 KJ/m3 ve 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EK deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde CBR oranlarındaki değişim 93

Şekil B.1 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 102
Şekil B.2 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 103
Şekil B.3 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 103
Şekil B.4 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 104
Şekil B.5 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 104
Şekil B.6 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 105
Şekil C.1 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 112
Şekil C.2 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 113
Şekil C.3 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 113
Şekil C.4 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 114
Şekil C.5 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 115
Şekil C.6 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 116
Şekil D.1 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 120
Şekil D.2 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 121
Şekil D.3 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 121
Şekil D.4 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 122
Şekil D.5 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 122
Şekil D.6 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması 123
Şekil E.1 EP deney numunesine ait dane çağı dağılım eğrisi 127
Şekil E.2 EP deney numunesine ait likit limit (W_L) grafiği 128
Şekil E.3 ES-7 deney numunesine ait dane çağı dağılım eğrisi 129
Şekil E.4 ES-7 deney numunesine ait likit limit (W_L) grafiği 130
Şekil E.5 EK deney numunesine ait dane çağı dağılım eğrisi 131
Şekil E.6 EK deney numunesine ait likit limit (W_L) grafiği 132

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Temel kil minerallerinin tipik boyutları, özgül yüzeyleri ve katyon değişim kapasiteleri [1] 1
Çizelge 1.2 Rötre limit ve lineer rötreye bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi [3] 3
Çizelge 1.3 Farklı kil minerallerine ait aktivite katsayıları [1] 4
Çizelge 2.1 Standart proktor ve modifiye proktor deneyine ait özellikler [1] 25
Çizelge 2.2 Optimum su muhtevasının ıslak ve kuru tarafında kompakte edilen zeminlerin özelliklerinin karşılaştırılması [41] 33
Çizelge 2.2 Optimum su muhtevasının ıslak ve kuru tarafında kompakte edilen zeminlerin özelliklerinin karşılaştırılması [41] (devamı) 34
Çizelge 3.2 Değişik zemin tipleri için permeabilite katsayısının aldığı değerler [41] 65
Çizelge A.1 EP deney numunesinin kimyasal bileşenleri 100
Çizelge A.2 ES-7 deney numunesinin kimyasal bileşenleri 101
Çizelge A.3 EK deney numunesinin kimyasal bileşenleri 101
Çizelge B.1 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 106
Çizelge B.2 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 107
Çizelge B.3 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 108
Çizelge B.4 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 109
Çizelge B.5 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 110
Çizelge B.6 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 111
Çizelge C.1 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 117
Çizelge C.2 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 117
Çizelge C.3 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 118

Çizelge C.4 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 118
Çizelge C.5 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 119
Çizelge C.6 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 119
Çizelge D.1 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 123
Çizelge D.2 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 124
Çizelge D.3 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 124
Çizelge D.4 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 125
Çizelge D.5 600 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 125
Çizelge D.6 2700 KJ/m3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları 126
Çizelge E.1 EP deney numunesine ait plastik limit (W_p) deneyi sonuçları 127
Çizelge E.2 EP deney numunesine ait özgül ağırlık (G_s) deneyi sonuçları 128
Çizelge E.3 ES-7 deney numunesine ait özgül ağırlık (G_s) deneyi sonuçları 129
Çizelge E.4 ES-7 deney numunesine ait plastik limit (W_p) deneyi sonuçları 130
Çizelge E.5 EK deney numunesine ait özgül ağırlık (Gs) deneyi sonuçları 131
Çizelge E.6 EK deney numunesine ait plastik limit (W_p) deneyi sonuçları 132

ÖZET

KİLLİ ZEMİNLERİN MUKAVEMET PARAMETRELERİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

Gökçe Nazlı KALBAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

Bu tez çalışması kapsamında; zeminin sahip olduğu drenajsız kayma mukavemeti parametrelerine ve CBR değerlerine; farklı kompaksiyon enerjilerinin etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; Eczacıbaşı Esan aracılığı ile temin edilen, Bilecik yöresine ait; ES-7, EP ve Balıkesir Sındırgı ilçesine ait EK deney numuneleri kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında; Atterberg (kıvam) limitleri, dane boyu dağılımı ve özgül ağırlık (G_s) parametreleri belirlenmiştir. Fiziksel özellikler tanımlandıktan sonra; modifiye ve standart kompaksiyon enerjileri ile sıkıştırılan zeminlerin sahip olduğu; optimum su muhtevası ve buna denk gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla; serbest basınç deneyi ve konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli deney (UU) yöntemleri ile drenajsız kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Son aşamada ise zeminler; yaklaşık olarak 96 saat suda bekletilmiştir ve penetrayon değerleri belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra ise; zeminlerin merkez noktalarından 1 cm ve 2 cm çaplı borular ile boşluklar açılarak; %80 relatif sıkılığa sahip kum ile doldurulmuştur. Bu koşullar altında killi zeminlerde su içeriği ve sıkıştırma enerji miktarının değişikliğine bağlı olarak; şişme miktarları ve su içeriklerinin zemin mukavemetine olan etkileri araştırılmıştır. Optimum su muhtevalarında gerçekleştirilen

sabit seviyeli permeabilite deneyleri ile, zeminlerin geçirgenlikleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Laboratuvar ortamında kum dren modeli ile kum malzemenin, ince dane oranı yüksek zeminlerde, suyun iletkenliğine ve meydana getirdiği şişme oranlarına etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaliforniya taşıma oranı, kayma mukavemeti, şişen killer, kum dren.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF CLAYEY SOILS BY EXPERİMENTAL METHODS

Gökçe Nazlı KALBAZ

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN

The scope of this thesis; the effect of different compaction energies on undrained shear strength parameters and California bearing ratio (CBR) were investigated. Scope of work; ES-7, EP which supplied from Bilecik Province via the company "Eczacıbaşı Esan", and belonging to Balıkesir Sındırgı district; EK were used in this study. The first phase of the study; atterberg (consistency) limits, grain size distribution and specific gravity (Gs) parameters were determined. After physical properties are defined; optimum water content and the corresponding maximum dry unit volume weight values were determined by modified compaction and standart compaction method. In order to determine the shear strength parameters; unconfined compressive test (UCS) and undrained unconsolidated trixial test (UU) methods were used. In the final phase; soil samples were soaked for about 96 hours and then penetration values were determined. In the later phases of study; pipes 1 cm and 2 cm in diameter, push in the middle of the samples and holes were opened. Then these holes were filled with sand of relative strength of %76. Under these conditions, depending on the change in the amount of water content and compression energy in clayey soils; the effects of water content and expansive potential on soil were investigated. With the stable method permeability tests carried out in optimum water content, have been informed about the permeability of soils. In the laboratory, the effect of sand material on the fine

grains, the conductivity of the water and the swelling rates were investigated by sand columns.

Keywords: California bearing ratio, shear strength, expansive clays, sand column.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

İri daneli zeminlerin davranışında, suyun çok az etkisi vardır. Fakat ince daneli zeminler suyun varlığından önemli derecede etkilenmektedir. Bunun nedeni; kil minerallerinin boyut, özgül yüzey, aktivite ve katyon değişim kapasitesi gibi özelliklerinin tümüyle ilişkilidir. Çizelge 1.1 'de temel minarellerin bu özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.1 Temel kil minerallerinin tipik boyutları, özgül yüzeyleri ve katyon değişim kapasiteleri [1]

Kil Minerali	Tipik Kalınlık (mm)	Tipik Çap (mm)	Özgül Yüzey (km^2/kg)	Katyon Değişim Kapasitesi (meq/100g)
Montmorillonit	3	100-1000	0,7-0,84	80-150
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

Çizelge 1.1'de en yaygın olarak bilinen dört kil mineraline ait ortalama özgül yüzey ve boyutları gösterilmektedir. Kalınlığı yaklaşık 1 μm olan kaolinit mineralinin, birkaç nanometre kalınlığında olan en küçük kil minerali montmorillonite kıyasla, özgül yüzey oranı düşüktür. Kısaca; dane boyutu küçüldükçe; özgül yüzey artmaktadır. Dolayısıyla; su tutma kapasitesi ve içeriği de yükselmektedir [1].

Kil; kimyasal olarak sulu alüminyum silikatların demir, potasyum, kalsiyum, kuvars gibi metalik iyonlar içeren mineraller ile birleşmesi sonucu oluşmakta ve fillosilikat sınıfı mineral grubu şeklinde isimlendirilmiştir.

Bundan dolayı kilin sahip olduğu herbir özelliğine göre sınıflandırma yapılmalıdır. Killerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılmasında dikkate alınan özellikler aşağıda verildiği gibidir [2].

Mineralojik Özelliklerine Göre Sınıflandırma

- Kaolin Grubu
- Smektit (Montmorillonit) Grubu
- Mika Grubu
- Klorit Grubu
- İllit Grubu
- Attapulgit Grubu

Yapılarına Göre Sınıflandırma

- Amorf Grup
- Kristal Grup

Kimyasal İçeriklerine Göre Sınıflandırma

- Yüksek alüminyum içerikli
- Boksit içerikli
- Silikat içerikli
- Demir içerikli
- Kalsit içerikli
- Karbonat içerikli

Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırma

- Plastik özelliğine göre
- Dane boyutuna göre
- Refrakter özelliğine göre
- Renk özelliğine göre

Birçok şehir, ulaşım yolu ve binalar kil oranı yüksek zemin ya da kayalar üzerinde bulunmaktadır. Suya doygun olmayan kil zeminlerin, bünyelerine su alması ve buna bağlı olarak hacimlerinde meydana gelen artışların karşılanması için, ortaya çıkacak olan basınç, kilin "şişme" özelliği olarak tanımlanmaktadır. Bu neden ile killer, su içeriğindeki değişikliklerle kazandığı büzülme ve şişme kabiliyetlerinden dolayı; mühendislik yapıları için tehlike arz etmektedir. Zeminin sahip olduğu su muhtevasındaki değişimler sonucu meydana gelecek şişmeyi doğrudan gözlemlemek amacıyla kullanılan birkaç deney yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler; serbest şişme deneyi, genişleme indisi deneyi, CBR, PVC ve COLE olarak sıralanabilir. Şişen zeminleri dolaylı yollar ile tanımlamak için kıvam limitleri, aktivite, katyon değiştirme kapasitesi, emme indisi vb. zemin özelliklerini kullanarak şişme potansiyeli hakkında yorum yapmak mümkündür. Literatürde kilin sahip olduğu hacim değişimi ve şişme potansiyeline olan etkileri ile ilgili birçok araştırma mevcuttur.

Zeminin fiziksel özelliklerinden olan kıvam limit değerleri, şişme potansiyeli hakkında yorum yapmamızı sağlamaktadır. Altmeyer [3]'e göre Çizelge 1.2'de görüldüğü üzere, rötre limit ve lineer rötrenin kullanımını önermiştir.

Çizelge 1.2 Rötre limit ve lineer rötreye bağlı olarak zeminin şişme potansiyelinin değerlendirilmesi [3]

Lineer Rötre	Rötre Limiti (%)	Muhtemel Şişme (%)	Şişme Derecesi
<5	>12	<0,5	Kritik Değil
5-8	10-12	0,5-1,5	Sınır
>8	<10	>1,5	Kritik

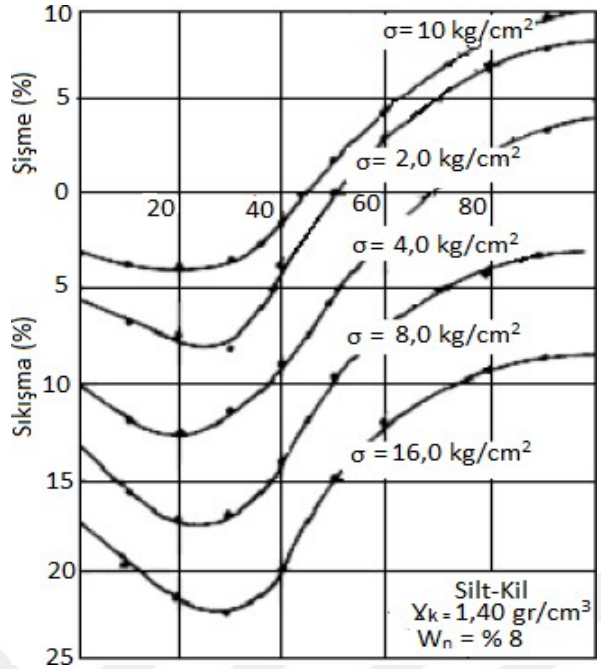
Holtz ve Gibbs [4] zeminin kil yüzdesi ve plastisite indisinin şişme potansiyeli üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Zeminin plastisite indisinin artmasıyla; sıkışma ve şişme potansiyeli gibi özelliklerinin arttığını, bununla beraber zemin geçirgenliğinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum ise kazı ve dolgu aşamalarında zorluk çıkarmaktadır.

Schafer ve Singer [5] zeminin şişme potansiyelini, büyük oranla şişen kil yüzdesi ile ilgili olduğunu belirtmiştir. Plastisite indisinin, kil yüzdesine oranı ise aktivite olarak tanımlanmaktadır ve bize kil mineral tipi hakkında bilgi vermektedir.

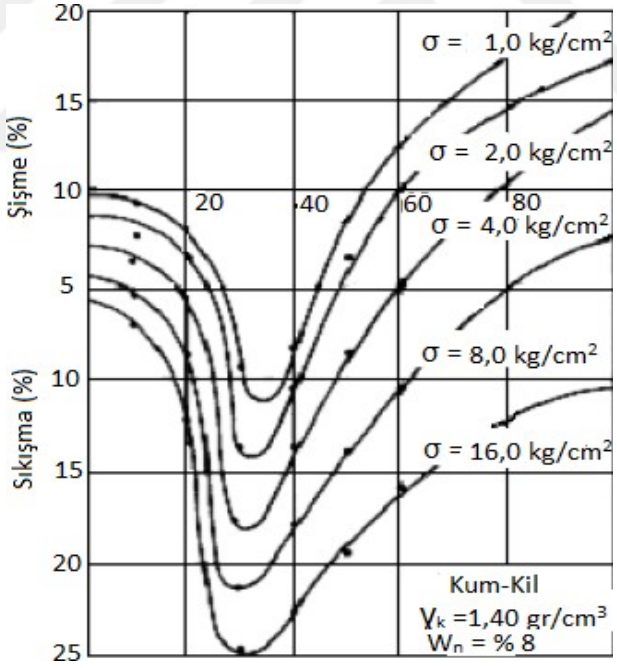
Çizelge 1.3 Farklı kil minerallerine ait aktivite katsayıları [1]

Mineral	**Aktivite**
Na-Montmorillonit	4-7
Ca-Montmorillonit	1.5
İllit	0.5-1.3
Kaolinit	0.3- 0.5
Mika (Muskovit)	0.2
Kalsit	0.2
Kuvars	0

El-Sohby ve Rabba [6] zemin şişmesini etkileyen faktörlerin başında; kil minerali tipi, kuru birim ağırlık, su muhtevası ve mevcut dane dağılım miktarının etkili olduğunu vurgulamıştır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2' de kil mineral yüzdesinin hacim değişikliği üzerine etkisi görülmektedir.



Şekil 1.1 Kil ve silt miktarının hacim değişimi üzerine etkisi [6]



Şekil 1.2 Kum ve kil miktarının hacim değişimi üzerine etkisi [6]

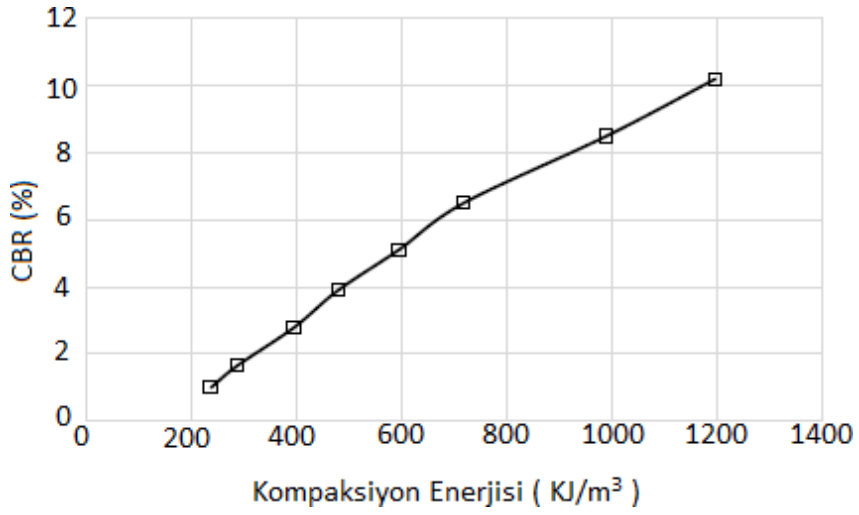
Şişme potansiyelinin yanında, farklı sıkıştırma enerjileri kullanarak zeminin drenajsız kayma mukavemeti parametreleri, su muhtevası ve diğer fiziksel özelliklerine etkisini doğrudan belirlemek amacıyla kullanılan CBR yöntemi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur.

Attom [7] kohezyonlu zeminlerde farklı kompaksiyon enerjilerinin kayma mukavemeti, permeabilite ve şişme potasiyeline olan etkilerini araştırmıştır. Artan kompaksiyon enerjisi ile; optimum su muhtevasının kuru tarafında kayma mukavemetinde artış olduğunu belirtmiştir. Bu bilgiye ek olarak optimum su muhtevasının kuru tarafında sıkıştırma enerjisinin arttırılması, geçirgenliği azaltmakta ve sıkıştırılmış zeminin şişme basıncını arttırmaktadır.

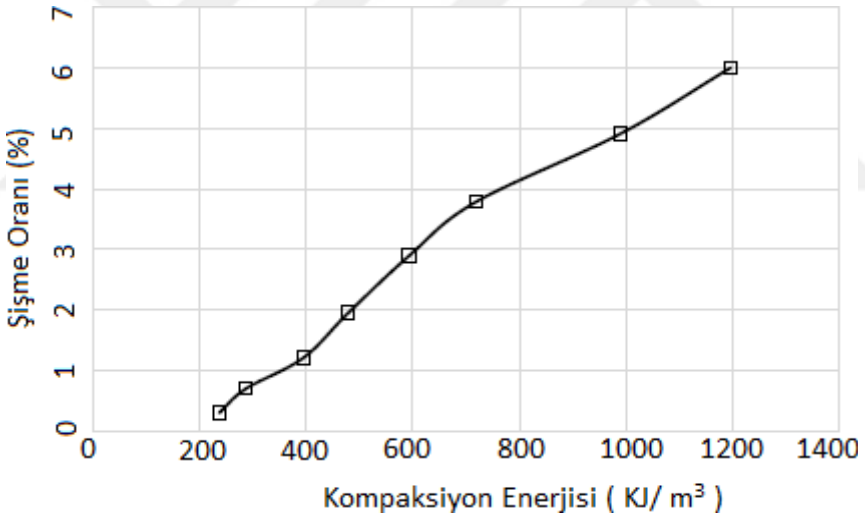
Sridharan ve Gurtug [8] ince daneli zeminlerin sıkışma davranışlarını incelemişlerdir. Zeminin sahip olduğu şişme basıncı ve şişme potansiyelinin sıkıştırma enerjisindeki değişimlerden büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Zemine uygulanan sıkıştırma enerjisindeki artış ile zeminin sahip olduğu mühendislik özelliklerini önemli derecede iyileştirdiğini fakat aynı zamanda zeminin şişme potansiyelinde de önemli bir derecede artış olduğunu da doğrulamışlardır.

Hussain [9] belirlenen sıkıştırma enerjisinin zeminin sıkışabilirliliği, tek eksenli basınç dayanımı, kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve şişme potansiyeli gibi mühendislik özelliklerine olan etkilerini araştırmıştır. Kompaksiyon enerjisi 237 KJ/m^3'den 1197 KJ/m^3 değerine yükseldiğinde, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1.61 g/cm^3'den 1.75 g/cm^3 değerine yükselmiştir. Bu artış ile beraber; optimum su muhtevasının %31.55'den %21.63'e gerilemesi; zemin partiküllerinin daha sıkı bir hale gelerek, daha yoğun bir malzeme elde edildiğini göstermektedir. Bu düşüş aynı zamanda; zemin daneleri arasındaki boşlukların azaldığını ifade etmektedir. Tek eksenli basınç dayanımı (q_u) değerleri ise; 110.8 kPa'dan 230.6 kPa değerine ulaşmıştır. Kompaksiyon enerjisinin kaliforniya taşıma oranı (CBR) ile şişme potansiyeline olan etkileri sırası ile Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'de görülmektedir. CBR değerlerindeki bu artış; kompaksiyon enerjisinin artmasıyla optimum su muhtevasının düşmesi ile zemin partikülleri arasında daha güçlü bir bağ oluşması olarak yorumlanmaktadır.

Kompaksiyon enerjisinin artması ile kaliforniya taşıma oranı (CBR)değerleri %1'den %10.2'ye kadar, şişme yüzdelerindeki artış ise; %0.3'den %6'ya kadar artış göstermiştir. Şişme yüzdelerinde meydana gelen bu artış ise; kompaksiyon enerjisinin yükselmesi ile optimum su muhtevasından kuru tarafta yer alan bölgede geçirgenliğin azalmasına işaret etmektedir.



Şekil 1.3 Kaliforniya taşıma oranı (CBR) ve kompaksiyon enerjisi ile ilişkisi [9]



Şekil 1.4 Kompaksiyon enerjisinin şişme üzerine etkisi [9]

Amarnath [10] dört farklı kompaksiyon enerjisi kullanarak zemin davranışını incelemiştir. Kullanılan iki enerji oranı standart kompaksiyon enerjisi ve modifiye kompaksiyon enerjisi oranları arasında hesaplanarak kullanılmıştır. Kaliforniya taşıma oranı, serbest basınç dayanımı ve üç eksenli basınç dayanımı testleri, belirlenen dört farklı kompaksiyon enerjisine bağlı olarak yapılmıştır. Kaliforniya taşıma oranında ve

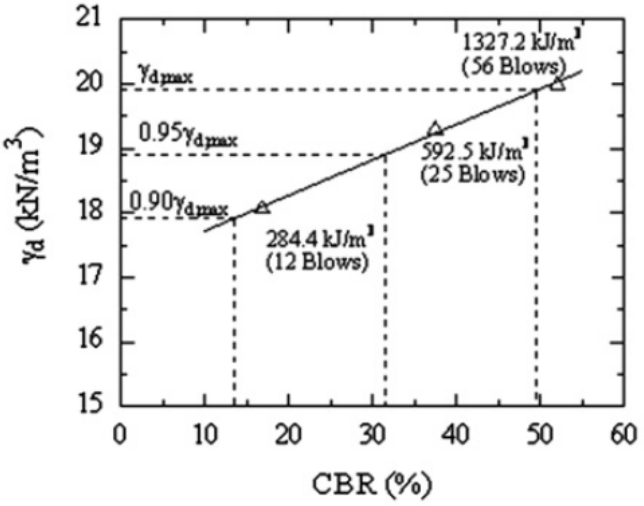
serbest basınç dayanımındaki artış, standart kompaksiyon enerjisine kıyasla, modifiye kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmış numuneler için 2.8 ve 3.3 kat artış bulunmuştur.

Ghosh [11] zemine uygulanan kompaksiyon işleminin teorisini incelemek ve kompakte edilmiş zeminin drenajsız kayma mukavemetine olan etkilerini araştırmak ve zeminin su içeriği arasında bir ilişki kurmak için laboratuvar ortamında veyn deney çalışması gerçekleştirmiştir.

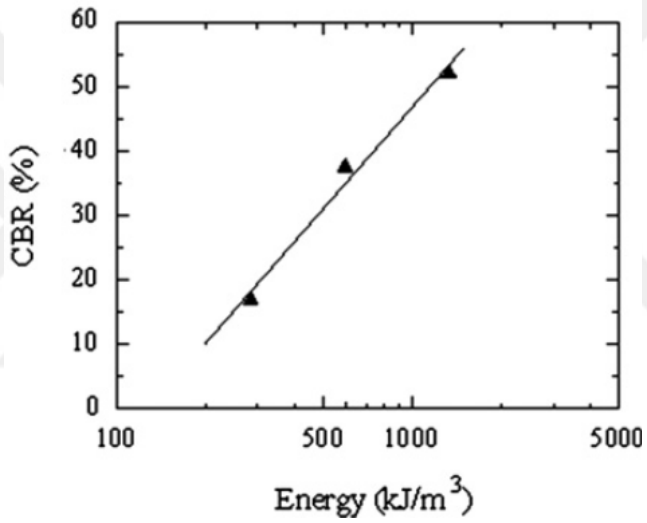
W_L değeri %84, W_p değeri ise %46 olan deney numunelerini, standart proktor yöntemi ile sıkıştırmıştır. Kompaksiyon işlemi sonucu optimum su muhtevası ($\omega_{optimum}$) %16, γ_k değeri ise %17,53 kN/m^3 olarak bulunmuştur.

Deney sonuçlarına göre; drenajsız kayma mukavemeti ve mineralojik özelliklerinin birbirleriyle yakından ilişkili olduğunu gözlemlemiştir. Zeminin su içeriğinin yükselmesi ile drenajsız kayma mukavemeti düşüşe geçmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan örselenmemiş deney numuneleri, yoğrulmuş deney numunelerine göre daha yüksek mukavemet davranışı sergilemiştir. Bunun nedeni ise örselenmemiş deney numunelerinin daneler arası bağlarının daha kuvvetli olması olarak yorumlanabilir.

Horpibulsuk vd. [12] kompaksiyon enerjisinin 592.5 KJ/m^3 ve 2693.3 KJ/m^3'lük kompaksiyon enerjileri kullanarak 68 adet ince daneli, 61 adet kırmızı kil ve 64 adet öğütülmüş/ezilmiş kaya üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. İnce daneli zemin üzerinde 592.5 KJ/m^3'lük enerji uygulanarak, diğer iki zemin tipi üzerinde ise; 2693.3 KJ/m^3'lük kompaksiyon enerjisi kullanılarak CBR deneyi gerçekleştirilmiştir. İnce daneli zeminler için 592.5 KJ/m^3 enerji ile sıkıştırılan zeminler için $\omega_{optimum}$ ve kuru birim hacim ağırlık değerleri (γ_k) sırasıyla; %11 ve %23,15 KN/m^3 ve 20 KN/m^3 aralığındadır. Kırmızı kilden oluşan zeminlerde 2693.3 KJ/m^3'lük kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırıldığında elde edilen OWC ve γ_d değerleri sırasıyla; %7 ve %12 ve 19.5 KN/ m^3 ve 21.5 KN/m^3 aralığında değişmektedir. Nükleer cihaz yöntemi ile arazi koşullarına ait kompaksiyon bilgileri elde edilerek, relatif kompaksiyon değeri % 90'dan fazla olan 3 nokta seçilerek Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da verilen kompaksiyon enerjisi ve γ_d ile CBR değerleri arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 1.16'da $\omega_{optimum}$ ve farklı kompaksiyon enerjilerine denk gelen CBR değerleri görülmektedir. Kompaksiyon enerjisinin artmasıyla CBR değerlerinde artış gözlenmektedir.



Şekil 1.5 CBR değerleri ve γ_k arasındaki ilişki



Şekil 1.6 Kompaksiyon enerjisi ve CBR değerleri arasındaki ilişki

Talukdar [13] Hindistan'ın Assam Nogan bölgesinin farklı lokasyonlarından alınan silt içeriği yüksek zeminlerin iki veya üç gün suda bekletilerek elde edilen kaliforniya taşıma oranları, plastik limit (W_P), likit limit (W_L), plastisite indisi (I_p), optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ile karşılaştırılmıştır. Zeminin plastisite indisinin (I_p) ve uygun değer su muhtevasının yükselmesiyle; elde edilen kaliforniya taşıma oranlarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu fiziksel özelliklerin herbirinin, kaliforniya taşıma oranı ile istatiksel olarak karşılaştırılması için; korelasyon katsayısı (r) belirlenmiştir. Son aşamada ise; yukarıda belirtilen zemin parametrelerini içeren, kaliforniya taşıma değerinin belirlenmesi için Microsoft Excel'in (sürüm 13,0) linex istatistiği kullanılarak çoklu doğrusal regresyon modeli geliştirilmiştir. İki ortamda

elde edilen kaliforniya taşıma değeleri arasında küçük farklar gözlemiştir. Maksimum farklılık %3.67, çoğu durumdaki farklılık oranı ise; %6,3 olarak belirlenmiştir. Zeminin plastisite indisinin (I_P) ve optimum su muhtevasının yükselmesiyle; elde edilen kaliforniya taşıma oranlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Sabat ve Mohrana [14] kompaksiyon enerjisinin şişme potansiyeli olan zeminlere olan etksini araştırmışlardır. Kompaksiyon enerjisi 527 kJ/m^3 den 2700 kJ/$m^{3'}$e yükseldiğinde, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 19,26 kN/m^3 den 22,46 kN/m^3 değerine yükselmiştir. Optimum su muhtevası %16,43 değerinden %13,66 değerine ulaşmıştır. Serbest basınç dayanımı ise 245 kN/m^2 değerinden 777 kN/m^2 değerine düşmüştür. Suya batırılma sürecinden sonra elde edilen kaliforniya taşıma oranları ise; %6,1 değerinden %1,72 değerine yükselmiştir.

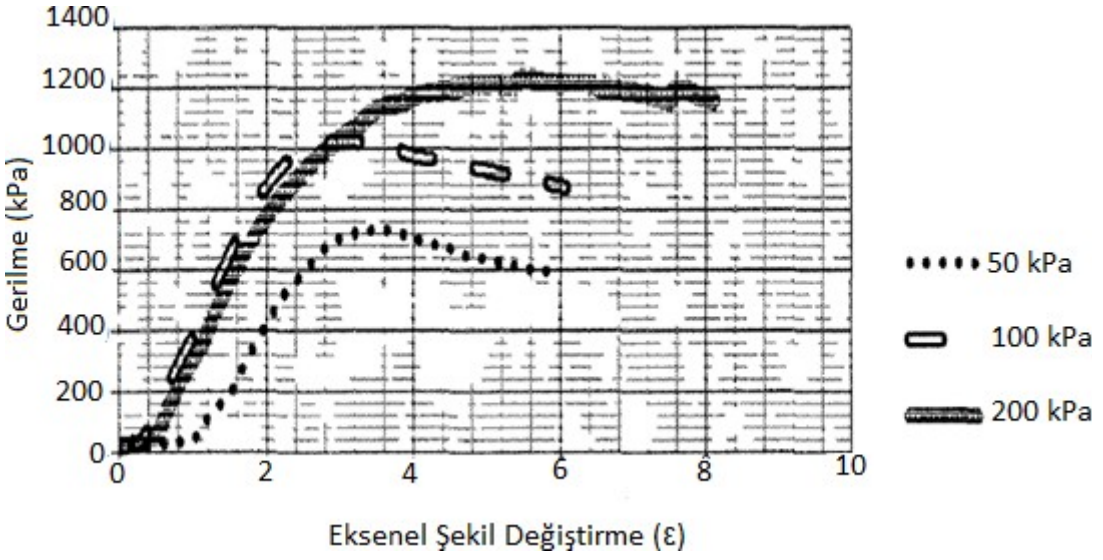
Lakshmi vd. [15] düşük plastisiteli kil zeminin (CL) farklı kompaksiyon enerjileri kullanarak; sıkıştırılan her zemin tabakasına 10, 25, 35, 45 ve 55 vuruş sayısı hesaplamışlardır. Kısaca bu çalışmada; optimum su muhtevası ve bu değere denk gelen kuru birim hacim ağırlık değerleri, farklı enerjilerde sıkıştırılan zeminlerde hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler ile yaş metod ve kuru metod kullanarak, CBR deney düzenekleri kurmuşlardır. Optimum su muhtevası değeri % 8,5 değerinden % 6.41 değerine ulaşmıştır. Bu değerlere denk gelen kuru birim hacim ağırlık değerleri ise sırasıyla 1,72 gm/cm^3 ve 2,11 gm/cm^3 tür. Yüzde olarak optimum su muhtevasındaki düşüş; % 24,59 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinde ise ; % 22,46 yükseliş gözlenmiştir. 10 vuruş sayısından, 45 vuruş sayısına geçişte; maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 1.723 gm/cm^3 to 1.81 gm/cm^3 değerine ulaşmıştır. Fakat 55 vuruş sayısı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri; 2,11 gm/cm^3 değerine yükselerek büyük bir artış gözlemişlerdir. Yaş metod kullanarak yapılan CBR deneyinde, kuru metod kullanarak yapılan CBR deneyine göre % 86,08 düşüş gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar ile yüksek yoğunluklarda boşluk oranının azaldığını böylece zemin permeabilitesinde düşüş gözlendiğini ve yaş metot uyguladığında sudan daha az etkilendiği gözlemlenmiştir.

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değeri zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su içeriği, likit limit (W_L) , plastik limit (W_p) ,plastisite indeksi (I_p) , zemin tipi,

permeabilite, yaş metot veya kuru metot gibi koşulların etkisine göre değişkenlik göstermektedir. Birçok araştırmacı; zeminlerin fiziksel özellikleri ile kaliforniya taşıma oranını (CBR)korelasyon için çeşitli ampirik bağıntılar geliştirmiştir. Ramasubbarao [16] ince daneli zeminlerde yaş metod kullanarak plastisite özellikleri ve sıkışabilirlilik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla çeşitli bağıntılar geliştirmiştir.

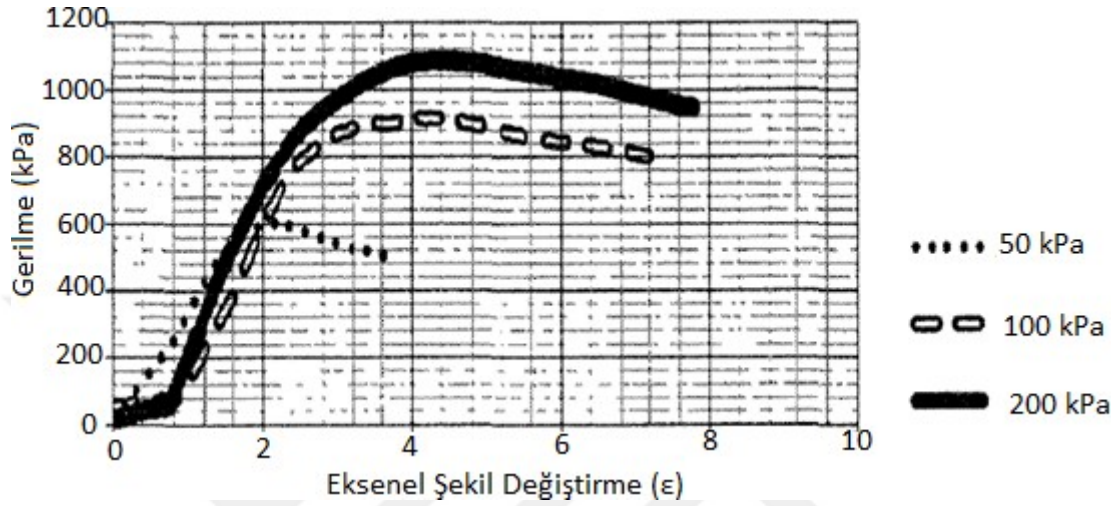
Vinod vd. [17] ise iki tip kil zemin üzerinde farklı kompaksiyon enerjilerinin kaliforniya taşıma oranı (CBR) arasındaki ilişkiyi gözlemlemişlerdir. Yüksek kompaksiyon enerjilerinde γ_k değerinin yükselmesi ile $\omega_{optimum}$ değerinin azalığını tespit etmişlerdir. Elde edilen CBR değerinin ise; artan kompaksiyon enerjisi ile yükseldiğini belirlemişlerdir.

Rijal [18] yüksek lisans tez çalışması kapsamında konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU)deney yönteminde kil minerallerinin mukavemet davranışını incelemiştir. Zemin mineralleri (montmorillonit, kaolin, illit ve kuvars)farklı oranlarda karıştırılmıştır. Zeminden silindirik numuneler alınmıştır ve konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU)deneye tabi tutulmuştur. Drenajsız kayma mukavemeti parametreleri; kohezyon (c)ve içsel sürtünme açısı (Ø) belirlenmiştir. Farklı hücre basınçlarının ve mineral içeriğinin kayma mukavemeti üzerine olan etkileri incelenmiştir. Saf kaolin ile gerçekleştirilen konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney grafiği Şekil 1.7'de verilmiştir.



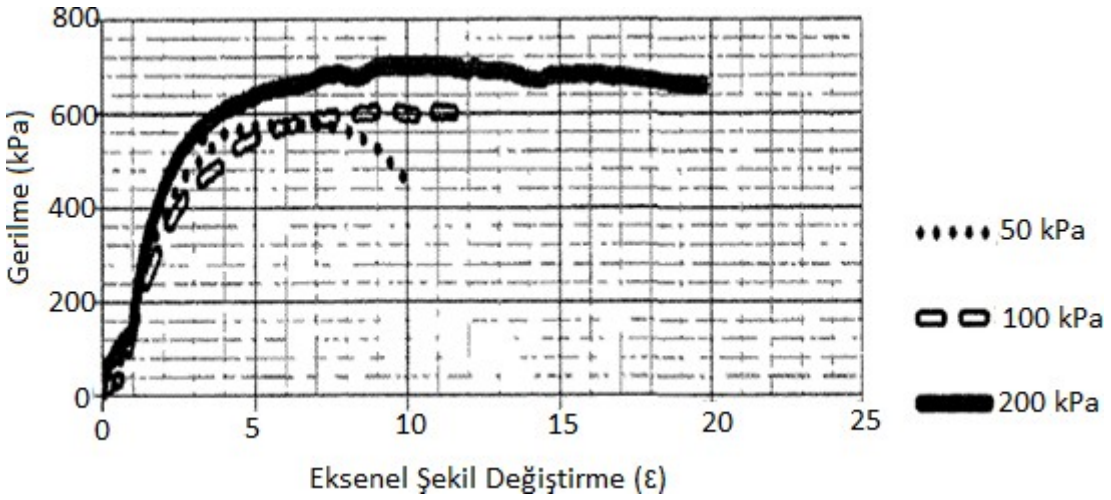
Şekil 1.7 Saf kaolin konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney grafiği [15]

Saf kaolinde 200 kPa hücre basıncı altında deviatorik gerilme miktarı 1211 kPa iken Şekil 1.8'de görüldüğü gibi aynı hücre basıncı altında, %20 illit ve %80 kaolin içeren karışımda deviatorik gerilme miktarı 1058 kPa ölçülmüştür. Zemin içerisinde montmorillonit oranı kaolin veya illit oranını aştıkça deviatör gerilme oranında ciddi azalmalar tespit edilmiştir.



Şekil 1.8 %80 kaolin ve %20 illit içeren zemin için deviatorik gerilmeye karşılık birim uzama miktarı eğrisi [15]

Deneysel çalışmanın ilerleyen safhasında ise %20 kaolin, %40 illit ve %40 montmorillonit karışımından oluşan zeminin konsolidasyonsuz ve üç eksenli deney (UU) sonuçları incelediğinde elde edilen deviatorik gerilme miktarında Şekil 1.9 'da da görüldüğü gibi düşüş gözlenmiştir.

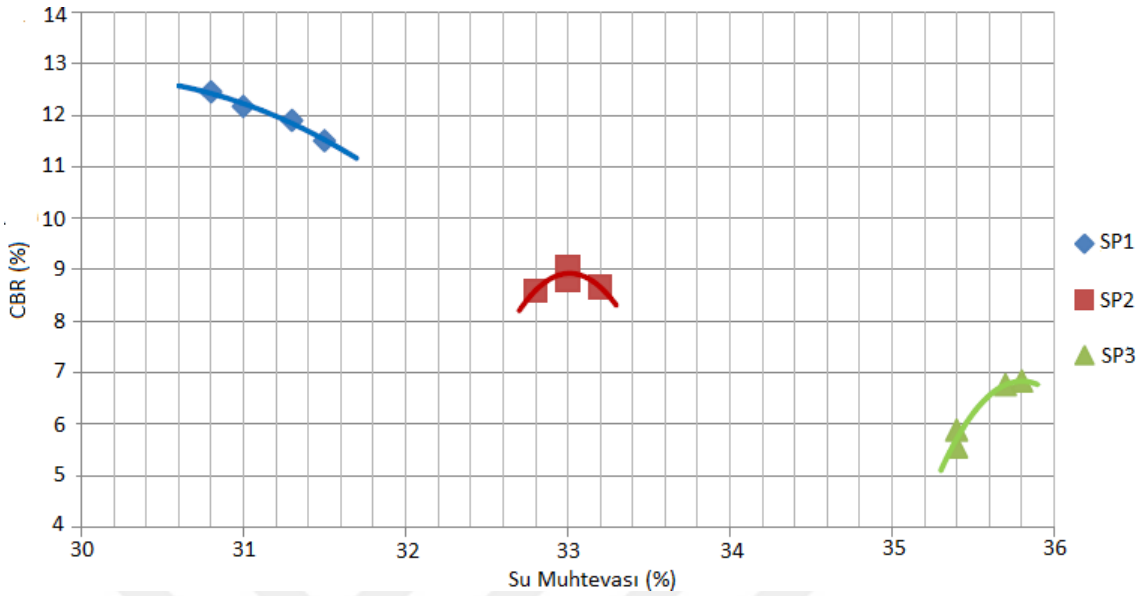


Şekil 1.9 %20 kaolin, %40 illit ve %40 montmorillonit içeren zemin için deviatorik gerilmeye karşılık birim uzama miktarı eğrisi [15]

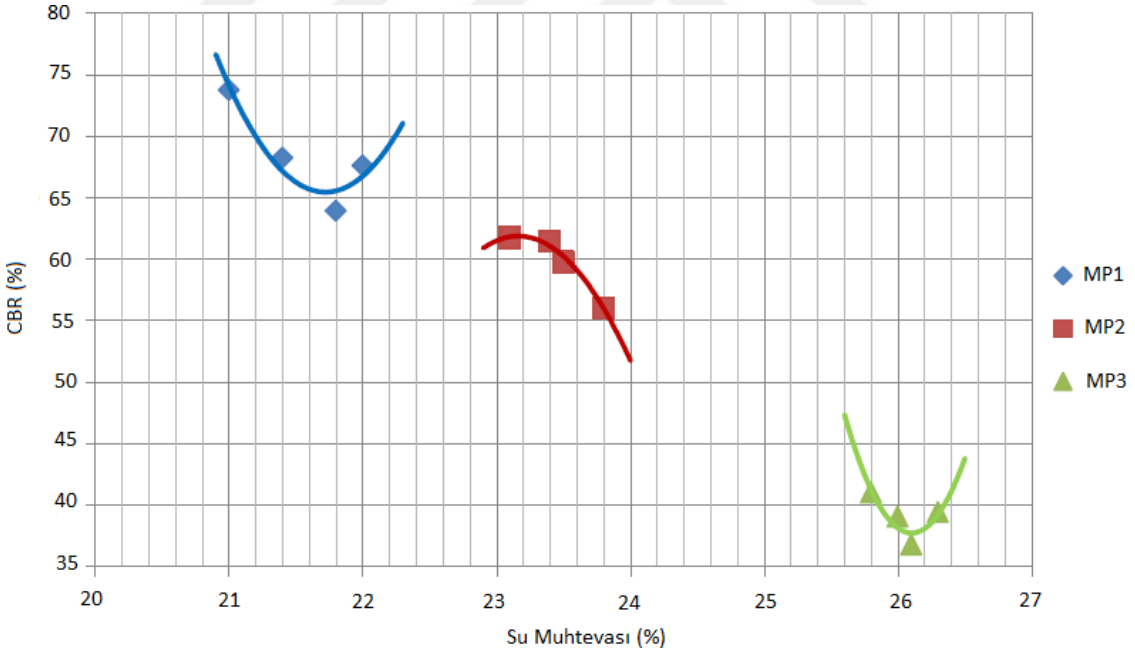
Literatürde kilin sahip olduğu hacim değişimi ve şişme potansiyeline olan etkileri ile ilgili birçok araştırma mevcuttur. Kilin sahip olduğu aktive, plastisite indeksi ve kil içeriğine (Seed vd. [19]) bağlı olduğunu, (Nayak ve Christensen [20]) plastisite indeksinin artmasıyla, (Holtz ve Kovacs[1]), Komornik ve David[21]) likit limit değerinin artmasıyla şişme potansiyelinin arttığını belirtmiştir. Alonso vd. [22] şişme potansiyeli yüksek zeminlerin ayrı bir çalışma konusu olduğunu belirtmişlerdir ve düşük plastisiteli zeminler üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir.

Şenkan [23] çalışmasında likit limit (W_L) değeri %80, plastik limit (W_P) değeri %36 ve birleştirilmiş zemin sınıflandırma (USCS) sistemine göre yüksek plastisiteli (CH) zemin kullanmıştır. Standart ve modifiye proktor kullanılarak, herbir su içeriğinde 4 adet, toplamda 24 numune üzerinde CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen herbir CBR deney numunesinden 3 adet üç eksenli deneye tabi tutulmak üzere, 70 adet numune alınmıştır. CBR deneyleri farklı su muhtevalarında ve doygunluk derecelerinde farklı kompaksiyon enerjileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu, optimum su muhtevasında, standart proktor ve modifiye proktor ile kompakte edilen zeminlerin CBR değerleri sırası ile ortalama; % 11 ve % 68 olarak belirlenmiştir. Su içeriği yükseldikçe elde edilen bu değerler sırası ile ortalama; % 6 ve % 39'a kadar gerilemiştir. Doygunluk derecesi yükseldikçe CBR değerlerinde düşüş gözlenmiştir. En yüksek CBR değerleri optimum su muhtevasında elde edilmiştir. Kompaksiyon enerjisinin yükselmesi ile CBR değerleri de artış göstermiştir.

Üç eksenli deneyleri ile elde edilen parametrelerde ise CBR değerinin yükselmesi ile kohezyon ve kayma mukavemeti açısında artışlar gözlenmiştir.



Şekil 1.10 Standart proktor ile kompakte edilen kil zeminde, CBR ve su muhtevası arasındaki ilişki [23]



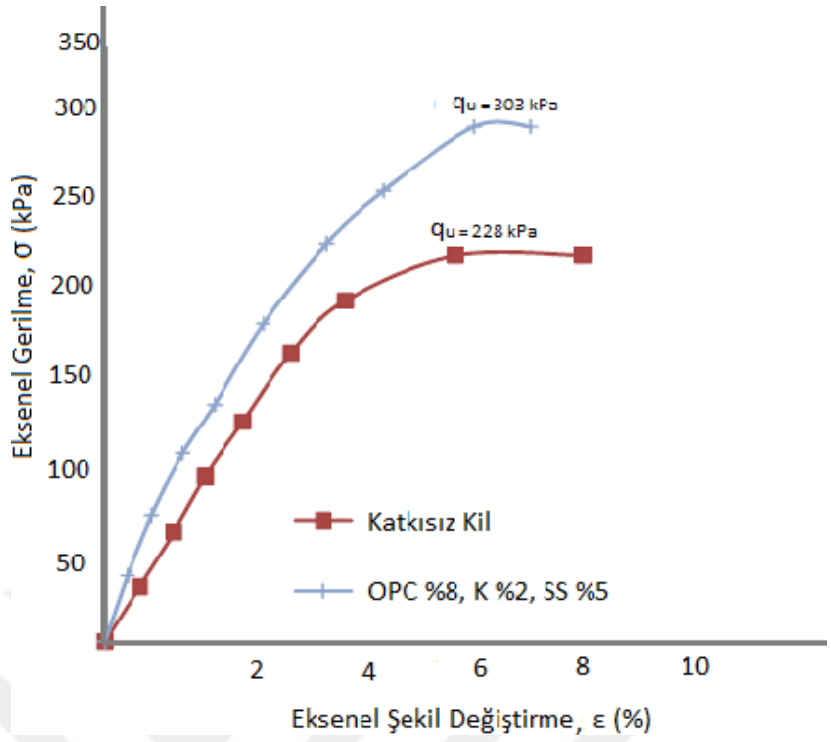
Şekil 1.11 Modifiye proktor ile kompakte edilen kil zeminde, CBR ve su muhtevası arasındaki ilişki [23]

Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de farklı kompaksiyon enerjileri ve su muhtevalarının CBR değerine olan etkileri görülmektedir. Kompaksiyon enerjisinin yükselmesi ile CBR değerleri de artış göstermiştir.

Tiwari vd. [24] likit limit ve aktivite değerleri büyük aralıklar ile farklılık gösteren; montmorillonit, kaolin, illit ve kuvars içeren 20 adet karışım hazırlamışlardır. Zemin örnekleri minyatür kompaksiyon cihazı ile modifiye kompaksiyon yöntemi ile benzerlik göstermesi için, 5 tabakaya bölünerek kompakte edilmiştir. Farklı darbe miktarları ile (5, 10, 25 ve 35 adet) sıkıştırılarak elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin, standart kompaksiyon yöntemi ile elde edilen değerlere yakın olması amaçlanmıştır. Konsolidasyonsuz ve drenajsız koşullar altında ise mukavemet davranışlarını elde etmek amacıyla belirlenen 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa hücre basınçları altında konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney yöntemini uygulamışlardır. Minyatür kompaksiyon cihazı ile kompakte edilen zeminlerde, maksimum ve minimum drenajsız kayma mukavemeti (q_u) değerleri ve birleştirilmiş zemin sınıflandırma (USCS)'ye göre zemin sınıfları sırasıyla; 1077,8 kPa, yüksek plastisiteli kil grubu (CH) ve 360,9 kPa ile düşük plastisiteli kil grubuna dâhil oldukları tespit edilmiştir. Drenajsız kayma mukavemeti değerleri belirlenen hücre basınçları arttıkça orantılı olarak artış göstermektedir.

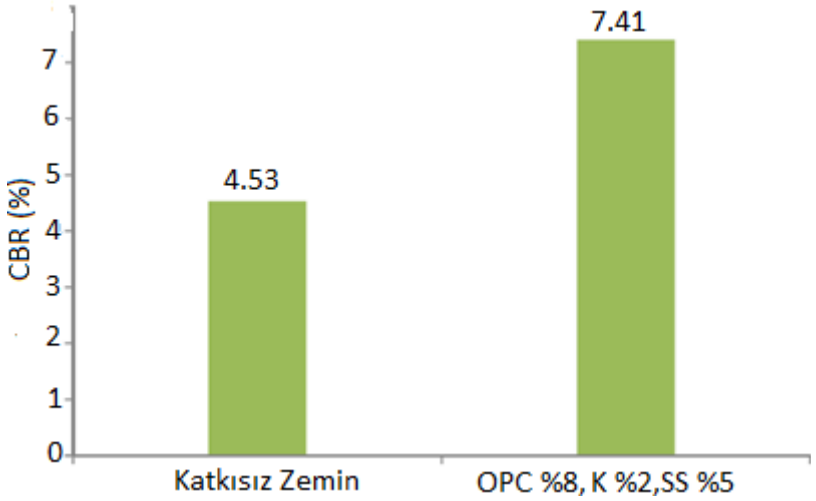
Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, standart kompaksiyon yöntemi ve minyatür kompaksiyon yöntemi ile elde edilirken birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çeşitlilik gösteren aktivite oranları doğrultusunda, kuru birim hacim ağırlık ve likit limit arasında korelasyon tespit edilmiştir. Bu da bizlere aktivitenin kuru birim hacim ağırlık değerini kontrol ettiğini göstermektedir. Ayrıca maksimum drenajsız kayma mukavemeti (q_u) değerinin de aktivite ile orantılı olduğunu ispatlamışlardır.

Mousavi vd. [25] çalışması kapsamında yumuşak kil zeminin belirli oranlarda silika kumu, çimento ve kaolin katılarak mekanik stabilizasyonu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Mekanik olarak farklı iyileştirme yöntemleri mevcuttur. Mikro kazık, ankraj, kum drenler ve çeşitli katkılar kullanarak stabilizasyon, mekanik stabilizasyonunda kullanılan metodlara örnek verilebilir. Şekil 1.12'de görüldüğü üzere ince daneli kaolin, daneler arası boşlukları doldurarak, çimentonun kil ile etkileşimi esnasında puzzolonik etkisi ile zemini kuvvetlendirmiş, dolayısıyla serbest basınç mukavemeti (q_u) değerinde 1,33 kat artış gözlenmiştir.



Şekil 1.12 Drenajsız kayma mukavemetindeki değişim [26]

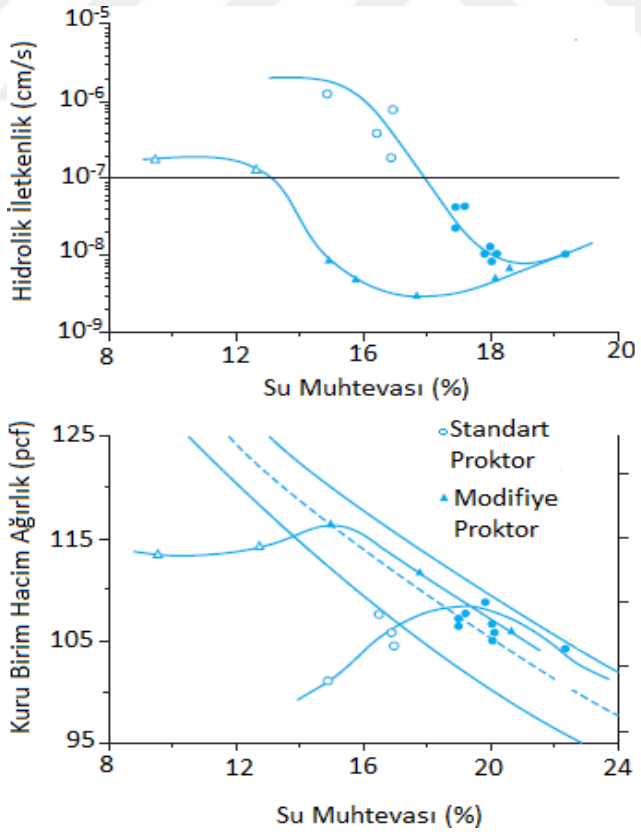
Goodary vd. [26] 'e göre iki farklı katkısız zeminin kalifornia taşıma oranı (CBR) değerleri % 9,5 ve %14 iken, katkılı zeminlerde bu oranlar % 83,8 ve % 122,7 ' ye yükselmiştir. Katkısız zeminde % 4,53 iken, belirli oranlarda çimento, kaolin ve silis dumanı katkılı zeminde % 7,41 değerine yükseldiği gözlenmiştir.



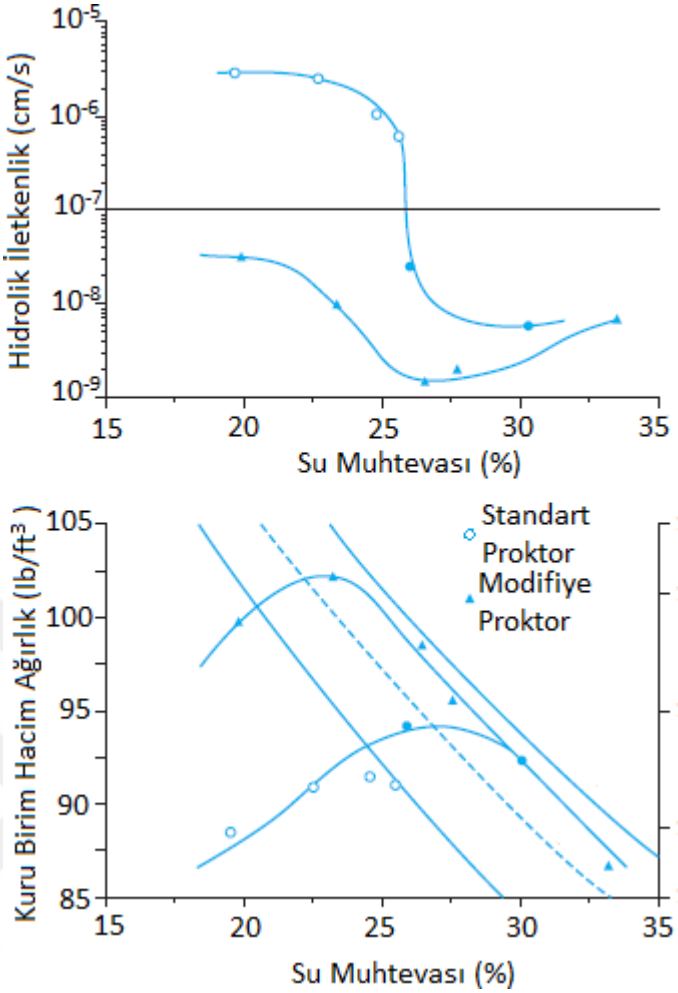
Şekil 1.13 Stabilizasyonun zeminin kalifornia taşıma oranı (CBR) üzerindeki etkisi [26]

Othman vd. [27] standart proktor ve modifiye proktor kullanarak kompakte ettikleri, likit limit (W_L) değeri %34, plastisite indisi (I_p) %16 düşük plastisiteli (CL) Wisconsin-A ve likit limit (W_L) değeri %84, plastisite indisi (I_p) %60 olan yüksek plastisiteli Wisconsin-C zeminleri üzerinde kompaksiyon enerjisinin hidrolik iletkenliğe olan etkisini araştırmışlardır. Şekil 1.14 ve Şekil 1.15'de modifiye proktor ve standart proktor ile kompakte edilmiş düşük ve yüksek plastisiteli kil zeminin kompaksiyon enerjisi, hidrolik iletkenlik su muhtevaları arasındaki ilişki verilmiştir. Deney sonuçlarına göre; zeminlerin doygunluk derecelerinin yükselmesiyle hidrolik iletkenliğin düştüğünü gözlemlemişlerdir. İki zemin için ise hidrolik iletkenlik değerleri %77 ve %100 doygunluk derecelerinde sırasıyla; $1x10^{-6}$ ve $1x10^{-8}$ cm/s olarak belirlenmiştir.

Permeabilite kavramı su muhtevasının dışında; yoğunluk, doygunluk derecesi, boşluk oranı ve zemin yapısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Permeabilite üzerinde etkili olan bu faktörler ile ilgili Carmen [28], Burmister [29], Michaels ve Lin [30], Olson [31] bunlardan sadece birkaçıdır.



Şekil 1.14 Farklı kompaksiyon enerjilerinin düşük plastisiteli (CL) Wisconsin-A zeminde hidrolik iletkenliğe olan etkileri [27]



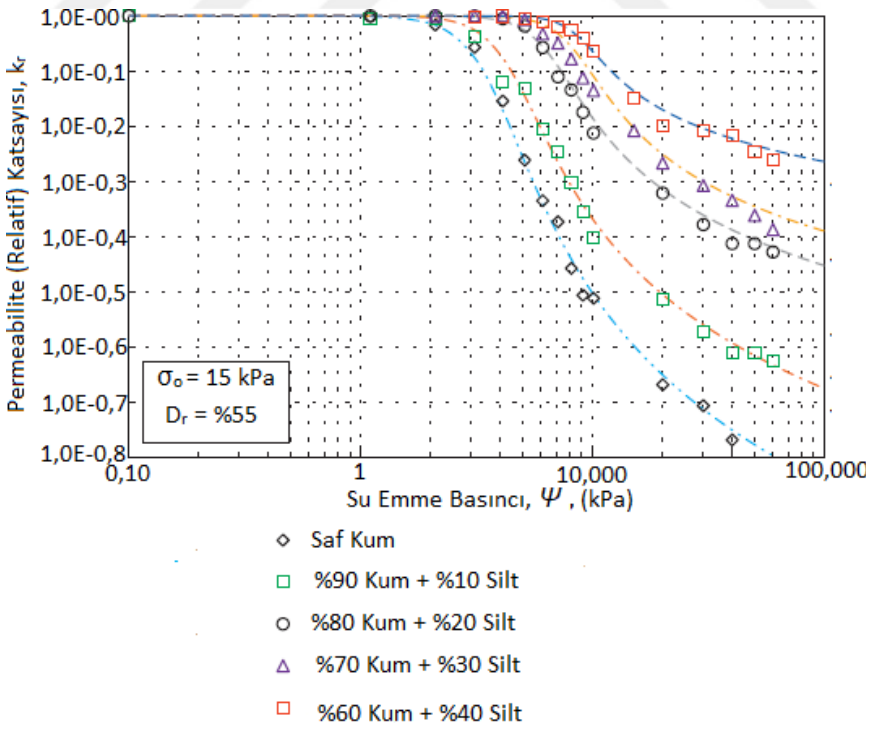
Şekil 1.15 Farklı kompaksiyon enerjilerinin yüksek plastisiteli Wisconsin-C zeminde hidrolik iletkenliğe olan etkileri [27]

Wang vd. [32] laboratuvar ortamında bentonit, kireçtaşı tozu, beton kumu ve çakıl içeren 4 farklı karışım hazırlanmıştır. Zeminler özgül ağırlıkları, kıvam limitleri, dane çapı dağılımı ve birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre zemin sınıflandırması yapılmıştır. Standart kompaksiyon yöntemi ile kompakte edilen zeminlerin, optimum su muhtevası ve bu değere karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Hem düşen seviyeli, hem de sabit seviyeli permeabilite ile ölçüm metodu kullanmışlardır. SAS isimli ve istatiksel çözümlemeye dayalı bir bilgisayar programı ile; maksimum kuru birim hacim ağırlık, su muhtevası ve permeabilite katsayısı arasında korelasyon oluşturmuşlardır.

Fredlund vd. [33] suya doygun olmayan zeminlerde, zemin boşluğu boyut dağılımı ve dolaylı olarak belirlenen permeabilite katsayısının, zemin-su karakteristik eğrileri

(SWCC) ile belirlendiğini vurgulamıştır. Geliştirdikleri sistemde, emme basıncı ve düşey gerilme etkisinin kombinasyonunu kullanmışlardır. Dizayn ettikleri esnek duvar permeametresi ile siltli kumlar üzerinde, direk ölçüm yaparak, permeabilite hakkında bilgi sahibi olmaya çalışmışlardır.

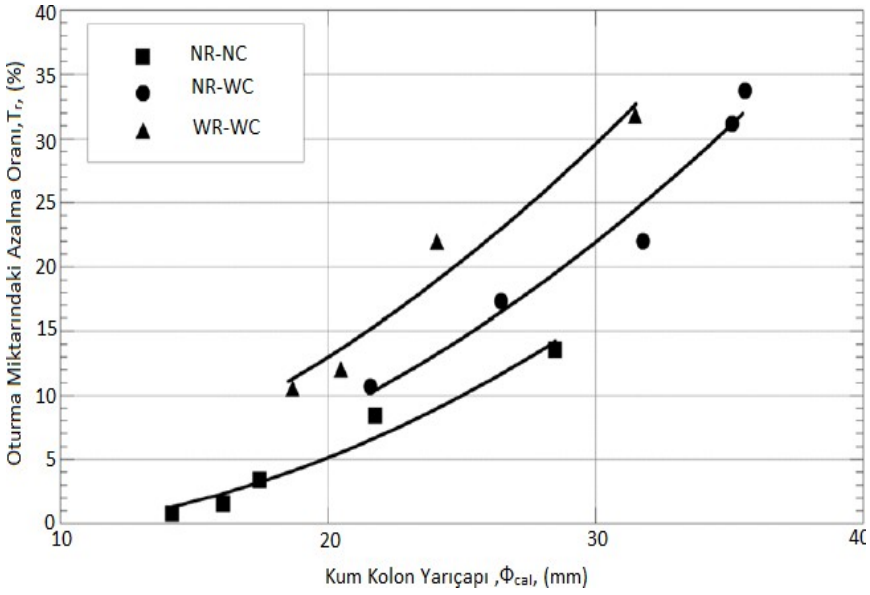
Nazari vd. [34] kum ve silt karışımlı zeminlerin hidrolik iletkenlik katsayılarını belirlemek amacıyla; su emme basıncının 1 kPa ve 60 kPa aralığında seçmişlerdir. Su akışının kontrolünü ise 30 kPa değerine sabitlenmiş bir başlık ile ölçmüşlerdir. Elde edilen verileri; su emme basıncı ve hacimsel değişime göre değerlendirmişlerdir. Aradaki fark, emme basıncının artmasıyla görünür hale gelmektedir. Permeabilite katsayıları, düşük su emme basınçlarında farklılık göstermemektedir(<1,5 kPa). Su emme basıncının yükselmesi ile Şekil 1.16'da görüldüğü üzere; emme basıncının artmasıyla FK40 en yüksek permeabilite katsayısına ulaşırken, FKO en düşük permeabilite katsayısına sahip olmaktadır. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı üzere; zemin içerisindeki ince daneli malzeme oranının yükselmesi ile zemin içerisindeki boşluk dağılımında azalma ve bunun sonucunda ise; daha sıkı ve daha kararlı bir yapı oluşmasına neden olduğu için suyun zemini terketmesi için daha fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1.16 Zeminin permeabilite (relatif) katsayısına, ince daneli malzeme oranı ve su emme basıncının etkisi [34]

Kum drenler ile ilgili birçok araştırmacının deneysel çalışmaları mevcuttur. Hughes and Withers [36], Narasimha Rao vd. [37], Muir Wood vd. [38], Sivakumar vd. [39], ve Mckelvey vd. [40] bunlardan sadece birkaçıdır.

Rangeard vd. [35] çalışmaları kapsamında laboratuvar ortamında oluşturulan kum kolon çaplarındaki (Φ_{cal})değişimin, oturma miktarlarındaki (T_r)azalmaya olan etkisini araştırmışlardır. Likit limit (W_L)değeri %55, plastik limit (W_p)değeri %39 ve plastisite indisi (I_p) %16 olan kaolin ile birim hacim ağırlığı (γ_s) 26,4 KN/m^3 ve ıslak elek analizi sonucu üniform dane boyu dağılımına sahip; 1,00 mm ve 1,25 mm arasında değişen loire kumu kullanmışlardır. İlk homojen nemlendirme likit limit (W_L) değerinin 2 katı olacak şekilde yapılmış ve 24 saat kapalı bir şekilde bekletilmiştir. Daha sonra yüksekliği 200 mm ve çapı 150 mm olan kalıbın içerisine yerleştirilmiştir. Düşey gerilmelerin artması ile ön konsolidasyon basıncı σ_o=50 kPa ölçülmüştür. Granüler malzemenin kil zemine aktarımı belli koşullar altında gerçekleştirilmiştir. NR (Yerdeğiştirme yok) NC (Kompaksiyon yok), WR (Yerdeğiştirme var) WC (Kompakiyon ile) ve NR (Yerdeğiştirme yok) WC (Kompaksiyon ile) olmak üzere 3 koşul altında gerçekleştirilmiştir. NR ve NC koşulları atında; kum kolonlarının çap oranı büyüdükçe, WC ve WR koşulları altında ise kompaksiyon kuvvetinin yarattığı gerilmeler ve kum kolonlarının yarıçapı ile orantılı olarak oturma miktarılarında Şekil 1.17'de de görüldüğü üzere azalma gözlenmiştir.



Şekil 1.17 Kum kolon yarıçapının oturma miktarındaki azalma oranına etkisi [35]

1.2 Tezin Amacı

Standart proktor ve modifiye proktor deneyleri ile $\omega_{optimum}$-3 , $\omega_{optimum}$, $\omega_{optimum}$+3 olmak üzere üç ayrı su muhtevasında ve yaş metot kullanılarak zeminlerin, kaliforniya taşıma oranları (CBR) belirlenmiştir. Yaş CBR deney metotu ile, belirli su muhtevalarında kompakte edilen zeminlerin merkez noktalarında, çelik borular yardımı ile oluşturulan 1 cm ve 2 cm açıklıklar kum malzeme ile doldurulmuştur. Modellenmesi hedeflenen kum drenler sayesinde zeminde meydana gelen ıslanmayı arttırmak hedeflenmiştir. Bu sayede yüzeyde herhangi bir mukavemet kaybına neden olup olmadığı araştırılmıştır. Kum dren modellemesinde CBR ve şişme oranlarında meydana gelen değişimlerin, kum dren oluşturulmayan zeminlere göre değişimini belirlemek hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi ile elde edilen veriler farklı su muhtevalarında ve kompaksiyon enerjilerinin de etkisi gözönünde bulundurularak, literatürde yer alan çalışmalar ile kıyas edilerek değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

KOMPAKSİYON VE KAYMA MUKAVEMETİ PARAMETRELERİ

2.1 Kompaksiyon

İnşaat mühendisliği uygulamalarında proje sahalarında karşılaşılan zeminler her zaman mühendislik parametreleri açısından aranan özelliklere sahip değildir. Sahadaki mevcut zemin tabakaları, düşük mukavemet, hidrolik iletkenliği yüksek veya sıkışabilirlik gibi, mühendislik ve maliyet açısından olumsuz özelliklere sahip olabilmektedir. Bu tarz durumlarda yapının yerinin değiştirilmesi alternatif bir çözüm olarak düşünülebilir. Diğer bir alternatif ise mevcut zemin tabaklarının "stabilizasyonu" diğer ifade ile "mühendislik özelliklerinin" iyileştirilmesidir. Maliyet açısından en ekonomik yöntem ise proje özelliklerine göre şekillenecektir. Zeminin sahip olduğu mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi yöntemleri genellikle mekanik veya kimyasal olmakla beraber bazı durumlarda termal veya elektriksel iyileştirme yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu bölümde ise mekanik iyileştirme, sıkıştırma veya diğer bir deyiş ile kompaksiyon ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır. Zeminin toprak yapılarını oluşturan bir malzeme olarak kullanılması durumunda kompaksiyon oldukça önemlidir. Buna örnek olarak; yol ve demir yolu dolguları, su seddeleri ve toprak dolgu barajlar verilebilir [1]. Kompaksiyon; mekanik bir enerji uygulayarak zemin danelerinin birbirine yakınlaşmasını ve daneler arasındaki hava boşuklarının minimum düzeye indirilerek daha üniform bir yapıya sahip olmalarını sağlayan sıkıştırma işlemidir. Zemin danelerinin sıkıştırılması sonucu birim hacim ağırlık değeri yükselmekte ve buna bağlı olarak yetersiz mühendislik özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır. Uygulanan statik veya

dinamik yükler altında daneler birbirine yakınlaşmakta veya uzaklaşmaktadır. Bu hareketi sağlayan mekanizma ise kompaksiyon enerjisi ve zemin içerisindeki su miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Zeminin sahip olduğu su miktarı danelerin birbirine göre hareket edebilmelerini sağlamaktadır. Zemin danelerinin arasındaki boşluklar tamamen su ile dolu ise; kompaksiyon işlemi gerçekleştirilemez. Eğer daneler arasındaki su miktarı fazla, diğer bir deyişle doygunluk derecesinin yüksek olması durumunda danelerin birbirine yaklaşması zorlaşıcak ve kompaksiyon işleminin sağlanması güçleşecektir.

Zeminin su muhtevasının artması daneler arasındaki havanın hapsolmasına, dolayısıyla sıkışan hava hacimlerinde artış meydana gelmesine ve kompaksiyon işleminin zorlaşmasına neden olmaktadır. Zemin içerisindeki su miktarı kompaksiyon üzerinde iki etkiye sahiptir. Zemin düşük su muhtevasına sahip ise daneler arasında sürtünme kuvveti ve kapiler gerilmeler artış göstermekte, elektriksel kuvvetler çekim kuvvetlerine dönüşmektedir. Eğer zemin yüksek su muhtevasına sahip ise daneler arasındaki sudan kaynaklı yağlanma etkisinin azalmasıyla, kapiler gerilmeler de azalmakta ve daneler arası itki kuvveti açığa çıkmaktadır. Görüldüğü üzere zemin içerisindeki su miktarı, çekim ve itki etkisi yaratarak, kompakte edilen zeminlerin mühendislik davranışlarını etkilemektedir. Her iki etkinin hesaba katılarak, zemin içerisinde yeterli miktarda su bulunması durumunda (ne az, ne de çok) en iyi sıkışmanın sağlanacağı sonucuna varılmaktadır. Bu koşullar gözönüne alınarak zeminin en iyi ve en kolay kompakte edilebileceği su muhtevası değerine optimum su muhtevası adı verilmektedir. Zeminin sahip olduğu optimum su muhtevası değeri zemin çeşidine göre farklılık gösterirken, aynı çeşit zeminlerin su muhtevası da, uygulanan kompaksiyon yöntemine dolayısıyla kompaksiyon yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Danelerin birbirine göre hareketi ve yakınlaşabilmesi için uygulanan statik ve dinamik yüklerine türüne ve şiddetine de bağlıdır. Dolayısıyla optimum su muhtevası kavramı yukarıda belirtilen koşullar altında değişkenlik gösteren özelliktedir [1].

Kohezyonlu (siltli ve killi) zeminlerde su muhtevasının kompaksiyon işlemi üzerindeki etkisi, kohezyonsuz (çakıllı ve kumlu) zeminler üzerindeki etkisinden fazladır. Çünkü iri daneli zeminlerde, daneler arası boşluklardan dolayı basınç artışı gözlenmeyecek ve

daneler arası sürtünme sudan daha az etkileneceği için, su ve havanın dışarı çıkma işlemi daha kolay gerçekleşecektir [41].

1930'lu yılların başında Los Angeles şehri, su işletmeleri bürosu için baraj tasarımı yapan R. R. Proctor, Engineering News-Record dergisinde yayınlanan bir dizi makalesinde kompaksiyon işleminin prensiplerini ilk olarak yayınlamıştır. Üstünde çalışmış olduğu standart laboratuvar sıkıştırma deneyine "Proctor deneyi" adını vermiştir. Proktor kompaksiyon işleminin; su muhtevası, zemin cinsi (kilin mineralojik yapısı, dane çapı dağılımı vb.), kuru yoğunluk ve kompaksiyon enerjisi olmak üzere dört farklı faktöre göre değişkenlik gösterdiğini tespit etmiştir.

Kohezyonlu zeminleri laboratuvar ortamında sıkıştırmak için; ağırlık düşürme, statik, vibrasyonlu, darbeli (dinamik), ve yoğurmalı kompaksiyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde en yaygın olarak darbeli kompaksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Metal bir kalıp içerisindeki zemine, sabit bir kütleye sahip çelik tokmağın, belirli bir yükseklikten defalarca düşürülmesi ile darbeli kompaksiyon yöntemi uygulanmaktadır. Kompakte edilecek zeminin kaç tabaka halinde sıkıştırılacağı, her bir zemin tabakası için kullanılacak çelik tokmağın düşüş yüksekliği, düşüş sayısı ve çelik kalıbın hacmi bilinyorsa, kompaksiyon işlemi için gerekli olacak sıkıştırma enerjisi (E) (2.1)'de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{\text{Çelik Tokmak Ağırlığıx Düşüş Yüksekliği x Tabaka Sayısı x Darbe Adedi}}{\text{Kalıp Hacmi}} \qquad (2.1)$$

Laboratuvar ortamında yaygın olarak kullanılan iki tür kompaksiyon deneyi mevcuttur. Bunlar Standart Proktor ve Modifiye Proctor deneyleridir. ASTM standartına göre her iki deneye ait ayrıntılı bilgiler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Standart proktor ve modifiye proktor deneyine ait özellikler [1]

Kullanılan Deney	Standart Enerji (ASTM D 698-12)			Modifiye Enerji (ASTM D 1557-12)		
Yöntem	A	B	C	A	B	C
Kütle Ağırlığı, (N)	24.4	24.4	24.4	44.5	44.5	44.5
Düşüş Yüksekliği, (mm)	305	305	305	457	457	457
Kalıp Çapı, (mm)	102	102	152	102	102	152
Kalıp Hacmi, (cm^3)	944	944	2124	944	944	2124
Malzeme Tipi	No.4 (4.75 mm) elekten geçen	3/8 inc. (9.5 mm) elekten geçen	3/4 inc. (19 mm) elekten geçen	No.4 (4.75 mm) elekten geçen	3/8 inc. (9.5 mm) elekten geçen	3/4 inc. (19 mm) elekten geçen
Tabaka Sayısı	3	3	3	5	5	5
Her Tabaka İçin Vuruş Adedi	25	25	56	25	25	56
Kullanılan Enerji Miktarı, ($kN\text{-}m/m^3$)	600	600	600	2700	2700	2700
Kullanım	Ağırlıkça geçen No.4 elek üssü ≤%25	Ağırlıkça geçen 9.5 mm elek üssü ≤%25	Ağırlıkça geçen 19 mm elek üssü ≤%30	Ağırlıkça geçen No.4 elek üssü ≤%25	Ağırlıkça geçen 9.5 mm elek üssü ≤%25	Ağırlıkça geçen 19 mm elek üssü ≤%30

İnce daneli zeminlerin kompaksiyon işlemi için ilk olarak, farklı su muhtevalarına sahip zemin numuneleri hazırlanır. Daha sonra hazırlanan her numune için Çizelge 2.1'de verilen proktor kompaksiyon deney kriterlerine göre kompakte edilir. Her bir zemin numunesi en düşük su muhtevası değerinden başlayarak kompakte edilir. Kompakte edilen her zemin numunesinin alt ve üst kısımlarından numuneler alınarak, su muhtevası belirlenir. Kuru birim hacim ağırlık ve bu değere denk gelen optimum su muhtevasını belirlemek için kompakte edilen zeminin kompaksiyon eğrisi belirlenmiş

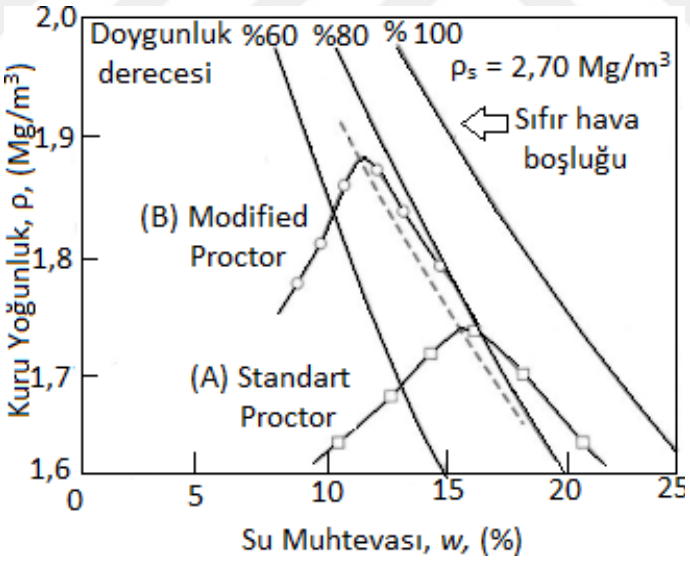
olur. Bu eğriyi elde edebilmek için 4 veya 5 nokta yeterli olmaktadır. Her bir su muhtevası değeri için, kuru yoğunluk (2.3) eşitliğinde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\rho = \frac{M_t}{V_t} \tag{2.2}$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+\omega} \tag{2.3}$$

Sıkıştırılan her numunenin, eşitlik (2.2)'de de görüldüğü üzere, ıslak numune ağırlığı (M_t) ve kalıp hacmi (V_t) ile ıslak yoğunluk (ρ) değeri belirlenir. Eşitlik (2.2)'den elde edilen ıslak yoğunluk değeri ile (ρ), eşitlik (2.3) kullanılarak kuru yoğunluk değeri hesaplanmaktadır.

Şekil 2.1'de buzul bir zemin üzerinde farklı kompaksiyon enerjileri kullanılarak, su muhtevası ve kuru yoğunluk arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Buzul zeminden elde edilmiş standart ve modifiye Proktor Eğrileri [1]

Çizelge 2.1'de Standart Proktor ve Modifiye Proktor yöntemlerinde kullanılan enerji miktarını etkileyen, sıkıştırılan tabaka sayısı, düşüş yüksekliği, çelik tokmak ağırlığı ve kullanılan kalıp hacim miktarı özellikleri verilmişti. Bu veriler doğrultusunda (2.1)'de verilen eşitliğe göre hesap yapıldığında, Şekil 2.1'de gösterilen B eğrisi, aynı zeminden

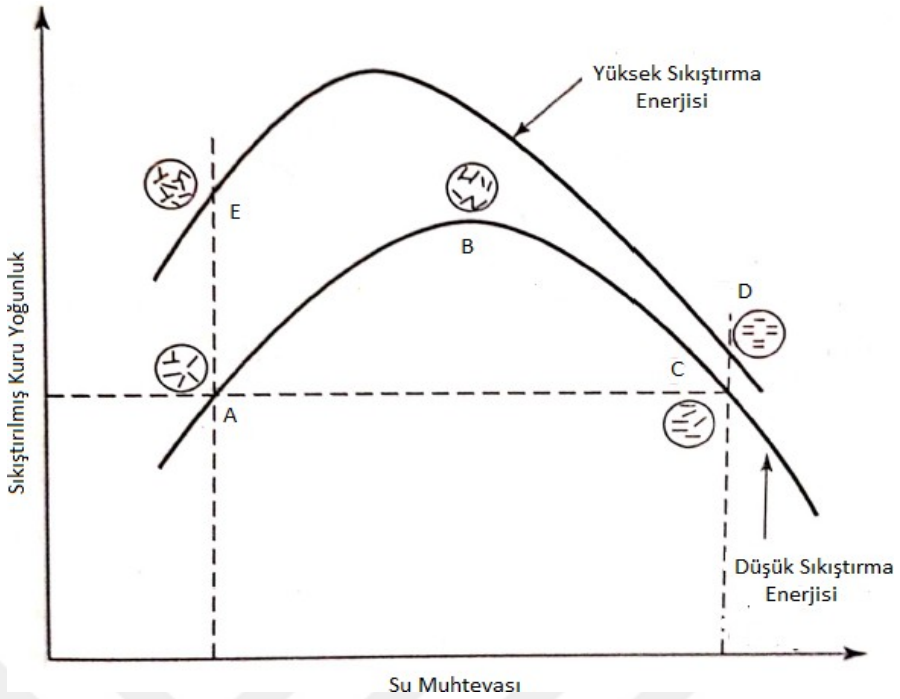
elde edilen modifiye Proktor eğrisidir. Modifiye Proktor ile daha yüksek enerji ile kompakte edilen zeminlerde, maksimum kuru yoğunluk değerinde artış ve optimum su miktarında düşüş gözlenmektedir.

İnce daneli zeminlerin mühendislik yapısı; uygulanan kompaksiyon yöntemine, enerjisine, zemin cinsine ve sahip olduğu su muhtevasına göre farklılık göstermektedir. Uygulanan kompaksiyon yönteminde referans olarak kullanılan su muhtevası değeri, optimum su muhtevasıdır. Elde edilen kompaksiyon eğrileri, optimumdan kuru, optimumda ve optimumdan ıslak olmak üzere üç kısıma ayrılır.

Seed ve Chan [42] çalışmaları kapsamında, optimumdan kuru tarafta sıkıştırılmış ince daneli zemin yapısının, kompaksiyon yönteminden bağımsız olduğunu gözlemlemişlerdir. Eğer zemin optimumdan ıslak tarafta kompakte edilmişse, uygulanan kompaksiyon enerjisinin; zemin yapısı ve mühendislik özellikleri üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

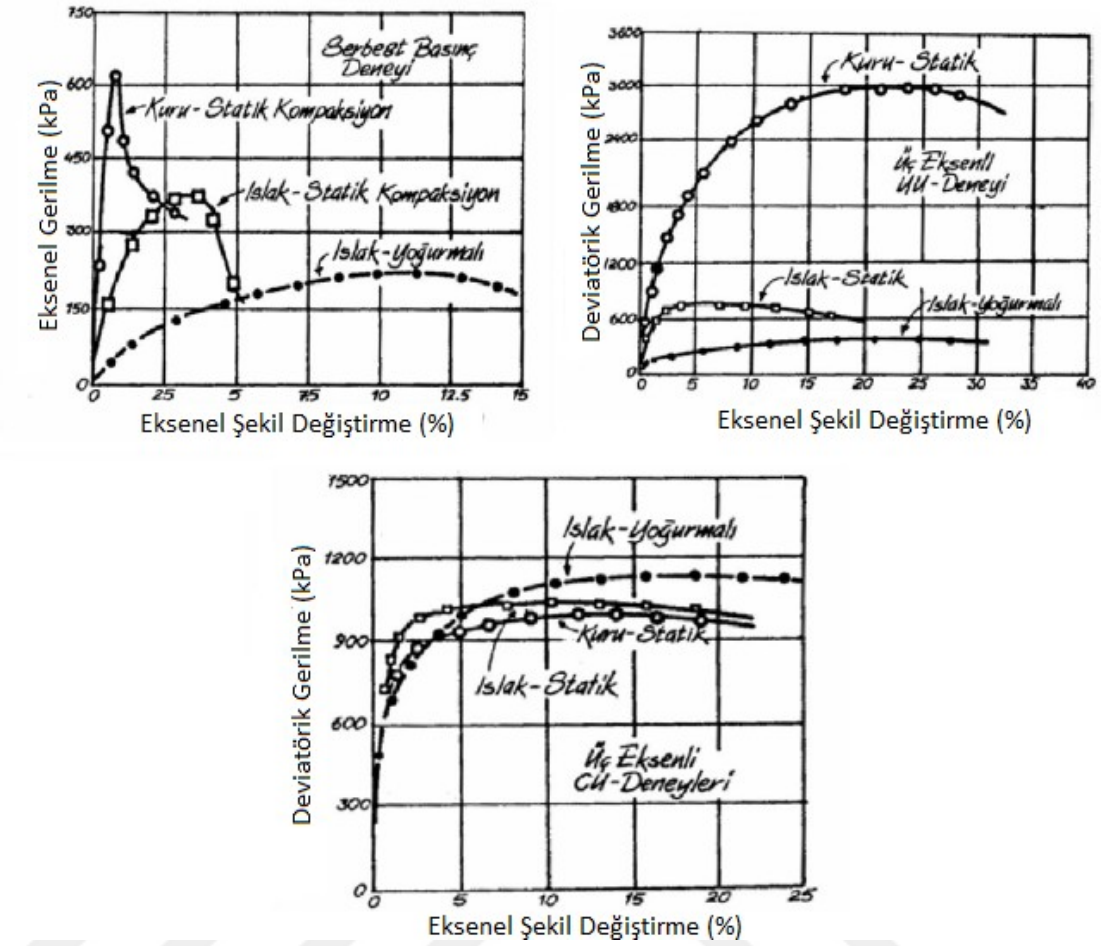
Lambe [43] aynı enerjide kompakte edilmiş kil zeminlerin, su içeriği yükseldikçe yönlenmiş bir yapıya sahip olduğunu gözlemlemiştir. İnce daneli zeminler Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, optimumdan kuru tarafta ayrık, optimumun ıslak tarafında yönlenmiş bir yapıya sahiptir. E noktasındaki yönlenme A noktasından ve D noktasındaki yönlenme B noktasından fazladır. Fakat aradaki fark, optimumdan kuru taraftaki kadar değildir. Optimumun kuru tarafında kompakte edilen killi zemindeki su içeriği daha az olduğundan, optimumun ıslak tarafındaki zemine göre, değişimlere karşı daha hassastır.

Sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin mühendislik özellikleri, su muhtevası, kullanılan kompaksiyon yöntemi ve kompaksiyon enerjisi ile doğrudan ilişkilidir. Bu faktörler zeminin şişme ve büzülme özellikleri, hidrolik geçirgenlikleri, sıkışabilirlik özellikleri, gerilme deformasyon özellikleri ve kayma direnci üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.



Şekil 2.2 Sıkıştırma etkisinin zemin yapısı üzerindeki etkisi [43]

Şekil 2.3'de farklı yöntemler ile kompakte edilmiş aynı kohezyonlu zemin üzerinde yapılan mukavemet deney sonuçları gösterilmiştir. Serbest basınç deneyi ve konsolidasyonsuz drenajsız deneyinde, optimumdan kuru tarafta kompaksiyon enerjisinin artmasıyla zemin, daha yüksek mukavemete ve sıkışma modülüne sahip olmaktadır. Optimumdan ıslak tarafta kompakte edilen zemin kullanılan kompaksiyon enerjisinden bağımsız davranış sergilemektedir. Herhangi bir yüklemeye maruz kalmadan, suya doygun hale geldiği zaman (konsolidasyonlu drenajlı deney) gerilme ve şekil değiştirme eğrilerinde farklılık gözlenmemektedir. Yoğurma yöntemi kullanıldığı zaman ise, mukavemette azaltıcı rol oynadığını görmekteyiz.



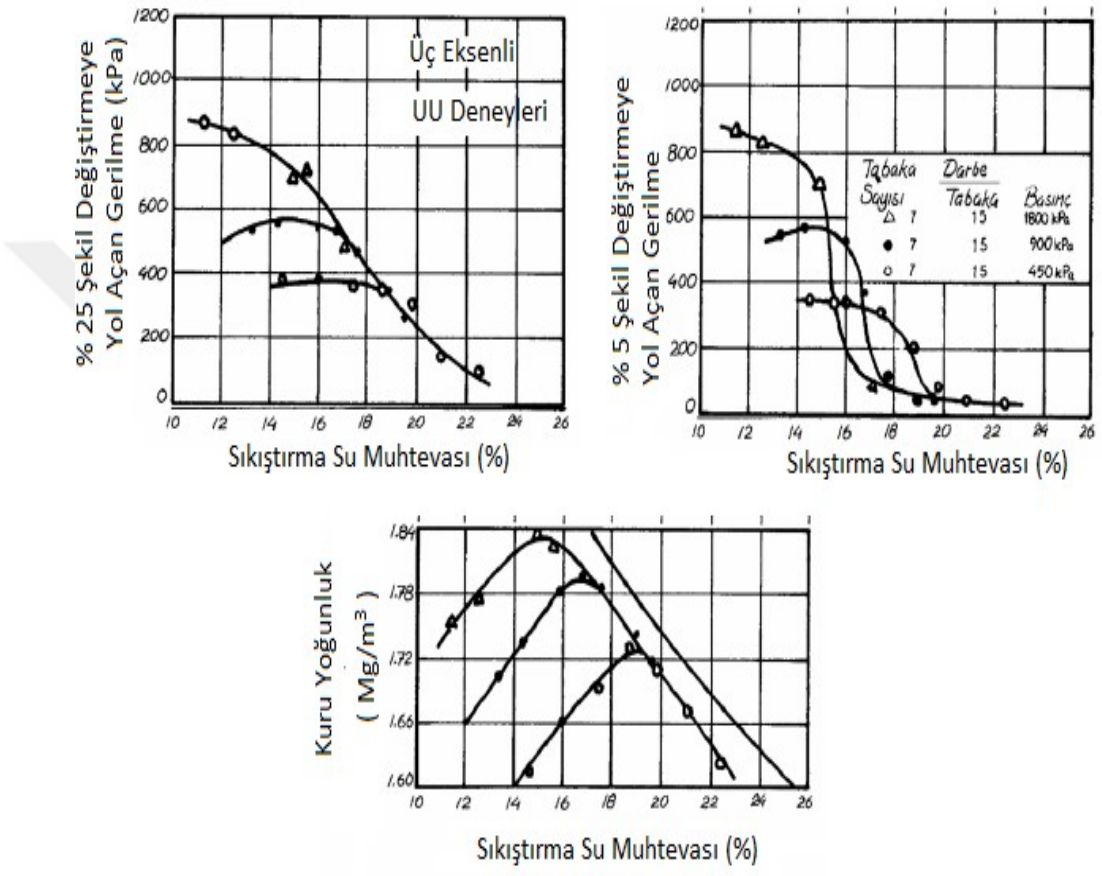
Şekil 2.3 Kompaksiyon yönteminin kohezyonlu zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisi [41]

Zeminlerin mukavemetine etki eden diğer önemli faktör ise yüklenme durumlarıdır. Yoğrulmalı bir siltli killi zeminin farklı üç kompaksiyon enerji uygulandığı durumda, %25 birim deformasyon için gerekli gerilme ve %5 birim deformasyon için gerekli gerilme düzeyleri Şekil 2.4'de görülmektedir. Optimumdan kuru tarafta sıkıştırılan zeminlerin mukavemetinde, kompaksiyon enerjisinin de yükselmesiyle artış meydana gelmektedir [42]. Optimumdan daha ıslak tarafta seçilen herhangi bir su muhtevası, yüksek sıkıştırma enerjilerinde %5'lik birim deformasyondaki gerilmenin daha düşük olduğu görülmektedir.

Optimum su muhtevasında kompakte edilen zeminlerde ise dayanım hemen hemen aynıdır. Bu yüzden optimumdan ıslak tarafta kompakte edilen kohezyonlu zeminlerde daha ağır kompaksiyon makineleri kullanmak bir alternatif olarak düşünülebilir. Fakat arazi kompaksiyonu esnasında yüksek sıkıştırma enerjileri uygulamak, boşluk suyu 29

basıncı artışlarına dolayısıyla, mukavemeti azaltıcı yönde hareket edeceği unutulmamalıdır [41].

Eğrilerin optimum kısımları incelendiğinde ise sıkıştırma enerjisi yükseldikçe, hem %25 ve %5 birim deformasyon için gereken gerilme miktarlarında artış gözlenmektedir.

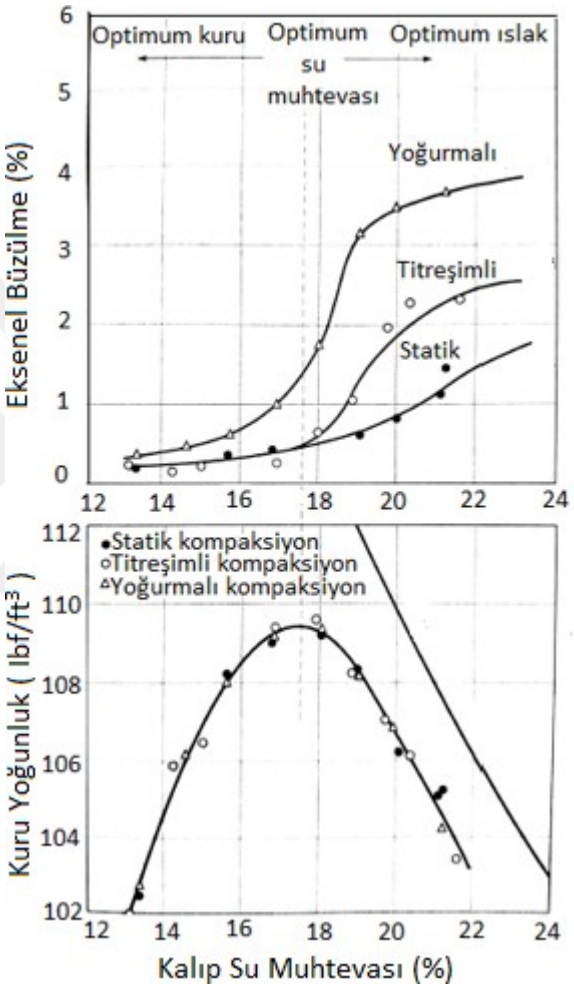


Şekil 2.4 Farklı kompaksiyon enerjisi ve su muhtevası oranlarının kohezyonlu zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti üzerine olan etkileri [42]

Sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin şişme ve büzülme özellikleri, dokularına bağlıdır ve bunların dokuları da optimum su muhtevasından ıslak veya kuruda kompakte edilmelerine göre değişkenlik göstermektedir.

Şekil 2.5'de görüldüğü üzere, optimumdan ıslak tarafta sıkıştırılan zeminler, optimumdan kuru tarafta sıkıştırılanlara göre daha büyük büzülme özelliğine sahiptirler. Şeklin üst kısmında da görüldüğü gibi, farklı kompaksiyon yöntemleri, farklı zemin dokuları oluşturduğundan büzülme miktarını etkilemektedir. Optimumdan kuru

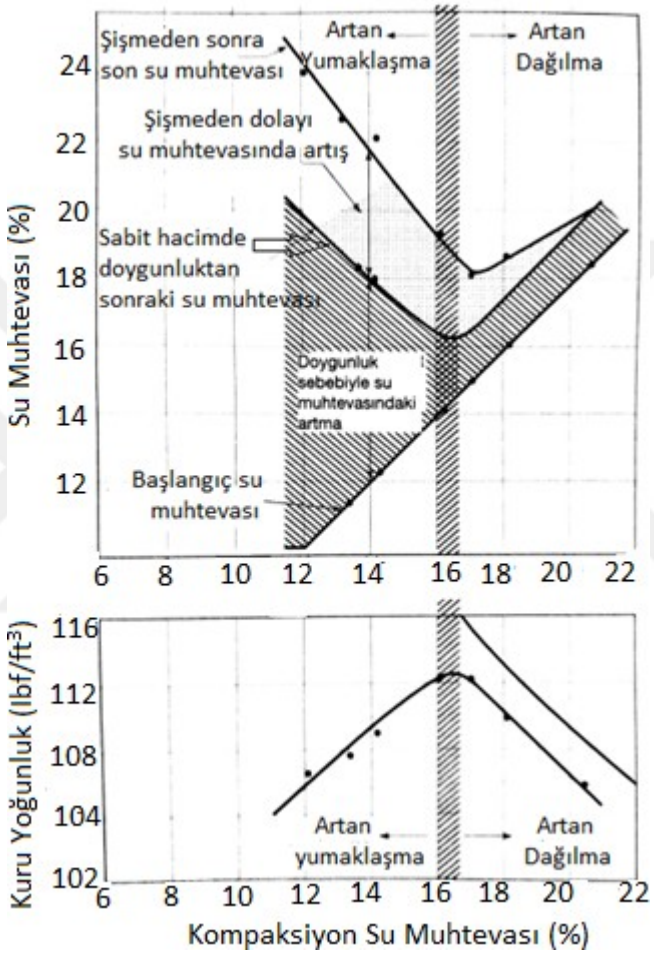
tarafta sıkıştırılmış zemin, optimumdan daha ıslak tarafta sıkıştırılmış zemin göre daha rastgele bir dokuya sahip olucaktır. Optimumdan daha kuru tarafta sıkıştırılan zeminlerin, relatif olarak daha fazla suya gereksinimleri mevcuttur. Yani; şişmeye olan eğilimleri daha fazladır. Zemin optimum su muhtevasından daha ıslak tarafta sıkıştırılırsa, genişleme yaklaşık olucaktır. Çünkü suya karşı olan çekim hemen hemen tatmin edilmiştir [42].



Şekil 2.5 Kohezyonlu sıkıştırılmış killerde büzülme olayının birer fonksiyonu olan, kompaksiyon yöntemi ve su muhtevasının etkileri [42]

Genellikle optimumdan ıslak tarafta kuru tarafa göre daha az şişme gözlenir ve bu Şekil 2.6'da standart proktor yöntemi ile kompakte edilmiş yüksek plastisiteli zemin için gösterilmiştir. Optimum su muhtevasının kuru tarafında kompakte edilen zeminler, su muhtevasındaki değişimlere karşı oldukça hassastır [1].

Kompakte edilmiş kohezyonlu zeminlerin şişme ve büzülme özellikleri görüldüğü üzere büyük ölçekte kompaksiyon su muhtevasına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Optimumdan kuru tarafta kompakte edilen kohezyonlu zeminlerin su ile temas etmesi halinde, optimumdan ıslak tarafta kompakte edilmiş kohezyonlu zeminlere göre daha fazla şişme göstermektedir. Optimumdan ıslak taraftaki kohezyonlu zeminler ise su kaybederek büzülme eğilimindedirler [41].



Şekil 2.6 Su muhtevası ve zemin yapısının yüksek plastisiteli bir kilin şişme potansiyeli üzerine etkisi [1]

Zeminin su muhtevasındaki değişimlerle meydana gelen hacim değişiklikleri ve mukavemet özelliklerinin yanı sıra, zeminlerin permeabilitesi de kompaksiyon su muhtevasında etkilenmektedir. Optimumdan kuru tarafta kompakte edilen zeminlerin permeabilitesi, optimumdan ıslak tarafta göre daha yüksek olmaktadır [41]. Optimum su muhtevasının ıslak ve kuru bölgelerinde kompakte edilmiş zeminler hakkında yapılan karşılaştırma Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Optimum su muhtevasının ıslak ve kuru tarafında kompakte edilen zeminlerin özelliklerinin karşılaştırılması [41]

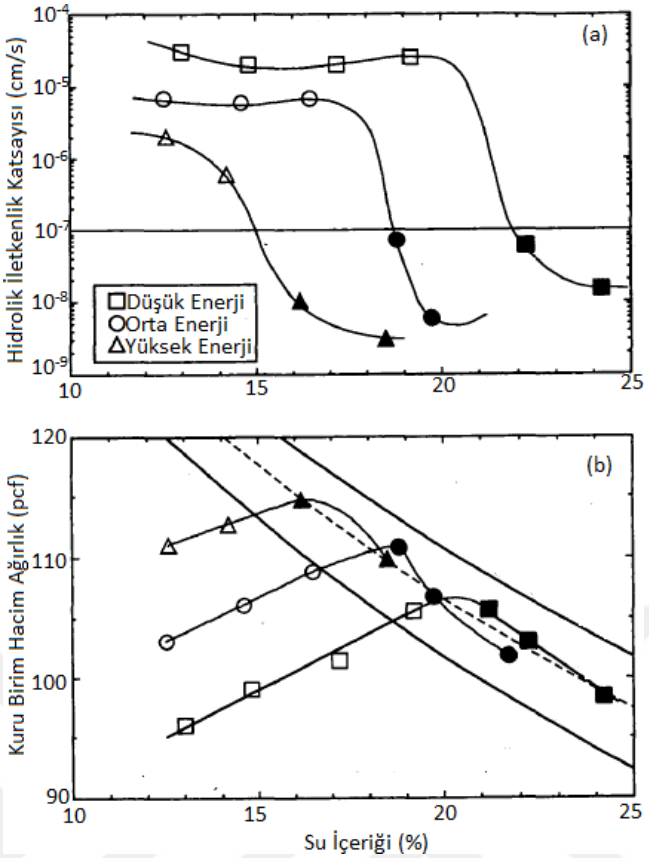
Sıkıştırılan Zemin Özelllikleri	Sıkıştırılan Zemin Özelliklerinin Karşılaştırılması
1. Zemin içyapısı	Optimumdan kuru tarafta gelişigüzel, optimumdan ıslak tarafta ise; sıralı dane yapısına sahiptir. Kuru tarafın içyapısı göçmeye daha müsait bir içyapıya sahiptir.
2. Permeabilite	Optimumdan kuru tarafın geçirgenliği daha yüksektir.
3. Sıkışabilirlilik	Optimumdan ıslak taraf düşük basınçlarda, optimumdan kuru tarafa göre daha yüksek sıkışabilirliğe sahiptir. Optimumdan kuru taraf daha hızlı sıkışır fakat; şişmeye olan eğilimi daha fazladır.
4. Mukavemet A.Kompaksiyon Su Muhtevasında A.1) Drenajsız Koşullar Altında:	Optimumdan kuru taraf daha yüksek
A.2) Drenajlı Koşullar Altında:	Optimumdan kuru taraf daha yüksek

Çizelge 2.2 Optimum su muhtevasının ıslak ve kuru tarafında kompakte edilen zeminlerin özelliklerinin karşılaştırılması [41] (devamı)

Sıkıştırılan Zemin Özellikleri	Sıkıştırılan Zemin Özelliklerinin Karşılaştırılması
B. Suya Doygun Hale Geldikten Sonra B.1) Drenajsız Koşullar Altında	Şişmeye izin verilmediği sürece, optimumdan kuru taraf, ıslak tarafa göre yüksek
B.2) Drenajlı Koşullar Altında	Hemen hemen aynı
C. Göçmede Boşluk Suyu Basıncı	Optimumdan ıslak taraf, kuru tarafa göre yüksek
D. Gerilme Deformasyon Modülü	Optimumdan kuru taraf daha yüksek
E. Sensitivite	Optimumdan kuru taraf daha yüksek

Sıkıştırılmış killer, genellikle toprak barajlarının çekirdeklerinde, toprak dolgularının kaplamalarında ve yüzey barajlarının kaplamalarında hidrolik bariyer olarak kullanılır. Hidrolik bariyerin temel amacı ise; akışı en aza indirgemek olduğundan, hidrolik iletkenlik (k) bir kontrol faktörüdür. Çoğu durumda, hidrolik iletkenliğin 10^{-7} cm/sn'den az olması tercih edilmektedir [44].

Hidrolik iletkenlik katsayısının, artan su içeriği ve kompaksiyon enerjisi ile azaldığı saptanmıştır [45]. Optimum su muhtevasında en yüksek, artan su muhtevası ile optimumdan ıslak tarafta en düşük değerine ulaşmaktadır. Aynı zamanda kompaksiyon enerjisinin artmasıyla büyük derece düşüş gözlenmektedir. Hidrolik iletkenlik katsayısının, yüksek oranlardan düşük oranlara olan değişimi ile optimum su muhtevasının kuru tarafından ıslak tarafına göre değişiminin uygulanan kompaksiyon enerjisi ile ilişkisi, zemin içerisindeki boşluk oranı ile yakından ilgilidir. Siltli kil zeminlerin permeabilitesi veya geçirgenlik özellikleri ile düşük, orta ve yüksek kompaksiyon enerjilerinin hidrolik iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Siltli kil bir zeminde kompaksiyon su muhtevası ile hidrolik iletkenlik arasındaki ilişki (a) ve kuru birim hacim ağırlık değeri ile kompaksiyon su muhtevası arasındaki ilişki (b) [45]

2.2 Kayma Mukavemeti Parametreleri

Kayma mukavemeti geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından biridir. Şve stabilitesi, istinat duvarı tasarımı, sığ veya derin temellerin taşıma gücü ve dolaylı olarakta yol kaplaması tasarımı kayma mukavemeti parametrelerinden büyük ölçüde etkilenmektedirler.

Olası bir kayma düzlemi boyunca kayma mukavemetinin aşılması neticesinde göçme oluşmaktadır. Fakat belirtilen bu düzlem herzaman maksimum kayma düzlemi değildir. Normal ve kayma gerilmelerinin beraber kayma düzlemine etkimesi sonucu göçme meydana gelmektedir [41]. Bir zeminin kayma mukavemetini ise nihai veya maksimum gerilmelere karşı gösterdiği direnç olarak tanımlayabiliriz [1].

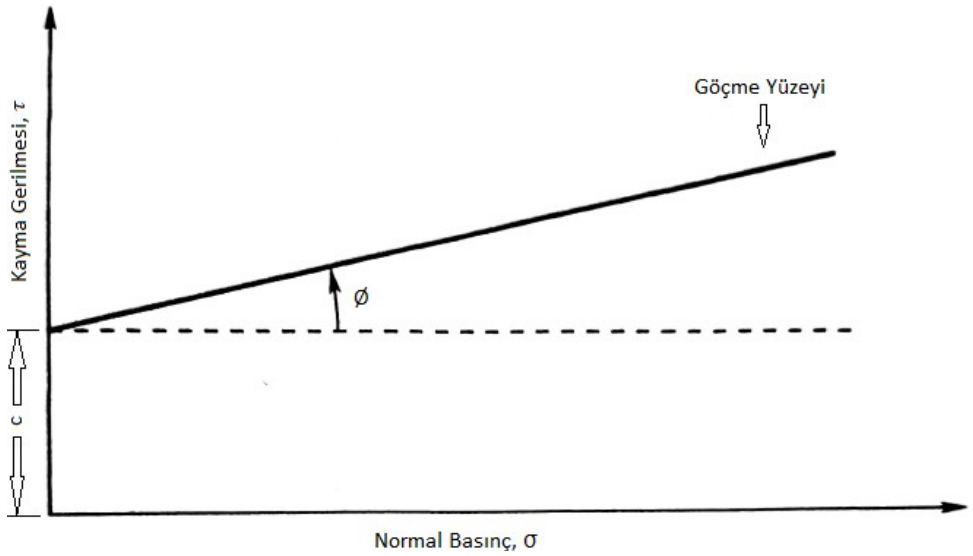
Kayma mukavemeti kavramı zeminlerin gerek kendi ağırlıklarından (jeolojik yükler) gerekse üst yapı yüklerinden kaynaklanan gerilme tarihçeleri başta olmak üzere, zaman ve arazide etkili olan koşullar gözönüne alınarak değerlendirilmelidir. Laboratuvar ortamında elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ise yükleme hızı, yükleme esnasında suyun zeminden çıkma kolaylığı derecesi vb. olmak üzere, deneyin gerçekleştirildiği şartlar ile orantılıdır [46].

Normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini gözönünde bulundurarak çeşitli hipotezler geliştirilmiştir. Fakat bu hipotezler içerisinde zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla Şekil 2.8'de verilen ve Fransız mühendis Coulomb (1776) tarafından önerilen Mohr-Coulomb göçme hipotezi yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 2.8'de verilen doğrunun düşey ekseni kayma gerilmeleri (τ), yatay ekseni normal gerilmeleri (σ) ifade etmektedir. Kayma mukavemeti ise; (2.4)' de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\tau = c+\sigma.\tan(Ø) \qquad (2.4)$$

Kayma mukavemeti parametreleri kohezyon değeri olarak ifade edilen (c), kayma mukavemeti açısı (Ø) olarak tanımlanmaktadır. Deney esnasında kullanılan yükleme miktarı ve drenaj koşullarına göre farklılık sergilediği için, belirli bir zemin için sabit değildirler.



Şekil 2.8 Mohr-Coulomb göçme zarfı [47]

Bu hipoteze göre bir zeminin kayma mukavemeti iki elemanın birleşimi olarak düşünülmelidir. İlk eleman zemin partiküllerinin birbirine tutunmasını sağlayan kohezyon (c),ikinci eleman ise; zemin partikülleri arasındaki sürtünme etkisidir [47]. Kohezyon (c)değerinin en yaygın bilinen açıklaması daneler arası tutunmayı sağlayan katsayı şeklindedir. Fakat bu katsayı aynı zeminde farklı yükleme koşulları altında çok farklı değerler alabilmektedir [41]. Boşluklu bir yapıya sahip olan zeminlerin, dane yüzeylerinin belirli bir düzlem yapısına sahip olmadığı bilinmektedir. Zemin danelerinin birbirlerine olan yönelimlerine engel olacak şekilde konumlanmasını sağlayan "Ø" değerine, sürtünme açısı haricinde başka niteliklerde yüklenmektedir. Bu yüzden "Ø"nin "sürtünme açısı" yerine "kayma mukavemeti açısı" olarak belirtilmesi daha uygun olmaktadır [48]. Bu açı değeri danelerin birbirlerine olan yönelimlerine engel olmakla beraber, kilitlenme etkisini içeren toplam direnci de temsil etmektedir [41].

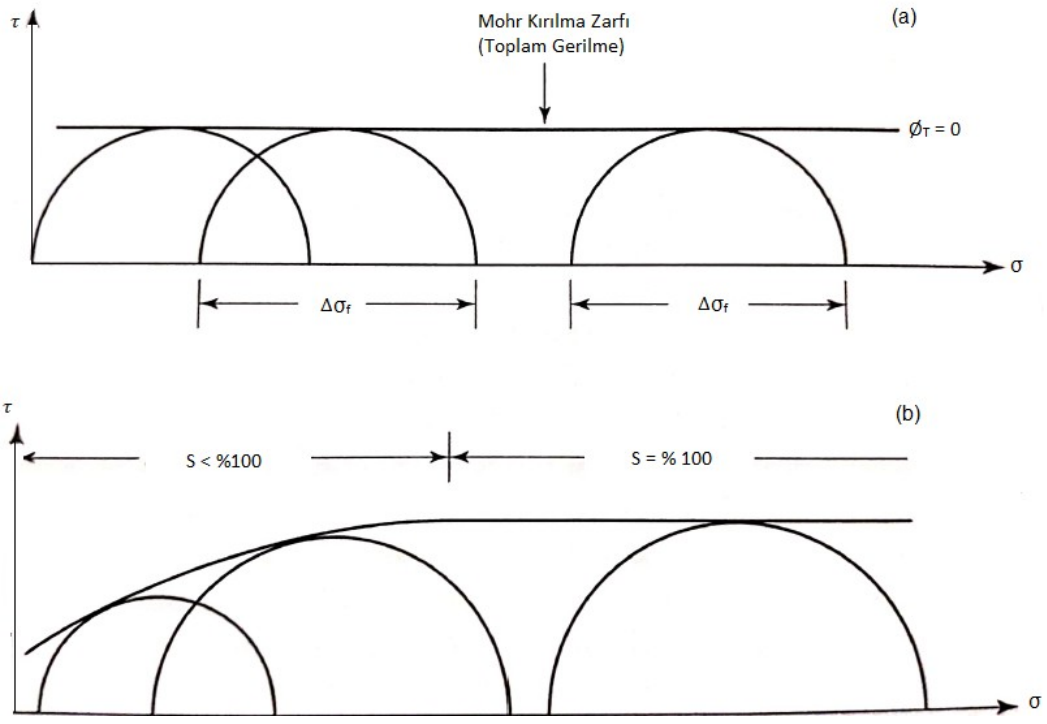
2.2.1 Sıkıştırılmış Killerin Mukavemeti

Kohezyonlu zeminleri mukavemet açısından değerlendirdiğimizde, jeolojik geçmişlerinin olması ve düşük geçirimliliğe sahip olmaları ile, kohezyonsuz zeminlerden ayrılmaktadırlar. Mukavemet parametrelerinin arazi koşullarına göre belirlenmesi ise; daha karmaşık ve zordur. Arazide yer alan kil tabakalarının mukavemet parametrelerini etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bu faktörler arasında; zeminin başlangıç gerilme durumu ve jeolojk geçmişi, gerilmelere neden olan yükleme ve drenaj koşulları, dane çapı dağılımı ve suya olan doygunluk derecesi yer almaktadır. Kohezyonlu zeminlerde mukavemeti etkileyen diğer parametreler ise kilin mineralojik yapısı, kil oranı, kıvam limitleri, numunenin kalitesi ve deney esnasında kesilme hızı, kilin yüksek su tutma kapasitesinden dolayı su emme miktarı vb. faktörler hem stabilite analizlerinde hem de tasarım esnasında dikkate alınmalıdır [49].

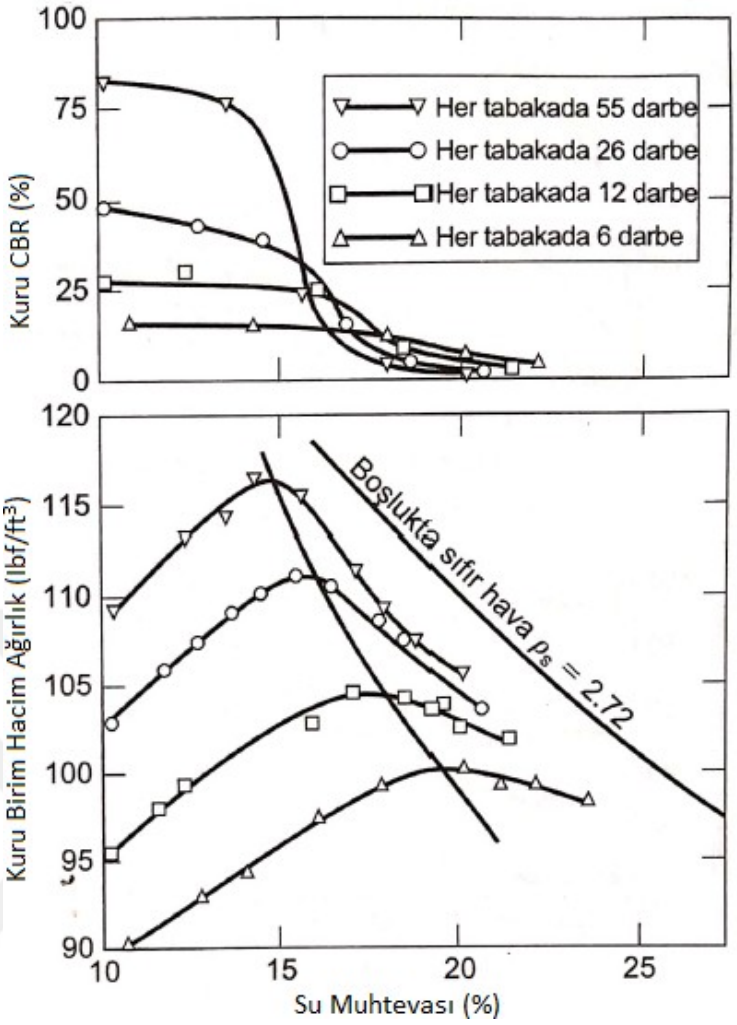
Zeminlerin suya doygunluk derecesi yeraltı su seviyesi ile ilişkilidir. Eğer zemin tabakaları yeraltı su seviyesinin altında yer alıyor ise suya doygun olarak tanımlanmaktadır. Fakat arazideki her zemin tabakası suya doygun değildir. Bu zeminlerin kayma mukavemeti açısından değerlendirilmesi oldukça karmaşık ve zordur. Suya doygun olmayan bu tarz zeminlerde kırılma zarfı her zaman doğrusal değildir.

%100 doygun killer için konsolidasyonsuz ve drenajsız (UU) deneylerine ait Mohr kırılma zarfı Şekil 2.9 (a)'da gösterilmiştir. Tamamen suya doygun ve aynı su içeriğine sahip kil numunelerde konsolidasyona da izin verilmediği için kayma mukavemeti aynıdır. Bu yüzden göçme anında tüm Mohr daireleri aynı çap ve yatay kırılma zarfına sahip olucaklardır. Doygun olmayan zeminler için konsolidasyonsuz ve drenajsız deneyler yapıldığında, hücre basıncından dolayı kil % 100 doygun oluncaya kadar, kırılma zarfının başlangıcı eğridir [1].

Şekil 2.10'da ise sıkıştırılmış bir zemin numunesinde uygulanan kaliforniya taşıma oranı deneyi ve kompaksiyon su muhtevası arasındaki ilişki görülmektedir. Bu deneyde darbeli yöntem ile sıkıştırılmış zemin numunesinde, yüksek sıkıştırma enerjilerinde optimumdan kuru tarafta yüksek CBR değerleri elde edilmiştir. Optimumdan ıslak tarafta ise bu değerin daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bu durum uygun tasarımlar ve sıkıştırılmış bir dolgu inşası için oldukça önemlidir.



Şekil 2.9 Konsolidasyonsuz ve drenajsız (UU) deneyleri için mohr kırılma zarfları: (a) % 100 doygun kil (b) doygun olmayan kil [1]



Şekil 2.10 CBR deneyi ile ölçülen darbeli sıkıştırma yöntemi için kuru birim hacim ağırlık ve su muhtevası ilişkisi [1]

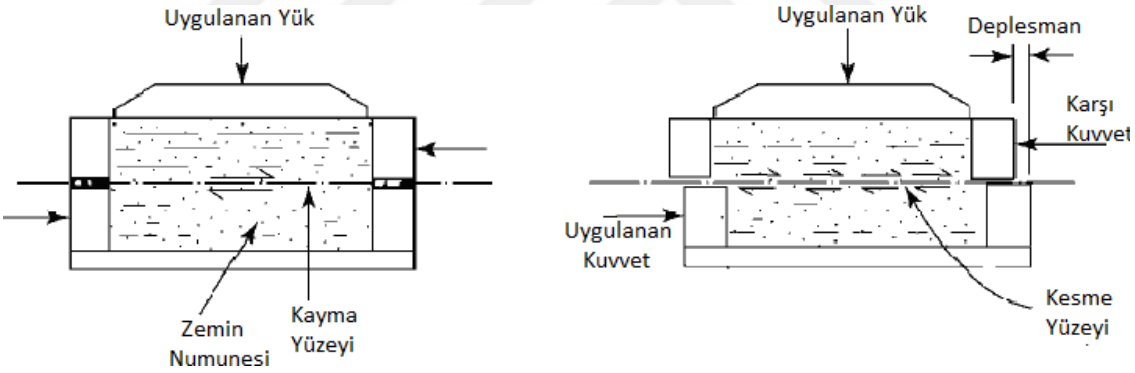
2.3 Kayma Mukavemetinin Deneysel Yöntemler İle Belirlenmesi

Zemin tabakalarının mühendislik özelliklerinin deneysel çalışmalar ile belirlenmesinde gözönünde bulundurulması gereken ilk kural, deney koşulları ile arazi koşulları arasındaki en yüksek benzerliği yakalayabilmektir. Zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesinde ise arazi koşullarında zeminin yüklenme öncesi durumunu yansıtan boşluk oranı ve su muhtevası ile değişkenlik gösteren konsolidasyon basıncı ve suya doygunluk derecesi, yükleme türüne bağlı hız değişimi ve drenaj koşullarıdır. Kısa süreli ve uzun süreli stabilite sorunlarına göre, yükleme ve drenaj faktörlerini birarada düşünmek gerekmektedir [41].

Kayma mukavemetini laboratuvar ortamında belirleyebilmek adına kullanılan başlıca deney yöntemleri serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi, laboratuvar veyn ve düşen koni deney yöntemleridir.

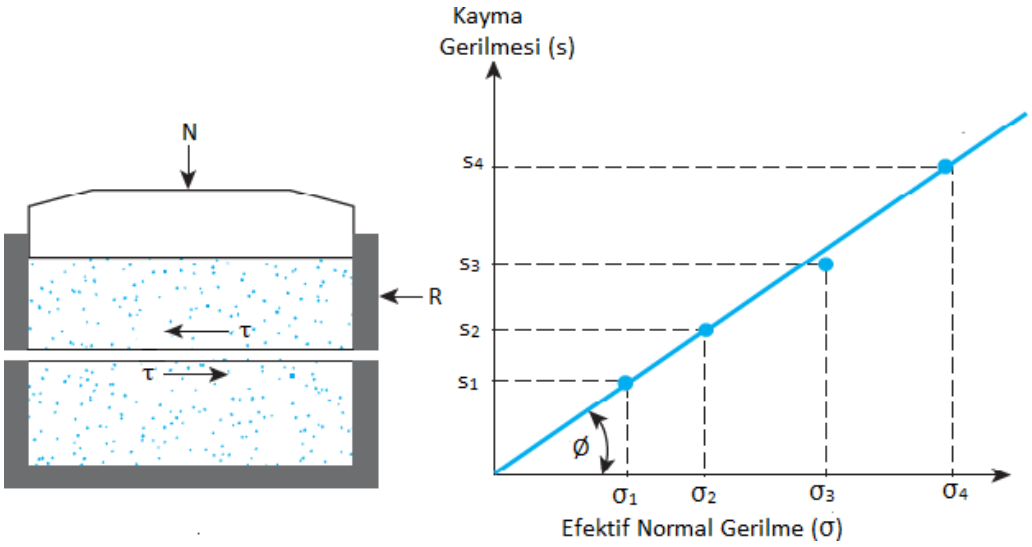
2.3.1 Kesme Kutusu Deneyi

Zemindeki toplam gerilmeler açısından, anında veya kısa süreli kayma dayanımını ölçmek için kullanılan en basit ve en eski deney yöntemidir. Prensip olarak göreceli bir hareket düzlemine, normal olarak sabit bir yük uygulanırken, zeminin bir kısmının sabit bir şekilde artan yatay kesme kuvveti ile bir diğer yarısına göre kayması için uygulanan "sürtünme açısı" testidir. Bu şartlar zeminin, iki yarı dikdörtgen veya dairesel kesitli metal parçadan oluşan kutuya yerleştirilerek elde edilir. Şekil 2.11'de de görüldüğü üzere, kutunun alt yarısı motorlu bir ünite kullanılarak itildiğinde veya çekildiğinde, üst yarıya göre kayabilirken, yük askısı ile desteklenen bir boyunduruk ile normal basınç uygulanmaktadır [46].



Şekil 2.11 Kesme kutusu deney cihazı [46]

Kesme kutusu deney sisteminde zeminin drenaj ve boşluk suyu basıncı kontrolü sağlanmaz. Bu yüzden drenajsız sitemler için uygun değil ve genellikle toplam gerilmelerin efektif gerilmelere eşit olduğu sınırlandırılmış drenajlı modellerde uygulanmaktadır. Şekil 2.12'de de görüldüğü üzere, normal yük üst kutunun orta noktasına uygulanır. Zemin daha önceden belirlenmiş olan yatay düzlem üzerinde kırılmakta ve meydana gelen yatay yerdeğiştirmeler Şekil 2.11'de verilen eğriler aracılığıyla hesaplanmaktadır [44].

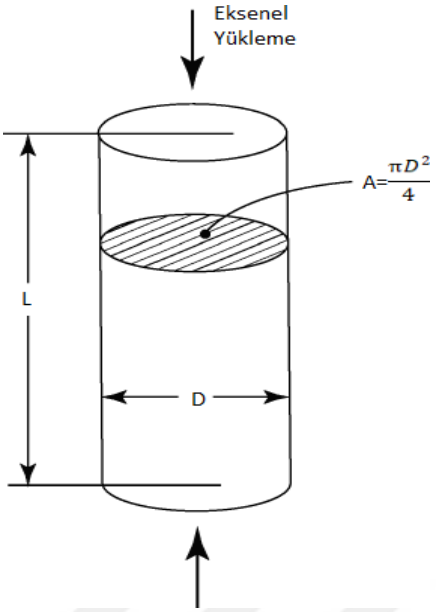


Şekil 2.12 Kesme kutusuna ait deney sonuçları [44]

2.3.2 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi yaygın olarak suya doygun killer ve diğer kohezyonlu zeminlerde mukavemeti belirlemek için kullanılır. Çap oranı/boy oranı d≤2h olacak şekilde veya yaygın olarak 38 mm veya daha fazla çap oranı seçilerek iki plaka arasına düşey ve silindirik numune yerleştirilerek sistem kurulur. Zemin dakikada %1 den %2 oranına kadar düşey gerilme üretecek şekilde aşamalı olarak yüklenir. Bu oran zeminin drenajına göre o kadar hızlıdır ki, numunede sızıdırmazlık sağlayan bir membran olmamasına rağmen, önemli bir hacim değişimi için zaman da yoktur. Serbest basınç deneyi, membran ile çevrilmiş, üç eksenli aparat içine yerleştirilmiş ve belli bir çevre basıncına maruz kalarak gerçekleştirilen, konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deneyinin özel bir türüdür. Uygulanan basınç veya eksenel yük altında, numunenin drenajına izin verilmez [50].

Silindirik bir zemin numunesi göçme meydana gelinceye kadar sürekli artan eksenel yüke tabi tutulur. Şekil 2.13'de de görüldüğü gibi, bu deney sisteminde eksenel yük, uygulanan tek kuvvet veya gerilmedir. Örnek bir kesme düzlemi boyunca veya şişerek göçme meydana gelene kadar Şekil 2.13'de de görüldüğü gibi düşey eksenel kuvvet uygulanır. Uygulanan yük artışları ile beraber düşey gerilme ve deformasyonlar ölçülmektedir.

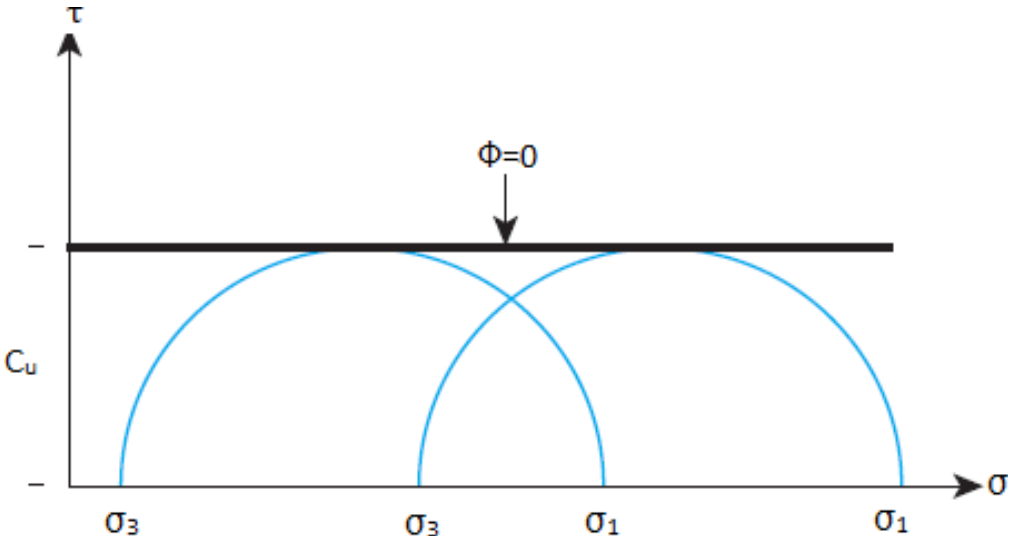


Şekil 2.13 Serbest basınç deneyinde silindirik zemin numunesine etkiyen yük [46]

Deney gerçekleştirilirken drenaj koşullarını kontrol altına alamadığımız için hızlı kesme yöntemi kullanılır. Hızlı yükleme sonunda zeminin drenajsız kayma mukavemeti eşitlik (2.5)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$C_u = 2q_u \qquad (2.5)$$

Şekil 2.14'de serbest basınç deneyi ile elden edilen mohr kırılma zarfı görülmektedir.



Şekil 2.14 Mohr kırılma zarfı [44]

2.3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Çapı minimum 38 mm ve yüksekliği çapın iki katı olacak d≤2h şekilde, silindirik zemin numunesinin yüzeyi, koruyucu bir membran ile kaplanır ve Şekil 2.15'de de görüldüğü gibi, alt ve üst yüzeylerine poroz diskler yerleştirilerek hücreye yerleştirilir. Membran kullanımının amacı zemin numunesi etrafındaki basınçlı suyun zemin boşluklarına girmemesini sağlamaktır. Hücreye yerleştirilen numunenin üst başlığı ile temas halinde olan piston, sabit bir hücre basıncında sabit bir eksenel yüklemeye olanak sağlamaktadır. Ortaya çıkan eksenel gerilme bir yük halkası ile okunur. Eksenel yükleme ile drenajlı deneylerde zemin numunesindeki hacim değişimi, drenajsız deneylerde ise boşluk suyu basıncı ölçülebilmektedir. Eksenel deformasyon numune göçme noktasına ulaşana denk devam eder. Numununenin alt ve üst yüzeylerine bağlı olan ince borular sayesinde, zeminin drenaj durumu kontrol edilebilmektedir. Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deneylerde, hücre basıncı ve eksenel yükleme esnasında suyun çıkışına izin verilmemektedir.

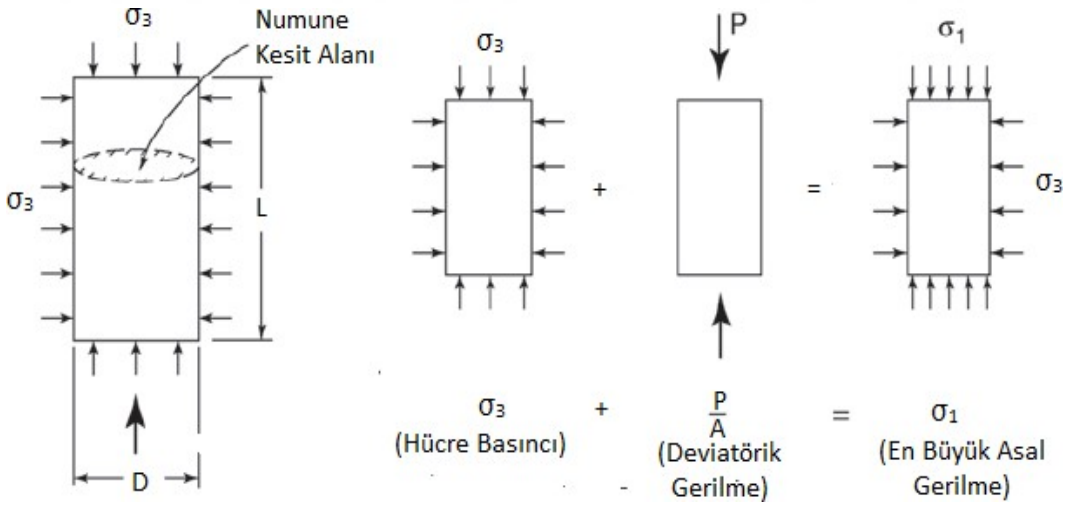
Şekil 2.16'da da görüldüğü gibi deney iki aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşama hidrostatik yüklemeyi, ikinci aşama ise; eksenel yüklemeyi temsil etmektedir. Farklı hücre basınçları kullanılarak zeminde göçme durumuna ulaşıncaya kadar kademeli bir şekilde eksenel yükleme uygulanmaktadır. Numune herhangi zayıf bir noktada göçmekte veya sadece bel vermektedir. Yükselen eksenel gerilme kademeleri mohr kırılma zarfında gösterilmektedir [46].

Suya doygun olmayan zeminlerde kayma mukavemetinin kompaksiyon su muhtevasına göre değişimi Şekil 2.17'de gösterilmektedir. Bu değişime göre zeminlerde en düşük kayma mukavemeti optimumdan ıslak tarafta, en yüksek kayma mukavemeti ise optimumdan kuru taraftagözlenmiştir.

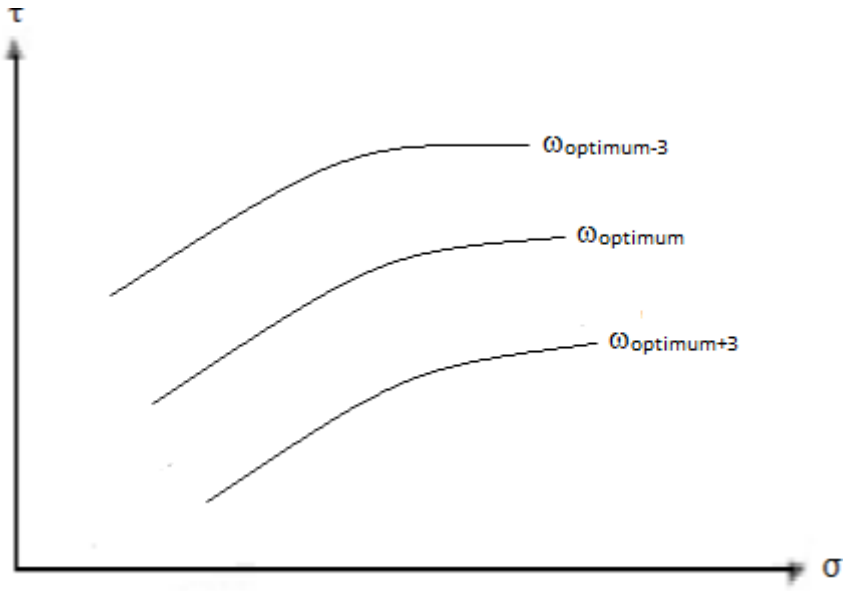
Mühendislik uygulamalarının kritik tasarımında kullanılan konsolidasyonlu drenajlı (CD) ve konsolidasyonlu drenajsız (CU) deneyleri gibi, konsolidasyonsuz drenajsız (UU) deneyi de kritik tasarım uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu tarz projelerde üst yapı yüklerinin zeminde oluşturacağı boşluk suyu basıncının sönümlenmesine veya konsolidasyonun oluşmasına izin verilmeyecek şekilde uygulanmaktadır.



Şekil 2.15 Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney sistemi



Şekil 2.16 Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deney sistemi [46]



Şekil 2.17 Kompaksiyon su muhtevasının kayma mukavemeti üzerine etkisi [41]

Seed ve Chan [42] zeminlerin sahip oldukları su içeriğinin, kilin yapısını ve gerilme deformasyon özelliklerini etkilediğini gözlemlemişlerdir. Optimumdan kuru tarafta kompakte edilen zeminler daha rijit ve sert bir yapıya sahip oldukları için; kayma direnci yüksektir.

Islak tarafta kompakte edilen zeminlerde ise daha düşük mukavemet ve CBR değerleri elde edilirken, kuru tarafta elde edilen CBR değerleri daha yüksektir.

BÖLÜM 3

ZEMİN PARAMETRELERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında; Esanplast, Esbka-7 ve Esbakas olarak adlandırılan numuneler kullanılmıştır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında esanplast, esbka-7 ve esbakas numuneleri, mineralojik farklılıklarından dolayı sırasıyla EP, ES-7 ve EK olarak adlandırılmıştır (EK A).

Zemin numuneleri gerçekleştirilecek deneye göre öğütülerek belirli elek aralıklarına göre eleme işlemine tabi tutulmuştur. Homojen hale getirilen numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek ve zemin sınıflandırılması için hidrometre, özgül ağırlık ve atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Mukavemet parametrelerine geçiş yapabilmek için standart proktor ve modifiye proktor yöntemleri ile kompakte edilen zeminlerin optimum su muhtevası ve bu değere denk gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlere göre $\omega_{optimum}$-3, $\omega_{optimum}$ ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevalarında kompakte edilen zeminlerden silindirik numuneler alınarak, konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli (UU) ve serbest basınç deneyi ile zeminin kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise; zeminin geçirgenlik özelliklerini belirleyebilmek adına sabit seviyeli permeabilite sistemi kurularak hidrolik iletkenlik katsayılarına farklı kompaksiyon enerjilerinin etkisi araştırılmıştır.

Üçüncü aşamada ise 3 farklı su muhtevasında kompakte edilen zeminler için CBR oranlarını belirlemek amacıyla deney düzenekleri kurulmuştur. 4 gün suda bekletildikten sonra deney değerlendirilmesi yapılmış ve CBR oranları belirlenmiştir.

Son aşamada ise referans optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerine göre 3 farklı su muhtevasında, CBR yaş deney metodu kullanılarak farklı kompaksiyon enerjilerinde sıkıştırılmştır. Sıkıştırılan numunelerin merkez noktalarından dış çapı 1 cm ve 2 cm boyutunda olan borular yardımıyla boşluklu bir yapı oluşturulmuştur. Oluşan boşluklar belirli relatif sıkılık, boşluk oranı ve belirli elek aralığına sahip kum malzeme ile doldurularak, laboratuvar ortamında bir kum dren modellemesi ile CBR değerlerine ve şişme yüzdelerine olan etkisi araştırılmıştır.

3.1 Zemin Numunelerinin Endeks Özellikleri

Zeminin fiziksel özelliklerini amacıyla hidrometre, özgül ağırlık ve atterberg kıvam limit deneyleri yapılmıştır ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre hangi grupta yer aldıkları belirlenmiştir.

3.1.1 Hidrometre Analizi

Hidrometre analizi, zemin partiküllerinin su içerisindeki sedimantasyonu ilkesine dayanmaktadır. Sedimantasyon veya hidrometre analizi 200 Nolu (75 μm) veya 2 μm boyutlarından daha ufak danelerin zemin içerisindeki dağılımını belirlemek için uygulanmaktadır. 152 H numaralı hidrometre aleti, 2 adet mezür (1000 ml), elektronik terazi, mekanik karıştırıcı ve sodyum hegzametafosfat ($NaPO_3$) kullanılmıştır. Analiz için; elek analizi sonucu 200 nolu elek altında kalan zemin numunesinden 50 gr ve 125 gr çözelti karıştırılarak 24 saat oda sıcaklığında 24 saat boyunca bekletilmiştir. 24 saatin sonunda ise; mekanik bir karıştırıcı yardımı ile karıştırılarak, 1000 ml'lik mezüre aktarılmış ve bu seviyeye kadar su eklenmiştir. 0.25 dk, 0.5 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk, 15 dk, 30 dk, 1 saat, 2 saat, 4 saat, 8 saat ve 24 saat dilimlerinde alınan okumalar kaydedilerek gerekli düzeltme ve hesaplamalar yapılmaktadır.

3.1.2 Özgül Ağırlık Deneyi

Özgül ağırlık zemin partiküllerinin yoğunluğunu hesaplamak için uygulanan bir yöntemdir. Bunun yanısıra boşluk oranı ve doygunluk derecesi gibi, zeminlerin faz ilişkileri arasında geçiş yaparken kullanılan bir parametredir. Deney kapsamında; 100 ml'lik piknometre şişesi, vakum aleti, piset ve 10 gr deney numunesi kullanılmıştır. Zemin içerisindeki kabarcıklar yok olana kadar, düz bir yüzeyde kabarcıklar yok olana kadar deneye devam edilmiştir. Bu işlem en az iki kez tekrarlanmış ve birbirine en yakın sonuçların ortalaması alınarak zeminin özgül ağırlık değeri belirlenmiştir. ES-7, EP ve EK deney numunelerine ait özgül ağırlık değerleri sırasıyla; 2,62 gr/cm^3, 2,64 gr/cm^3 ve 2,67 gr/cm^3 olarak hesaplanmıştır.

Hidrometre ve özgül ağırlık analizine göre ES-7, EP ve EK deney numunelerine ait dane çapı dağılımı sırasıyla %53 kil; %47 silt, %60 kil; %40 silt ve %60 kil, %40 silt malzeme oranlarına sahiptir.

3.1.3 Atterberg (Kıvam) Limitleri Deneyi

İnce daneli zeminlerde tipik mühendislik davranışlarının tespit edilmesinde kullanılan eşik su muhtevaları Atterberg limitleri olarak adlandırılmaktadır. Öezllikle ince daneli zeminler suyun varlığından büyük ölçüde etkilenmektedir. Zemin su muhtevalarındaki değişimler, plastisitenin yükselmesine neden olmaktadır ve bu değişimler Atterberg limitleri ile gözlenmektedir [1].

3.1.3.1 Likit Limit Tayini

Likit limit ve plastik limit tayini için deney numunesinden 150-200 gr malzeme, 40 nolu elekten elenmiştir. Likit limit tayini için Cagagrande deney aleti kullanılmıştır. Deney numunesi her kademede eklenen saf su ile casagrande aletine konulmuştur. Likit limit kabının sert bir kauçuk tabana 1 cm yükseklikten düşürülmesiyle 25 darbeye karşılık gelen su muhtevası değeri belirlenmiştir. Bu değer bize numunenin likit limit değerini vermektedir. Deney esnasında ilk 25 darbede zeminde oluşan yarığın yaklaşık 13 mm kapanması zor bir durumdur. Bu nedenle yukarıda anlatılan işlemler en az 3 defa farklı su oranlarında tekrarlanarak, 25 darbe üzerinde ve altında oluşan bu oluşan yarığın

kapanması sağlanmıştır. ES-7, EP ve EK deney numunelerine ait likit limit değerleri sırasıyla; %40, %42 ve %35 olarak hesaplanmıştır.

3.1.3.2 Plastik Limit Tayini

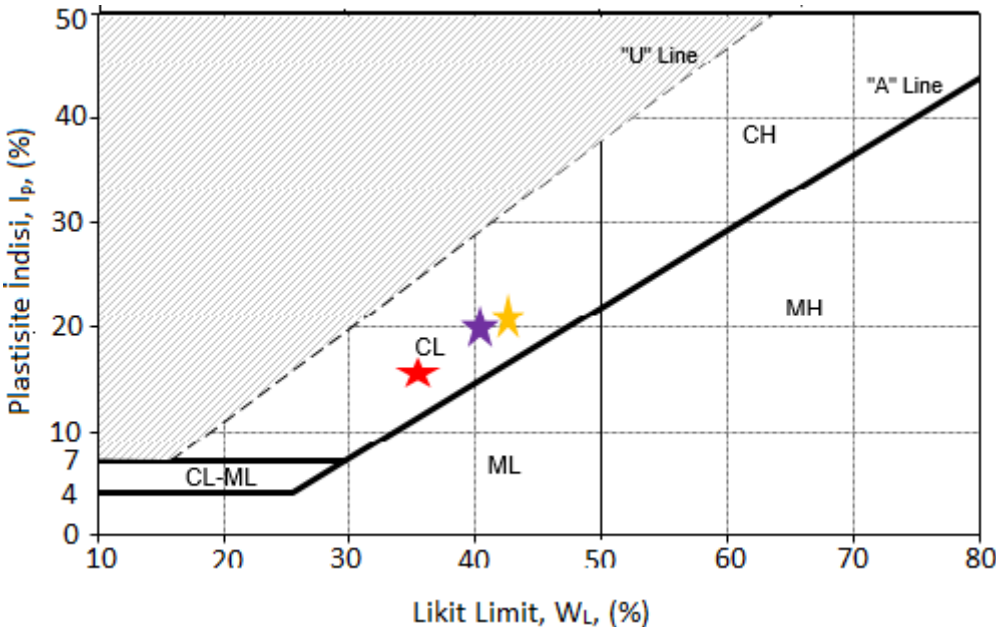
Düz ve cam bir yüzey üzerinde avuç içi veya parmaklar ile 3.2 mm çapa kadar yuvarlanan numunelerin yüzeyinde, çatlaklı yapılar görülmeye başlandığında zeminin plastik imit değeri elde edilmiştir. ES-7, EP ve EK deney numunelerine ait plastik limit değerleri sırasıyla; %19, %20 ve %13 olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen likit limit ve plastik limit değerleri ile (3.1)'de verilen bağıntı zeminin plastisite indisi hesaplanmaktadır.

$$I_P = W_L - W_P \qquad (3.1)$$

(3.1)'de verilen bağıntıya göre; ES-7, EP ve EK zemin numunelerinin plastisite indisi değerleri sırasıyla; %20, %21 ve %20 değerlerine sahiptirler. Gerçekleştirilen Atterberg (kıvam) limitleri deney sonuçlarına göre zeminlerin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi (USCS)'ne göre; düşük plastisiteli kil (CL) grububa dâhil oldukları tespit edilmiştir.

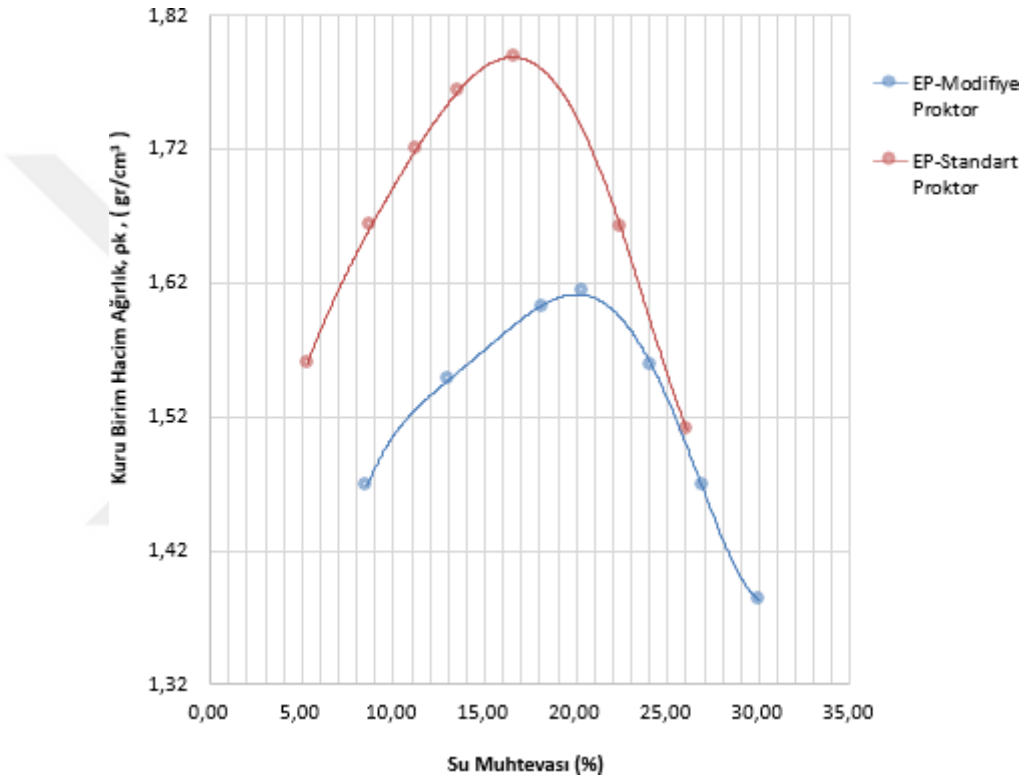
Zeminlerin Casagrande kartındaki konumları Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Deney numunelerinin casagrande kartındaki yerleri

3.2 Deney Numuneleri Üzerinde Gerçekleştirilen Kompaksiyon İşlemi

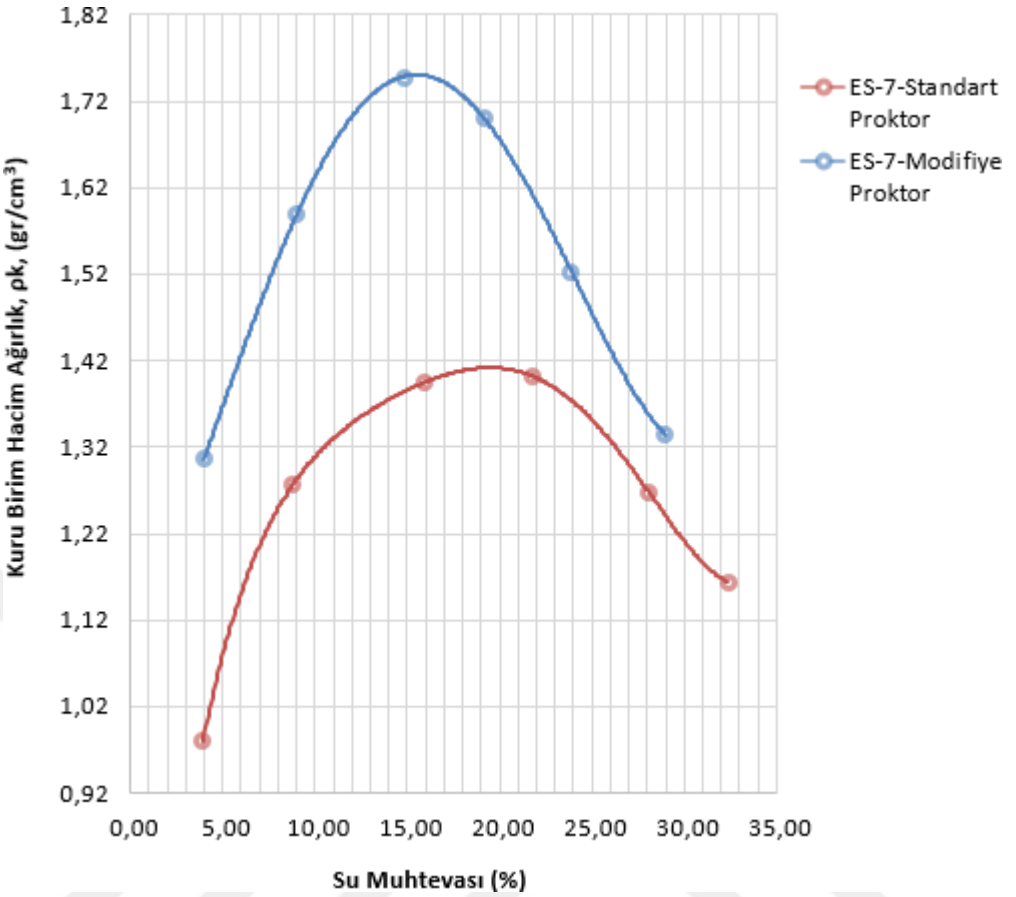
Çalışma kapsamında deney numunelerine 600 kJ/m^3 ve 2700 kJ/m^3 enerji uygulanarak optimum su muhtevası, kuru birim hacim ağırlık değerleri saptanmıştır. Hedeflenen deneyler için numuneler hazırlanarak deneye tabi tutulmuşlardır. Her iki kompaksiyon enerjisine göre EP, ES-7 ve EK deney numunelerine ait optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerlerini yansıtan kompaksiyon eğrileri sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 EP deney numunesine ait standart proktor ve modifiye proktor yöntemi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

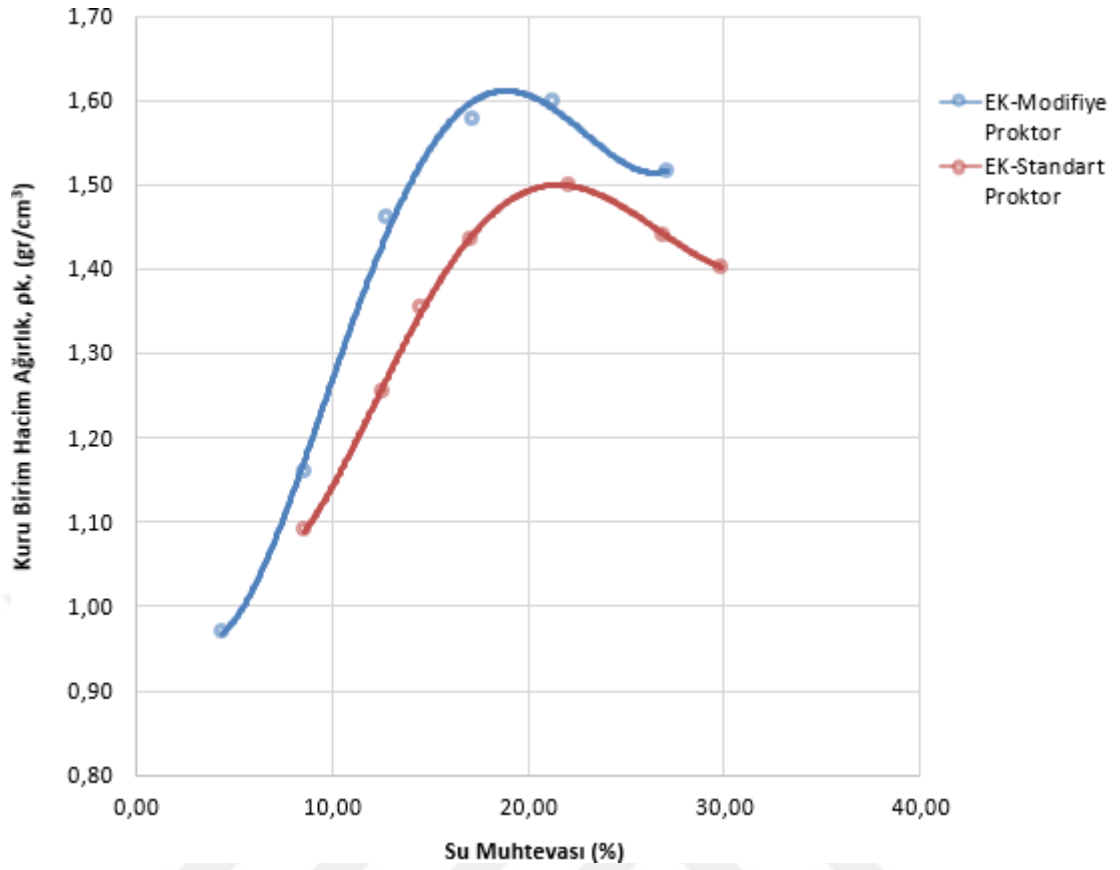
EP deney numunesinin 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri ile kompakte edilmesiyle elde edilen optimum su muhtevası ve bu değere denk gelen kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla; ω=%20 ve γ_k=1,61 gr/cm^3, ω=%16 ve γ_k=1,79 gr/cm^3 şeklindedir.

Şekil 3.3'de görüldüğü üzere ES-7 deney numunesine ait 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri ile elde edilen değerler sırasıyla; ω=%21 ve γ_k=1,40 gr/cm^3, ω=%15 ve γ_k=1,75 gr/cm^3 şeklindedir.



Şekil 3.3 ES-7 deney numunesine ait standart proktor ve modifiye proktor yöntemi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

Şekil 3.4'de ise; EK deney numunesine ait 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri ile elde edilen değerler sırasıyla; ω=%22 ve γ_k=1,50 gr/cm^3, ω=%17 ve γ_k=1,58 gr/cm^3 şeklindedir.



Şekil 3.4 EK deney numunesine ait standart proktor ve modifiye proktor yöntemi ile elde edilen optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık arasındaki ilişki

3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Kaliforniya taşıma oranı, permeabilite ve kayma mukavemeti parametrelerini belirleyebilmek adına her bir deney öncesi kullanılacak zemin 24 saat etüvde kalmıştır. Bu süreçten sonra numuneler soğuyana kadar bekletilmiştir. Belirlenen optimum su muhtevası ve zemine uygulanacak kompaksiyon enerjileri hesaplanarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) ve tek eksenli basınç deneyleri için 38 mm çap ve 100 cm yüksekliğe sahip, çelik ve ince cidarlı silindirik borular kullanılmıştır. Silindirik boruların içinden numunelerin kolay çıkarılabilmesi için; hidrolik krikolar ve vazelin kullanılmıştır. Çıkarılan numuneler su muhtevalarını koruyabilmeleri için deney gerçekleştirilene kadar desikatörde bekletilmiştir.

Tüm deneyler öncesi ve sonrası su muhtevaları için numuneler alınmış ve tartılarak teyit edilmiştir.

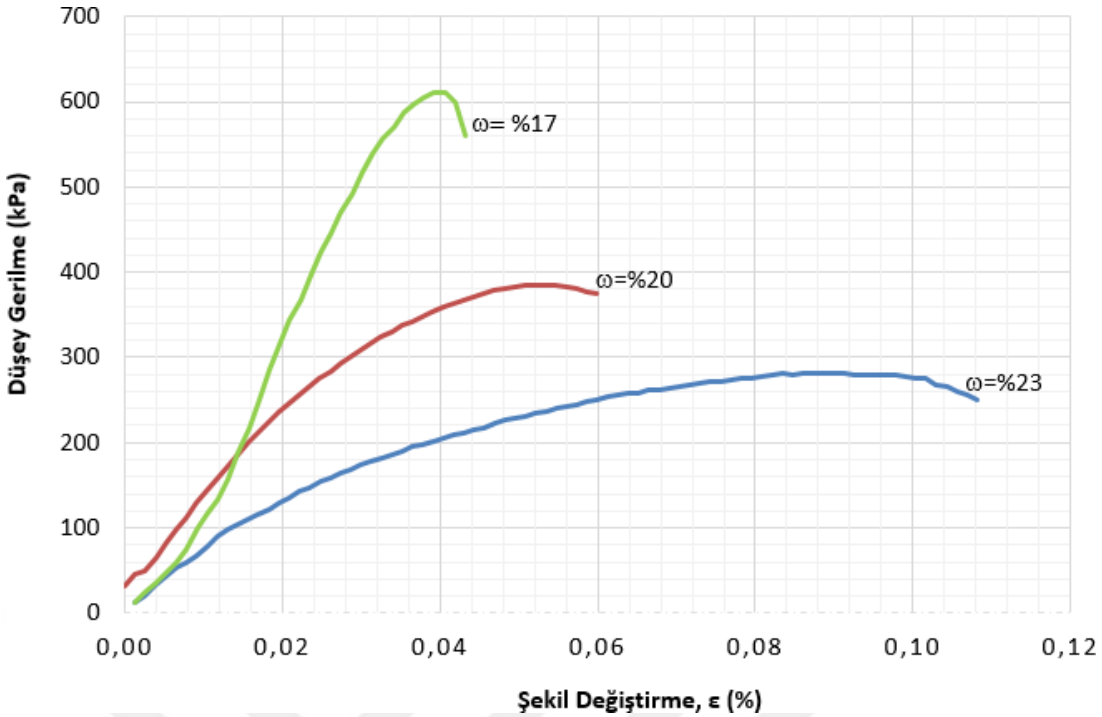
3.3.1 Kayma Mukavemeti Parametreleri

Zeminlerin kayma mukavemeti hakkında bilgi sahibi olmak adına serbest basınç deneyi ve konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deneyi gerçekleştirilmiştir. Her iki deney Yıldız Teknik Üniversitesi Kutay Özaydın Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri bir önceki konu başlığında bahsedildiği gibi hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur.

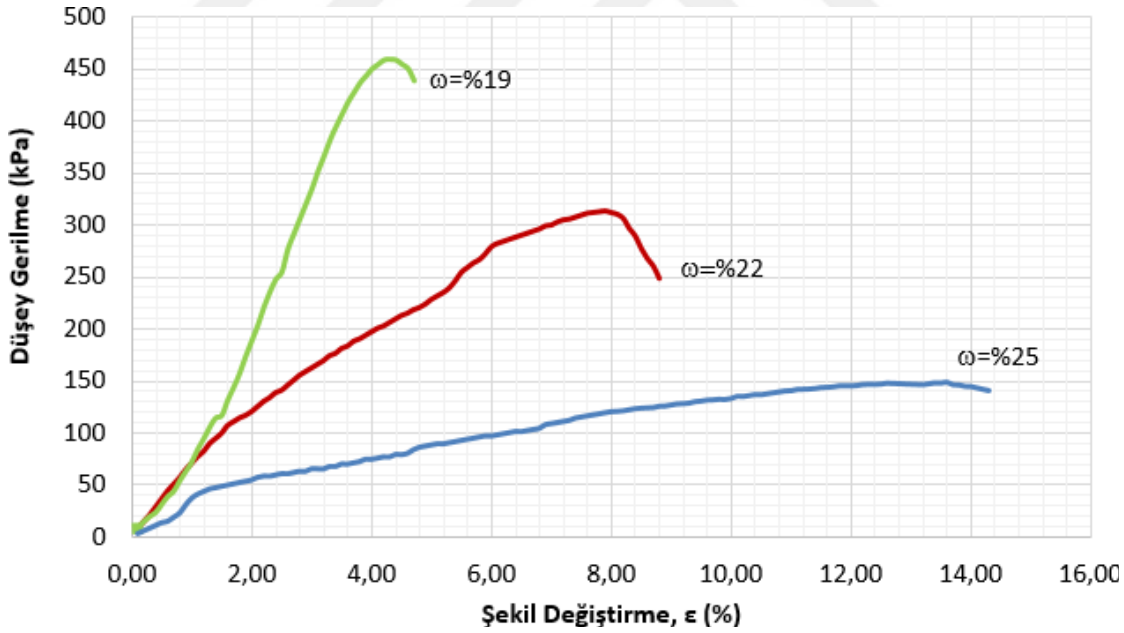
3.3.1.1 Serbest Basınç Deneyi Parametreleri

Düşük plastisiteli kil zeminlerin eksenel yükleme ile tek eksenli basınç dayanımı (q_u) hakkında bilgi sahibi olmak için gerçekleştirilmiştir.

İki farklı kompaksiyon enerjisi kullanılarak sıkıştırılan zeminlerden; $\omega_{optimum}$, $\omega_{optimum}$+3 ve $\omega_{optimum}$-3 su muhtevalarındaki muhtevalarındaki deney numuneleri, silindirik tüpler ile örselenmeden çıkarılmış ve deney gerçekleştirilmiştir. Standart proktor ile kompakte edilmiş EP ve ES-7 deney numunelerine ait gerilme şekil değiştirme davranışı sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5 Standart proktor yöntemi ile sıkıştırılan EP zemin numunesinin tek eksenli yükleme durumuna ait gerilme şekil değiştirme davranışı

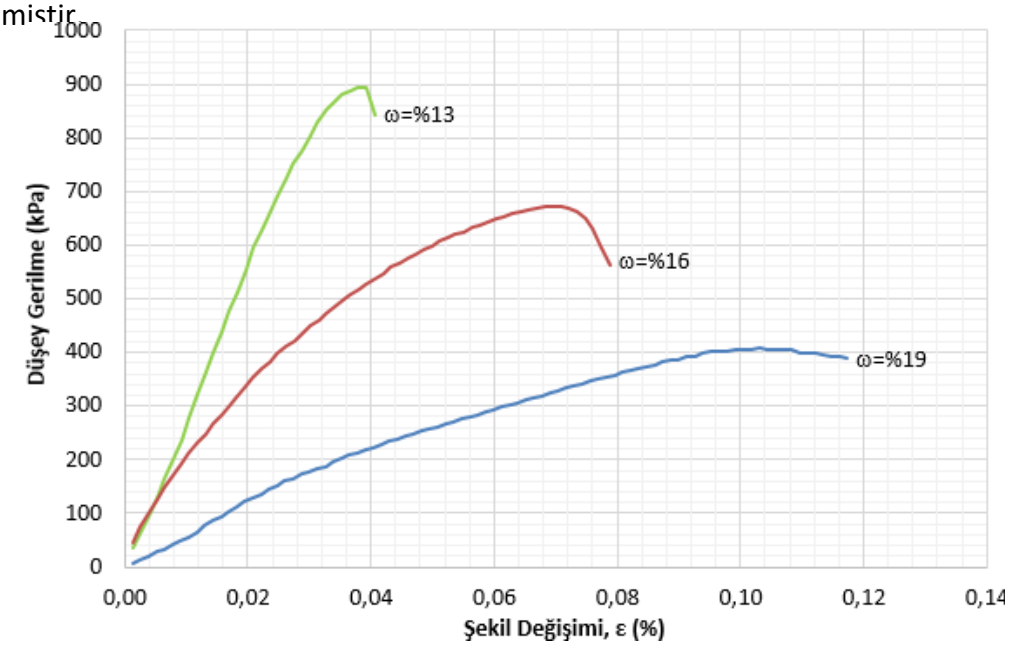


Şekil 3.6 Standart proktor yöntemi ile sıkıştırılan ES-7 zemin numunesinin tek eksenli yükleme durumuna ait gerilme şekil değiştirme davranışı

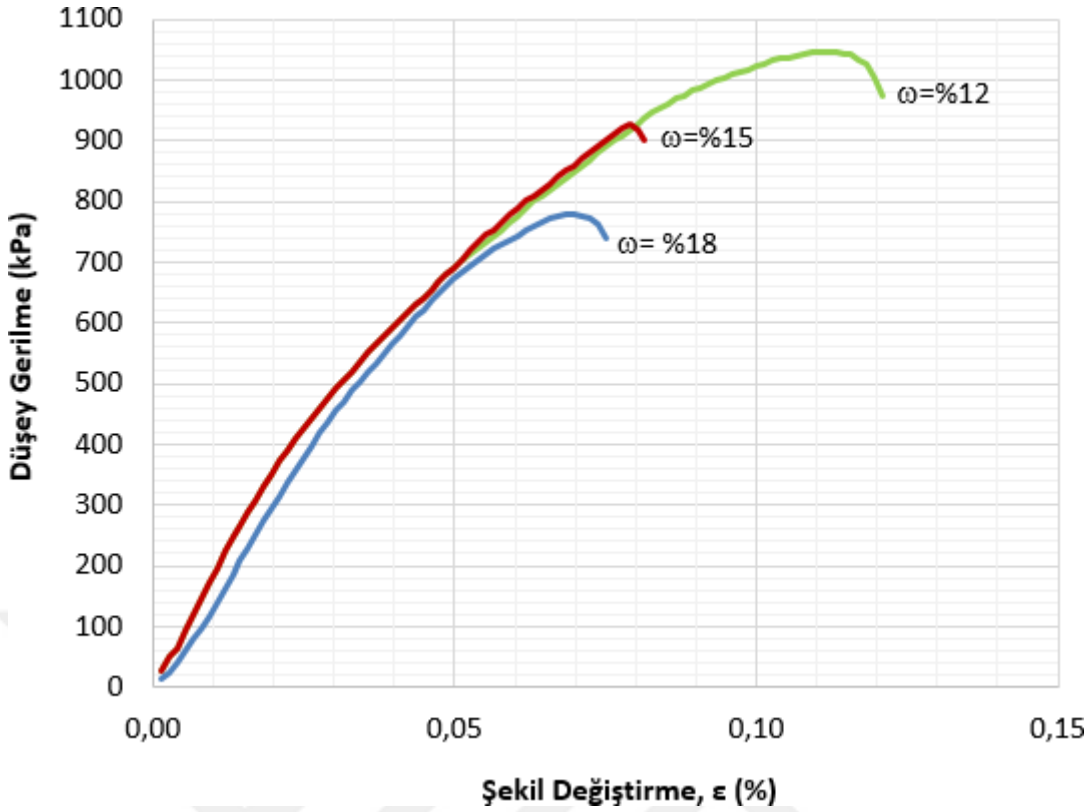
Zeminlerin serbest basınç mukavemeti (q_u) sıralaması $\omega_{optimum}$-3 > $\omega_{optimum}$ > $\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. Standart proktor ile kompakte edilmiş EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışları tek yönlü eksenel bir yükleme altında incelendiğinde; en yüksek serbest basınç mukavemet (q_u) değeri; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasına sahip tarafta iken; 611 kPa, bağıntı (2.5)'e göre ise drenajsız kayma mukavemeti değeri (c_u) 305 kPa değerindedir. $\omega_{optimum}$ su muhtevasında ise q_u değeri 385 kPa ve c_u değeri ise; 192 kPa değerlerine sahiptir. $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; q_u 281 kPa olup en düşük serbest basınç mukavemetine sahiptir ve c_u değeri bağıntı (2.5)'e göre 140 kPa şeklindedir.

ES-7 deney numunesi içinde yukarıdaki koşullar geçerli olup, en yüksek serbest basınç mukavemeti (q_u) değeri $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında; 458 kPa olup, drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değeri ise 229 kPa şeklindedir. En düşük q_u değeri $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında olup, c_u değeri 149 kPa olup, c_u değeri 74 kPa şeklindedir. $\omega_{optimum}$ su muhtevasında ise q_u değeri 314 kPa, c_u değeri ise; 157 kPa şeklindedir.

Modifiye proktor ile kompakte edilen EP ve ES-7 deney numunelerinin tek eksenli yükleme altındaki gerilme şekil değiştirme davranışları sırasıyla; Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir.



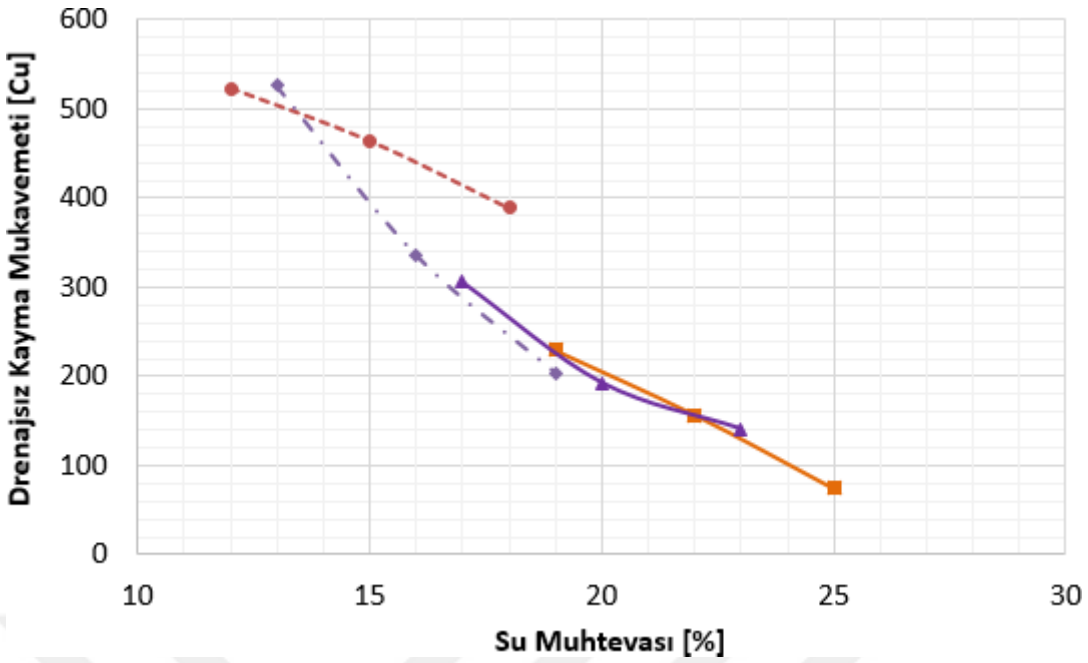
Şekil 3.7 Modifiye proktor yöntemi ile sıkıştıran EP zemin numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışı



Şekil 3.8 Modifiye proktor yöntemi ile sıkıştırılan ES-7 zemin numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışı

2700 kJ/m^{3}'lük enerji kullanılarak kompakte edilen zeminler için Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 incelendiğinde zeminlerin serbest basınç mukavemeti (q_u) sıralaması $\omega_{optimum}$-3 > $\omega_{optimum}$ > $\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. ES-7 deney numunesine ait en yüksek serbest basınç mukavemeti (q_u) değeri $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasına sahip tarafta 1045 kPa olup, bağıntı (2.5)'e göre drenajsız kayma mukavemeti değeri (c_u) ise 523 kPa'dır. Kompaksiyon enerjisinin yükselmesiyle, $\omega_{optimum}$-3 tarafta, c_u değerinde yaklaşık %44 oranında artış gözlenmiştir.

EP deney numunesi içinde en yüksek serbest basınç mukavemeti (q_u) değeri ise; $\omega_{optimum}$-3 tarafında olup 895 kPa, drenajsız kayma mukavemeti (c_u) değeri ise 448 kPa olarak hesaplanmıştır. Kompaksiyon enerjisinin yükselmesi ile $\omega_{optimum}$-3 tarafta kayma mukavemet değerlerinde yaklaşık %31 artış gözlenmiştir.



Şekil 3.9 Zeminlerin kompaksiyon enerjisindeki değişime göre su muhtevası (W_n) ve drenajsız kayma mukavemeti (C_u) arasındaki ilişki

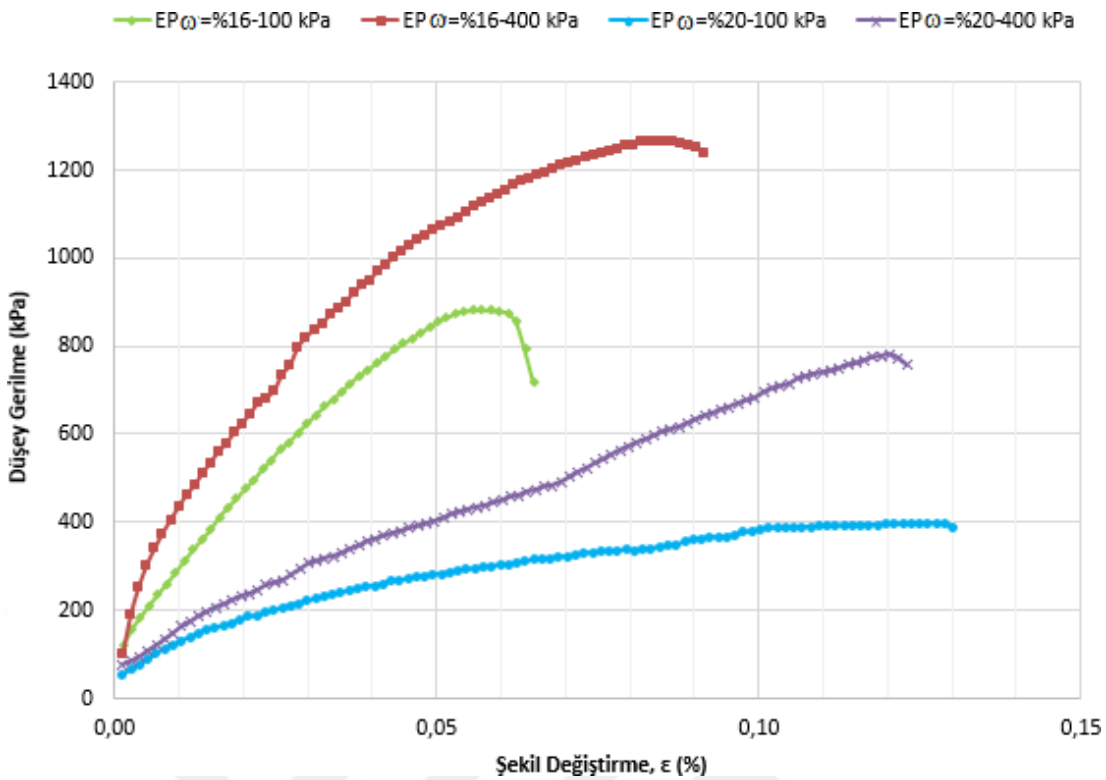
3.3.1.2 Üç Eksenli Basınç Deney Parametreleri

Deneye tabi tutulacak silindirik numunelerin hazırlanma aşamasına yukarıda değinilmişti. Tek eksenli yüklemeden farklı olarak, hazırlanan silindirik numune üzerine hidrostatik basınç uygulanmaktadır. Eksenel yükleme esnasında zeminden su çıkışına ve belirli gerilmeler altında konsolidasyona imkân verilmemektedir. Kesme işlemi "ani" diğer bir deyiş ile "hızlı" gerçekleşmektedir.

3.3.1.2.1 EP Deney Numunesine Ait Üç Eksenli Deney Sonuçları

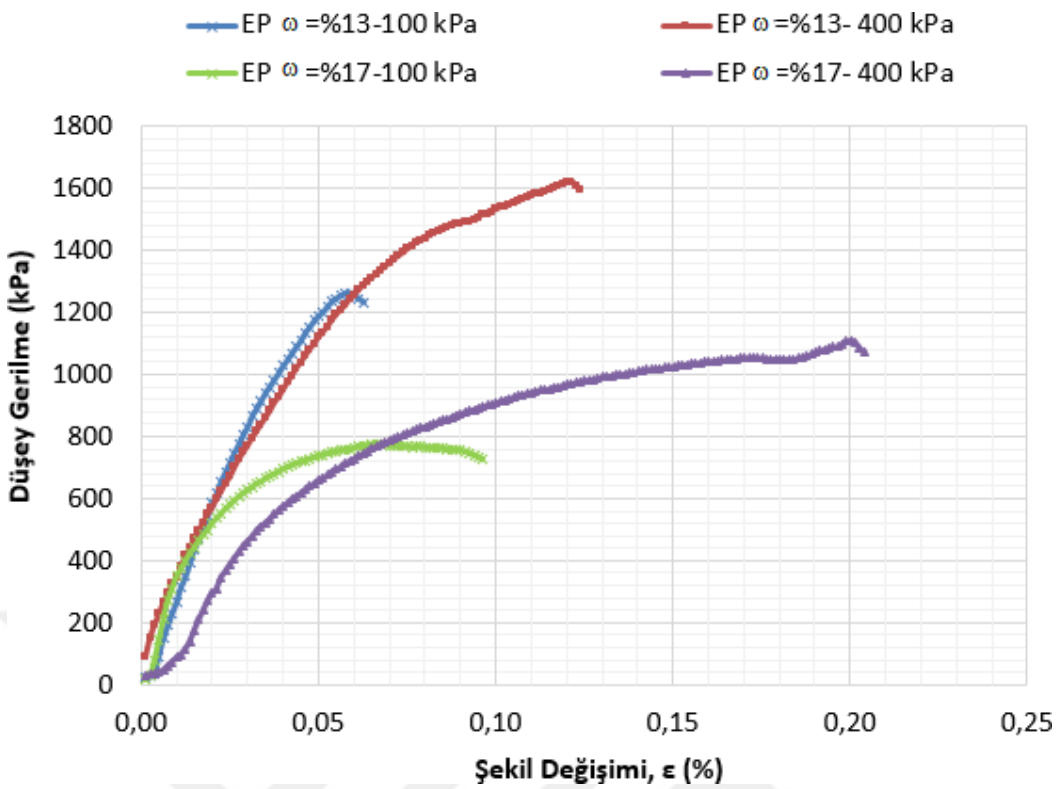
Suya doygun olmayan kil zeminlerin kayma mukavemeti; zemin yapısına, dane büyüklüğüne, başlangıç su muhtevasına ve sıkıştırma yöntemine göre farklılık göstermektedir.

100 kPa ve 400 kPa'lık basınçlar altında numunelerin kayma mukavemeti parametreleri değerlendirilmiştir. Standart proktor ve modifiye proktor ile kompakte edilen EP deney numunelerine ait gerilme şekil değiştirme parametrelerine su muhtevasının etkisi Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.10 EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$ ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri

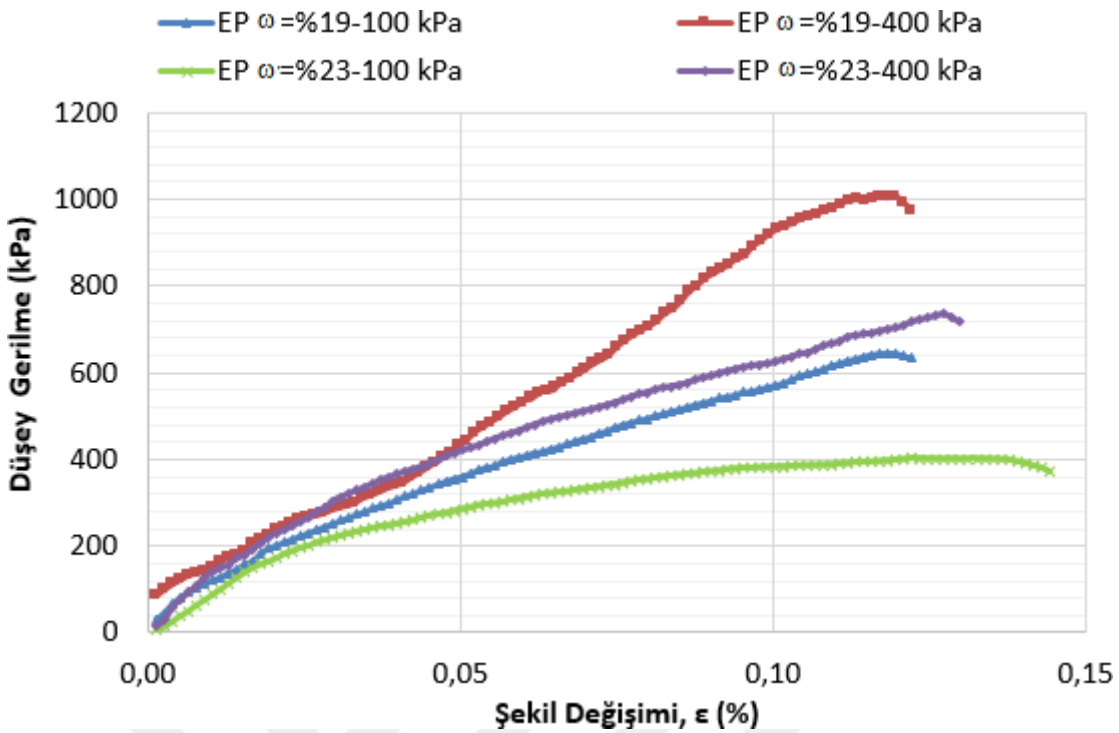
Kompaksiyon su muhtevasının $\omega_{optimum}$ tarafında standart ve modifiye kompaksiyon enerjilerinin drenajsız kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri sırasıyla kıyaslandığında 100 kPa deviatörik basınç altında; 398 kPa'dan 883 kPa'lık numune gerilmesine, 400 kPa'lık deviatörik basınç altında ise; 1051 kPa'dan 1269 kPa'a kadar arttığı Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.11 EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$-3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri

Şekil 3.11'de verilen grafik incelendiğinde, gerilme şekil değiştirme davranışına etki eden 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kıyaslandığında, kompaksiyon su muhtevasının $\omega_{optimum}$-3 tarafında gerçekleştirilen konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deneyinde 100 kPa'lık deviatörik basınç altında 775 kPa'dan 1259 kPa'lık numune gerilmesine, 400 kPa'lık deviatörik basınç altında ise; 1052 kPa'dan 1620 kPa'a kadar artış meydana geldiği Şekil 3.11'de görülmektedir.

Kompaksiyon su muhtevasının $\omega_{optimum}$+3 tarafı incelendiğinde 100 kPa ve 400 kPa deviatörik basınçlar altında minimum düzeyde değişim gözlenmektedir. Standart ve modifiye kompaksiyon enerjilerine göre sırasıyla 100 kPa için; 402,30 kPa'dan 570,97 kPa'a, 400 kPa için ise 735,40 kPa'dan 1005 kPa'a kadar artış meydana geldiği Şekil 3.12'de görülmektedir.

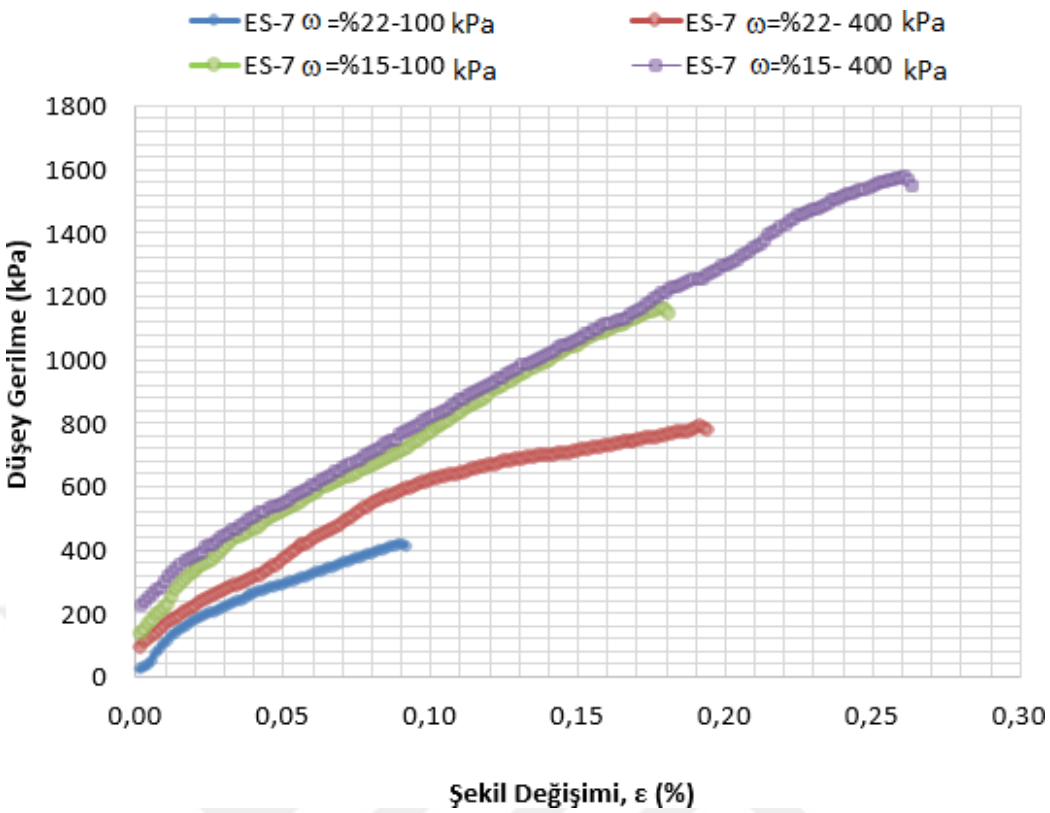


Şekil 3.12 EP deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$+3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri

3.3.1.2.2 ES-7 Deney Numunesine Ait Üç Eksenli Deney Sonuçları

100 kPa ve 400 kPa'lık basınçlar altında numunelerin kayma mukavemeti parametreleri değerlendirilmiştir. Standart proktor ve modifiye proktor ile kompakte edilen ES-7 deney numunelerine ait gerilme şekil değiştirme parametrelerine su muhtevasının etkisi Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de verilmiştir.

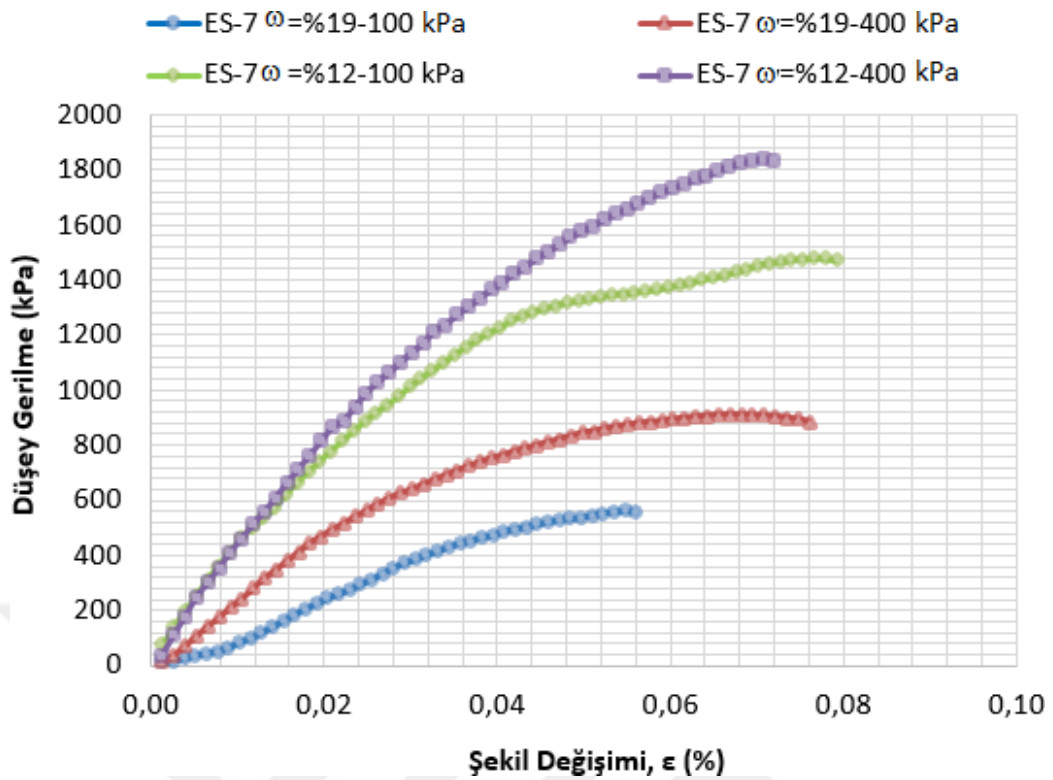
Kompaksiyon su muhtevasının $\omega_{optimum}$ tarafında standart ve modifiye kompaksiyon enerjilerinin drenajsız kayma mukavemeti parametreleri üzerindeki etkileri sırasıyla kıyaslandığında 100 kPa deviatörik basınç altında; 419 kPa'dan 1165 kPa'lık numune gerilmesine, 400 kPa'lık deviatörik basınç altında ise; 790 kPa'dan 1580 kPa'a kadar arttığı Şekil 3.13'de görülmektedir.



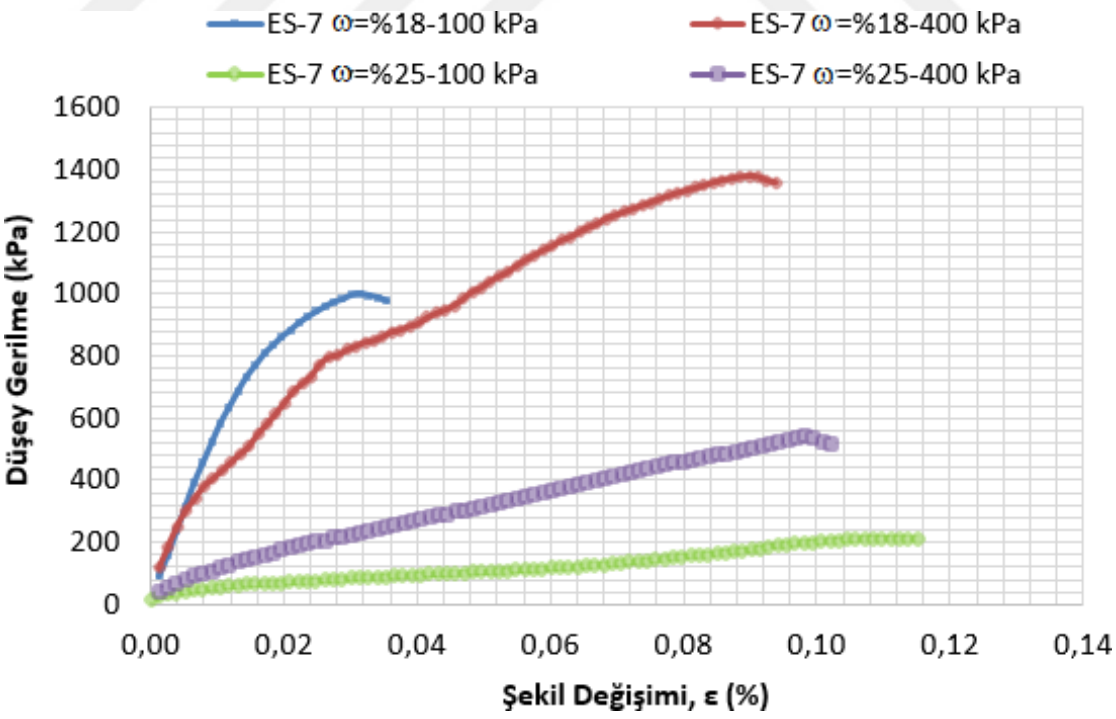
Şekil 3.13 ES-7 deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$ ve farklı deviatörik gerilmelerin etkileri

Kompaksiyon su muhtevasının $\omega_{optimum}$-3 tarafında gerçekleştirilen konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU)deneyinde, gerilme şekil değiştirme davranışına etki eden standart ve modifiye kompaksiyon enerjileri sırasıyla kıyaslandığında, 100 kPa'lık deviatörik basınç altında gerilme değerleri; 562 kPa'dan 1286 kPa'a, 400 kPa'lık basınç altında ise 1480 kPa'dan 1840 kPa'a kadar artış Şekil 3.14'de görülmektedir.

Şekil 3.15'de de görüldüğü üzere, kompaksiyon su muhtevasının $\omega_{optimum}$+3 tarafında gerçekleştirilen konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU)deneyinde, gerilme şekil değiştirme davranışına etki eden standart ve modifiye kompaksiyon enerjileri sırasıyla kıyaslandığında, 100 kPa'lık deviatörik basınç altında; 213 kPa'dan 1000 kPa'a, 400 kPa'lık basınç altında ise 541 kPa'dan 1380 kPa'a kadar artış görülmektedir.

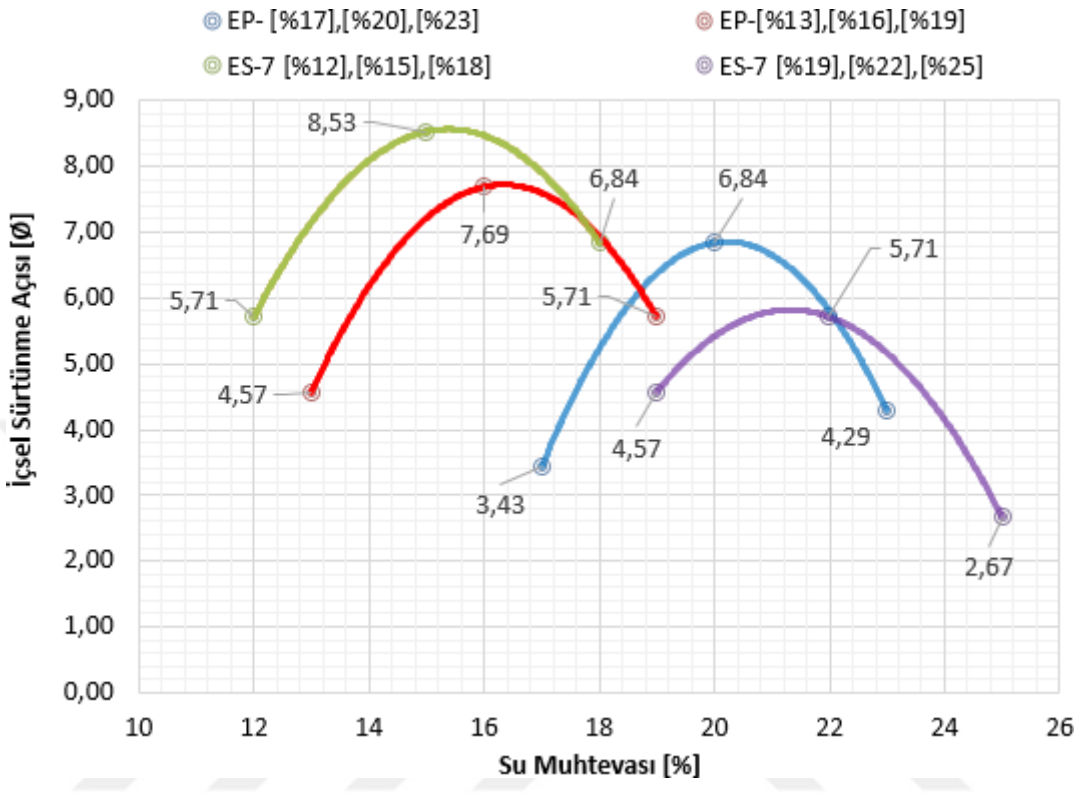


Şekil 3.14 ES-7deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$-3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkisi



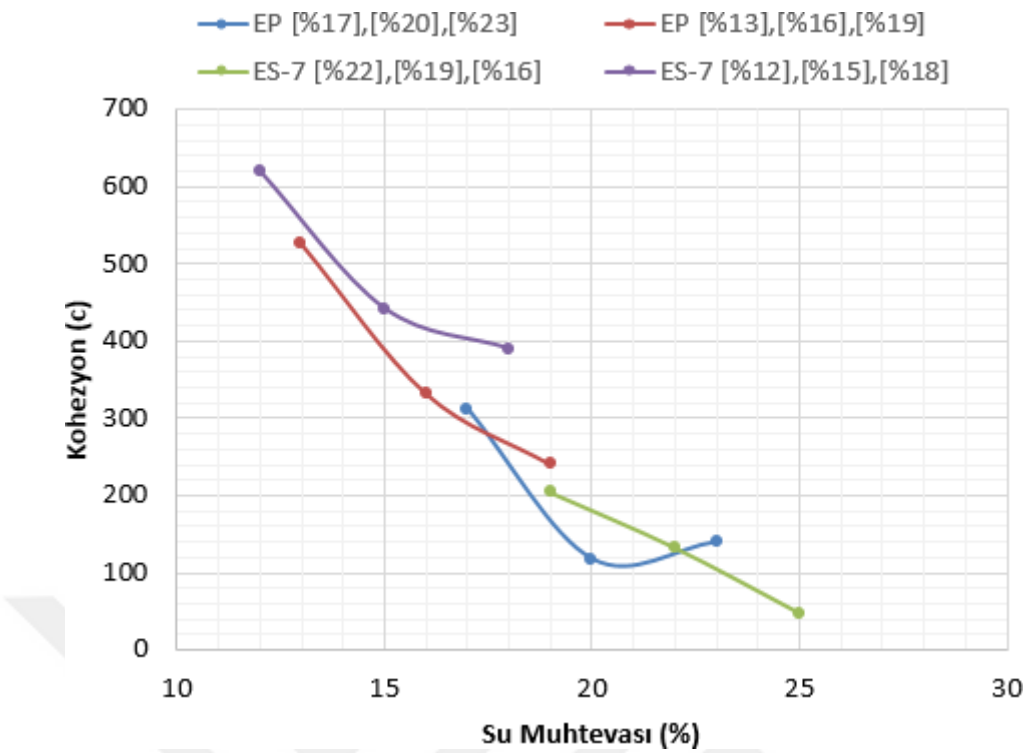
Şekil 3.15 ES-7deney numunesine ait gerilme şekil değiştirme davranışlarına su muhtevası $\omega_{optimum}$+3 ve farklı deviatörik gerilmelerin etkisi

Her iki düşük plastisiteli (CL) zemin grubunda yer alan zemin numunelerinin farklı kompaksiyon enerjileri ve kompaksiyon su muhtevasının ortak etkisi gözönüne alınarak kayma mukavemeti açılarında (Ø) meydana gelen değişim Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Kompaksiyon enerjisi ve su muhtevasının kayma mukavemeti açısı (Ø) değerlerine olan etkileri

Şekil 3.16'da da görüldüğü üzere; kayma mukavemeti açısı (Ø) kompaksiyon enerjisi ve su içeriği yükseldikçe, zemin partikülleri arasında yer alan suyun bağlayıcılık etkisinin artmasıyla yükselmekte ve belli bir değerden sonra ise azalmaktadır.



Şekil 3.17 Kompaksiyon enerjisi ve su muhtevasının kohezyon (c)değerlerine olan etkileri

3.3.2 Permeabilite (Geçirimlilik) Katsayısının Hesaplanması

Zeminler aralarında boşluk olan katı parçacıklardan oluşmaktadır. Genel olarak boşluklar birbiriyle bağlantılıdır ve suyun geçişine olanak sağlarlar. Diğer bir ifade ile zeminler suya geçirgendir. Geçirgenlik derecesi ise zemin örneğine hidrolik basınç farkı uygulanarak ve su akış hızını ölçerek belirlenmektedir [46].

Suya doygun olmayan zeminlerde direkt ve direkt olmayan olmak üzere iki metot kullanılmaktadır. Direkt olmayan metot genellikle zemin-su karakteristik eğrileri (SWCC)gibi karakteristik özellikleri ile yakından ilgilidir. Direkt metot ise sabit seviyeli permeabilite ve düşen seviyeli permeabilite olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sabit seviyeli permeabilite ölçümü için sabit bir hidrolik başlık ile suyun akım hızında meydana gelen değişimler ölçülmektedir [34].

Benson ve Gribb [51]'e göre sabit seviyeli methot zaman tüketici olmasına rağmen, eşitlik (3.2)d'e verilen Darcy Yasasını kullanırken daha kesin ve doğru sonuçlar için tercih edilmektedir.

$q_t = V. A$

$= [K_w. i. A]$

$= [K_w. \frac{h}{L} . A]$ (3.2)

Eşitlik (3.2)'ye göre akış hızı "V", numune kesit alanı "A", hidrolik eğim "*i* " ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte de görüldüğü üzere zeminin geçirgenlik katsayısı hız cinsinden ifade edilmektedir.

Çizelge 3.2 Değişik zemin tipleri için permeabilite katsayısının aldığı değerler [41]

Zemin Cinsi	**Permeabilite Katsayısı (cm/s)**
Çakıl	>1.0
Kum	$1.0\text{-}10^{-5}$
Silt	$10^{-5}\text{-}10^{-7}$
Kil	$<10^{-7}$

Geçirgenlik ölçümü için kullanılan yöntemin bağlantılı olduğu malzeme özellikleri ise sırası ile aşağıda verildiği gibidir.

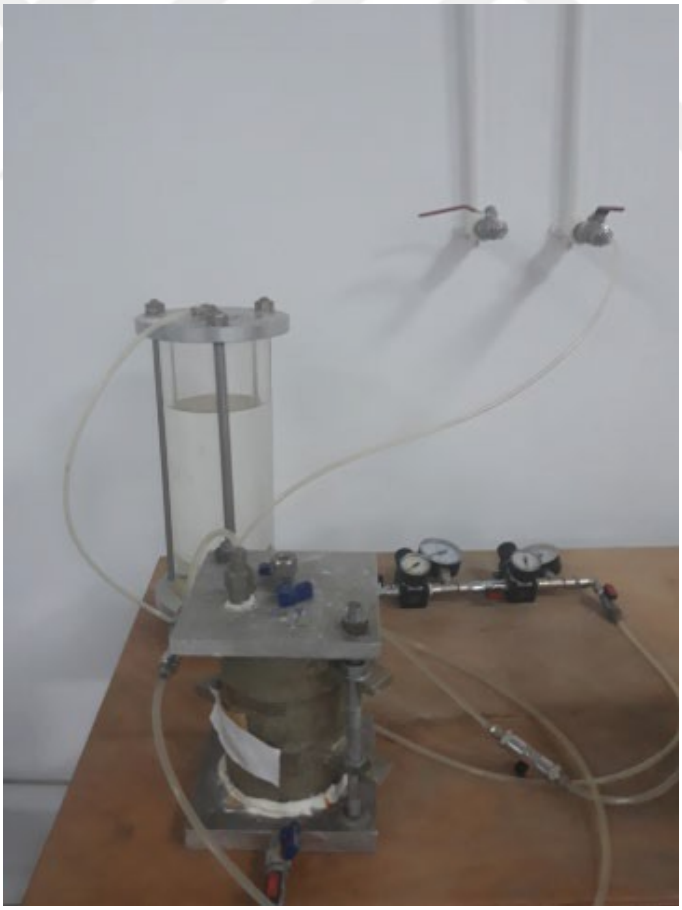
- Dane boyutu dağılımı
- Zemin doku Yapısı
- Mineralojik birleşim
- Boşluk oranı
- Doygunluk derecesi
- Ortam sıcaklığı

Farklı kalınlık ve tipteki mineraller tarafından adsorbe edilen suyun etkisi ile gözenek büyüklükleri değişkenlik göstermektedir. Mineral tipi, partikül boyutundan daha etkili bir faktördür, ancak kum ve çakıl üzerinde genellikle az etkisi mevcuttur. Suya doygunluk derecesi geçirgenliği etkileyen diğer önemli bir faktördür. Hava kabarcıkları

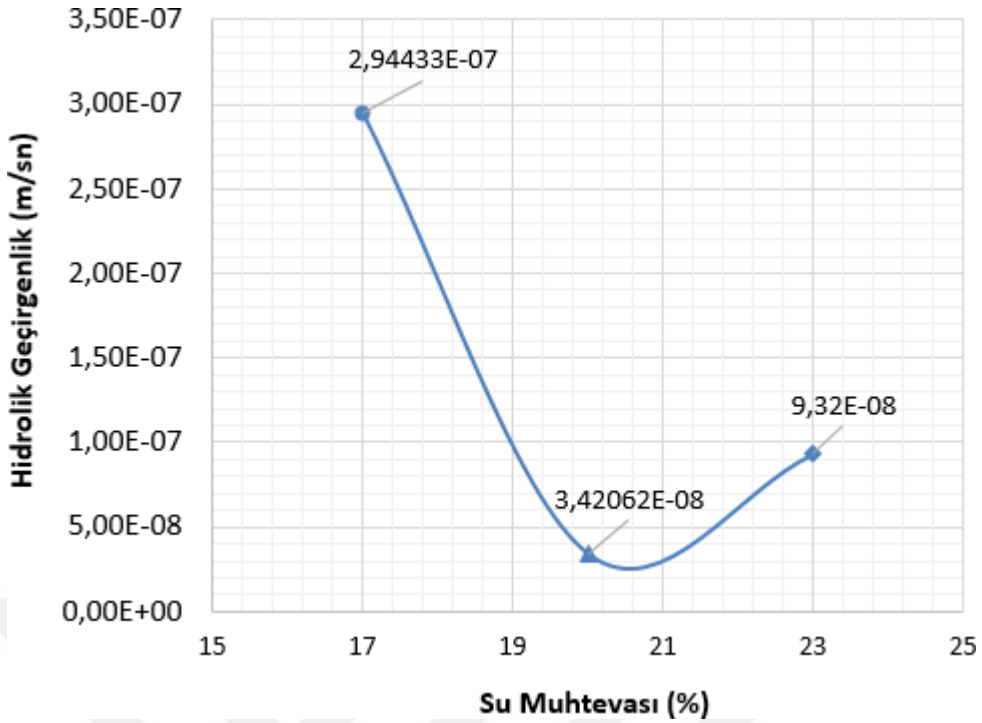
sızıntı kanallarını tıkayabilir. Doygunluk derecesi %85'den az ise hava Darcy yasasını geçersiz kılan izole kabarcıklarda bulunmak yerine, sürekli olabilir [46].

Bu çalışma kapsamında geçirgenlik ölçümü için sabit seviyeli permeabilite sistemi kurulmuştur. Şekil 3.19'da görüldüğü üzere 0,3 bar basınç göstergeli sabit bir hidrolik başlık kullanılmıştır. Standart kompaksiyon ile üç farklı su muhtevası değerlerinde sıkıştırılan zeminin alt ve üst yüzeylerine poroz kağıdı ile kırmataş eklenmiştir. Daha sonra suyun geçişini kolaylaştırmak adına gözenekli diskler kullanılmıştır.

Permeabilite katsayısı artan kompaksiyon enerjisi ile azalmaktadır. Optimum su muhtevasının kuru tarafında daha yüksek boşluklar mevcut olduğu için hidrolik iletkenlik yüksek değerlere ulaşmaktadır. Optimumdan ıslak tarafta ise kil partikülleri daha düşük mukavemete sahip ve böylelikle kolay deformasyona uğramaları sonucu daneler arası boşluk oranlarında değişimler gözlenmektedir. Bu durum ise düşük hidrolik iletkenliğe neden olmaktadır.



Şekil 3.18 Sabit seviyeli permeabilite sistemi



Şekil 3.19 EP deney numunesine ait;
farklı su muhtevalarında hidrolik geçirgenlik değerleri

BÖLÜM 4

DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KOHEZYONLU ZEMİNLERDE KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) TAYİNİ

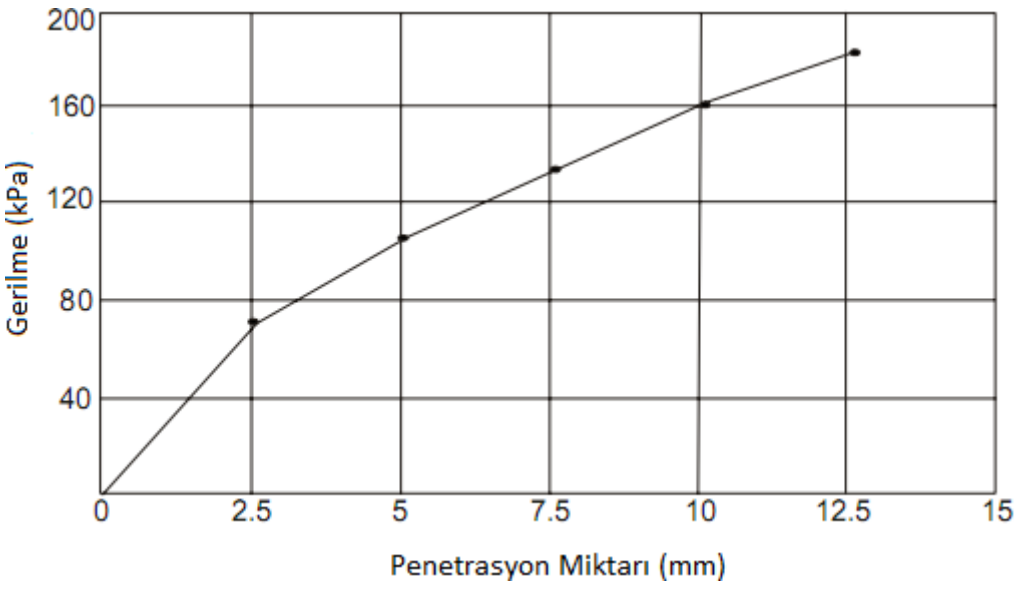
Genel olarak CBR olarak adlandırılan kaliforniya taşıma oranı deneyi, 1930'lu yıllarda ABD, Karayolları Bölümü, Malzeme Araştırma Departmanı Laboratuvarında geliştirilmiştir. Kaliforniya taşıma oranı deneyi, karayolu alt temel ve yol alt yapısı tabanının taşıma oranını belirlemek için kullanılmaktadır. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere yük penetrasyon ilişkisi, standart penetrasyonlara karşılık gelen yüklerin okunup, standart yüklerin oranları (yüzde olarak) olarak ifade edildiği bir grafik olarak çizilir. Kabul edilen yüzde, test edildiği koşulda zeminin CBR değeri olarak kabul edilir. CBR deneyi zeminlerin kayma dayanımlarının dolaylı bir ölçüsü olarak kabul edilebilir ancak doğrudan kayma dayanımı parametreleri ile ilişkilendirilemez [46]. Diğer bir deyiş ile; kayma mukavemetine göre zeminin sahip olduğu direnci ifade etmektedir.

152 mm çap ve 120 mm boy oranına sahip kalıplarda zeminler standart kompaksiyon ve modifiye kompaksiyon olmak üzere iki enerji düzeyinde kompakte edilmiştir. Kalıplarda meydana gelebilecek hacim değişimlerine karşı (2.1)'de verilen eşitliğe göre darbe sayıları hesaplanmıştır. Standart kompaksiyon ile 5 tabaka halinde kompakte edilecek zeminlerde her tabakaya 61 vuruş, modifiye kompaksiyon ile 5 tabaka halindekompakte edilmesi için ise her tabakaya 85 vuruş şeklinde kompaksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kalıp, taban plakası takılmış ancak üst yüzeyi açık olarak içindeki sıkıştırılmış numune ile birlikle basınç aletinin plakası üzerine yerleştirilmiştir. Numunenin üzerine gerekli görülen ağırlıklar konularak, 19,634 cm^{2}'lik alana sahip penetrasyon pistonunun dakikada 1.27 mm'lik hızla zemine doğru itilirek okumalar 68

alınmıştır. CBR değeri ise bu penetrasyon pistonunun özel olarak sıkıştırılmış zemine 2,54 mm ve 5,08 mm derinliğe kadar batması için gerekli olan basıncın, bu pistonun kırmataştan elde edilmiş bir deney numunesinde aynı batma seviyelerini sağlayan basınca oranı olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 4.1 Kırmataş ile gerçekleştirilen deneyde penetrasyon seviyelerine karşılık gelen standart gerilmeler [52]

Penetrasyon Derinliği (mm)	Standart Gerilme (kg/cm^2)	Standart Yük (kgf)
2,54	**70,4**	**1362,6**
5,08	**105,6**	**2043,9**
7,62	133,7	2587,7
10,16	161,9	3133,5
12,70	183	3541,9

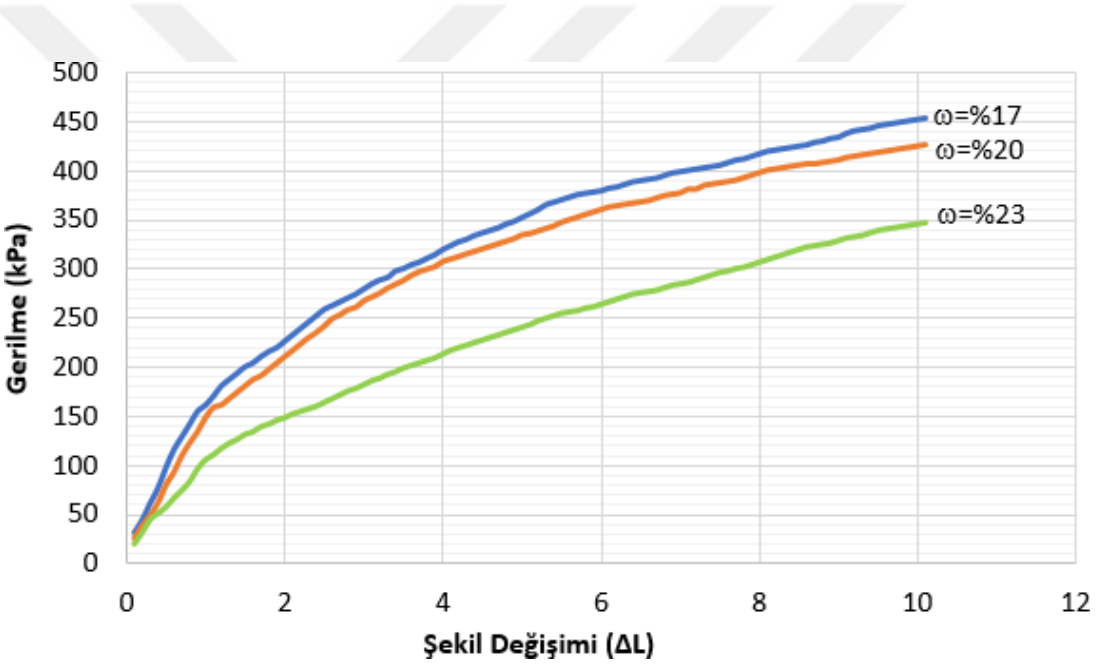


Şekil 4.1 Standart basınç ve penetrasyon ilişkisi [52]

4.1 EP, ES-7 ve EK Deney Numunelerine ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Bu bölümde gerçekleştirilen Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi kum katkısız gerçekleştirilmiştir. 2,54 mm ve 5,08 mm seviyelerinde elde edilen penetrasyon değerleri incelenmiştir ve CBR alt okumaları dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. 4 günlük kür süresinden sonra üç farklı su muhtevasında elde edilen şişme oranları ve CBR değerleri uygulanan kompaksiyon enerjileri ile kıyas edilmiştir. EP, ES-7 ve EK deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen CBR deneyinde kullanılan ve belirli penetrasyon seviyelerine denk gelen yük oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

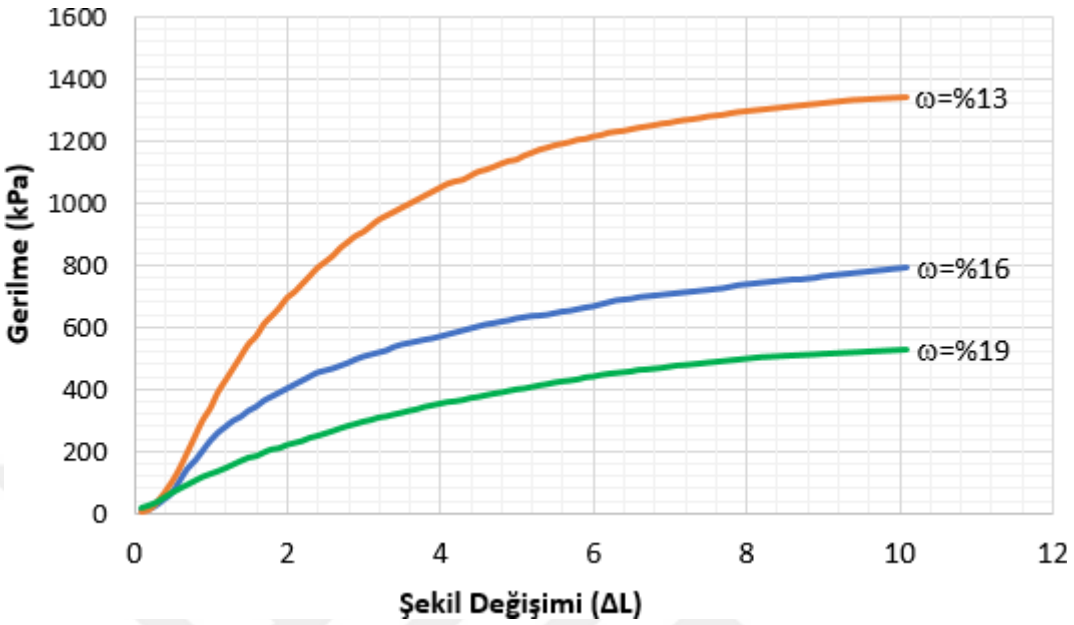
4.1.1 EP Deney Numunesi ile Gerçekleştirilen Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi



Şekil 4.2 600 [KJ/m^3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları

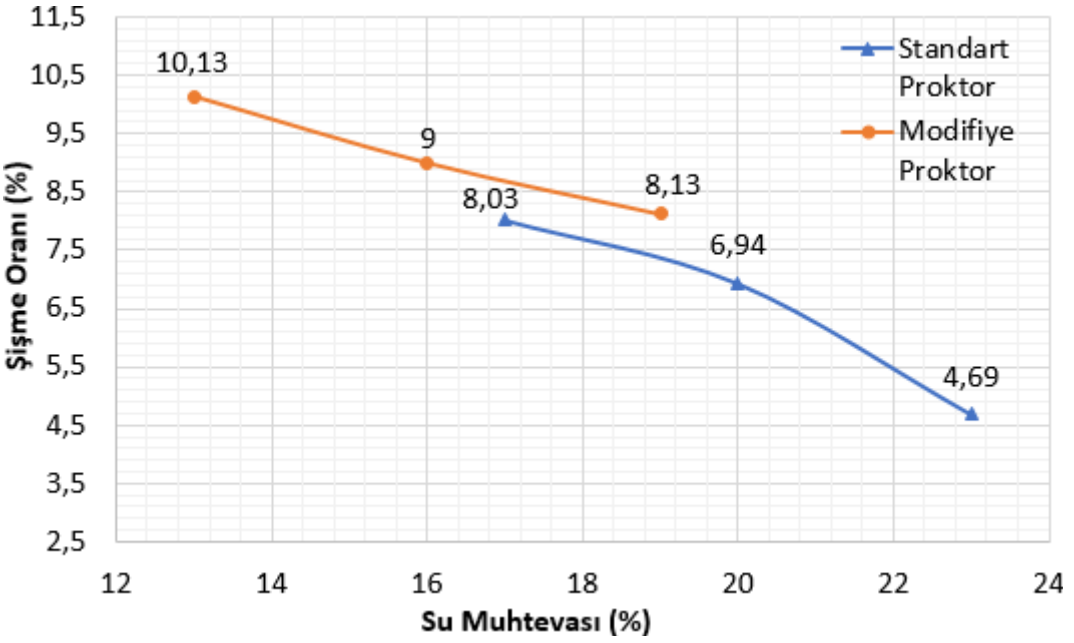
Şekil 4.2'de verilen gerilme şekil değişimi grafiği incelendiğinde gerilme oranları; $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. Kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m^3'den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile gerilme oranlarında meydana gelen değişim Şekil 4.3'de görüldüğü üzere $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. Kompaksiyon enerjisinin artışı ile en büyük değişimin yaşandığı $\omega_{optimum}$-3 su içeriğinde gerilmeler 452,99 kPa'dan 1340.86 kPa'a kadar artış göstermiştir. $\omega_{optimum}$ su içeriğinde 427,11 kPa'dan

792,09 kPa'a, $\omega_{optimum}$+3 su içeriğinde ise; 346,86 kPa'dan 530,65 kPa'a kadar artış gözlenmiştir.



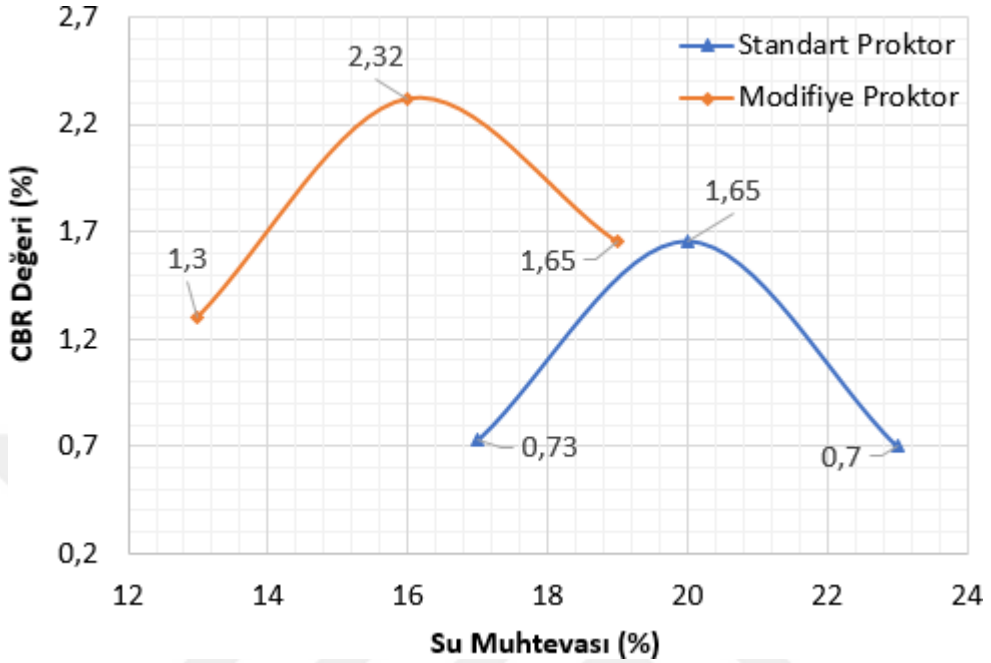
Şekil 4.3 2700 [KJ/m^3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları

Şekil 4.4'de görüldüğü üzere kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m$^{3'}$den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile şişme oranlarındaki artış $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir.



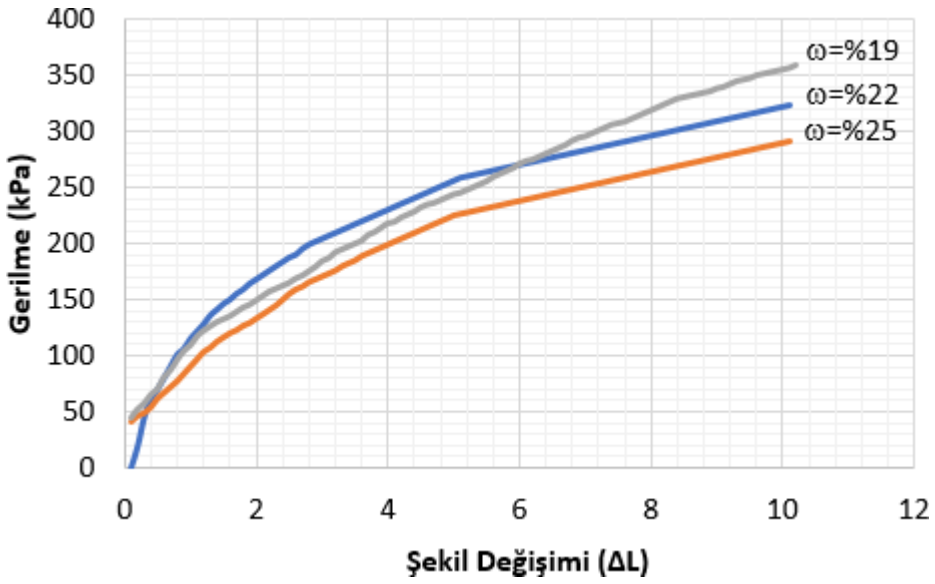
Şekil 4.4 EP deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m$^{3'}$den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de verilen kompaksiyon enerjisine göre değişiklik gösteren CBR değerleri ve şişme oranlarına ait ayrıntılı bilgi, her su muhtevasına göre EK-B'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

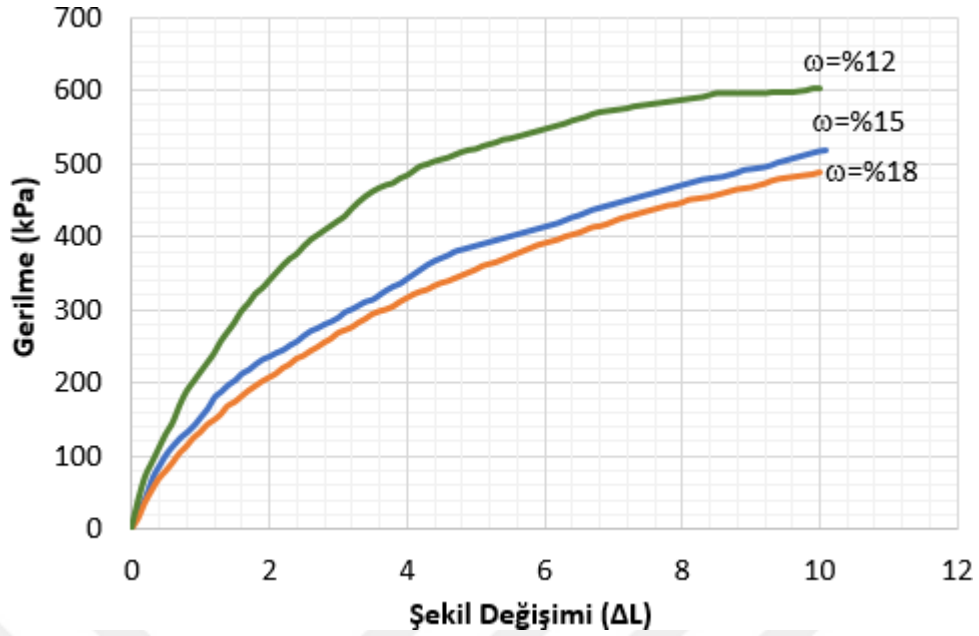


Şekil 4.5 EP deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m^3'den 2700 KJ/m^3'e yükselmesi ile CBR (%) değerleri arasındaki ilişki

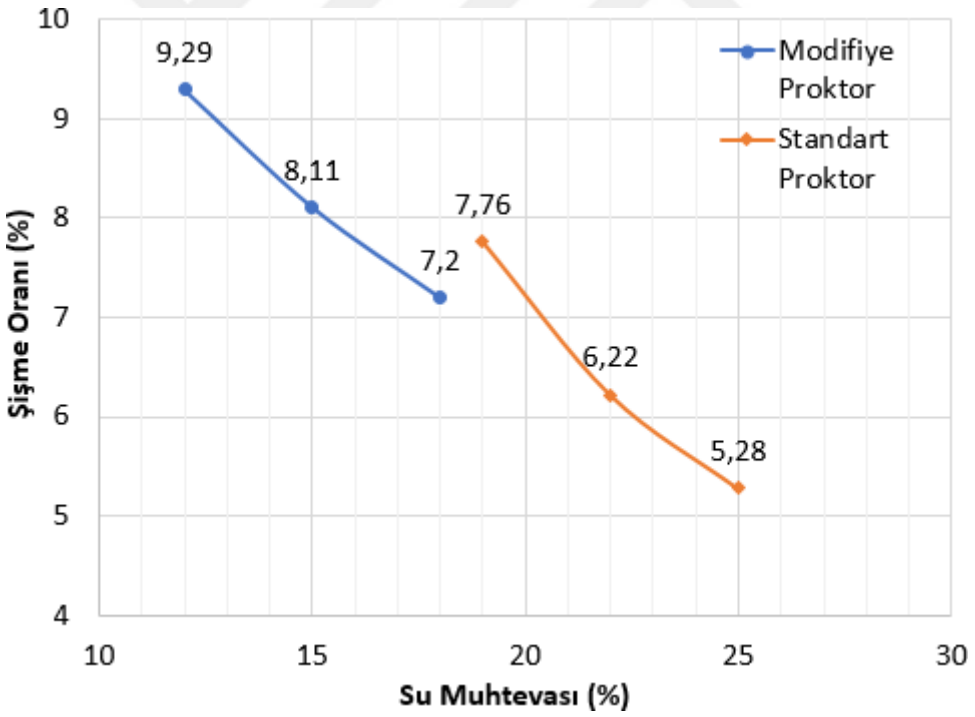
4.1.2 ES-7 Deney Numunesi ile Gerçekleştirilen Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi



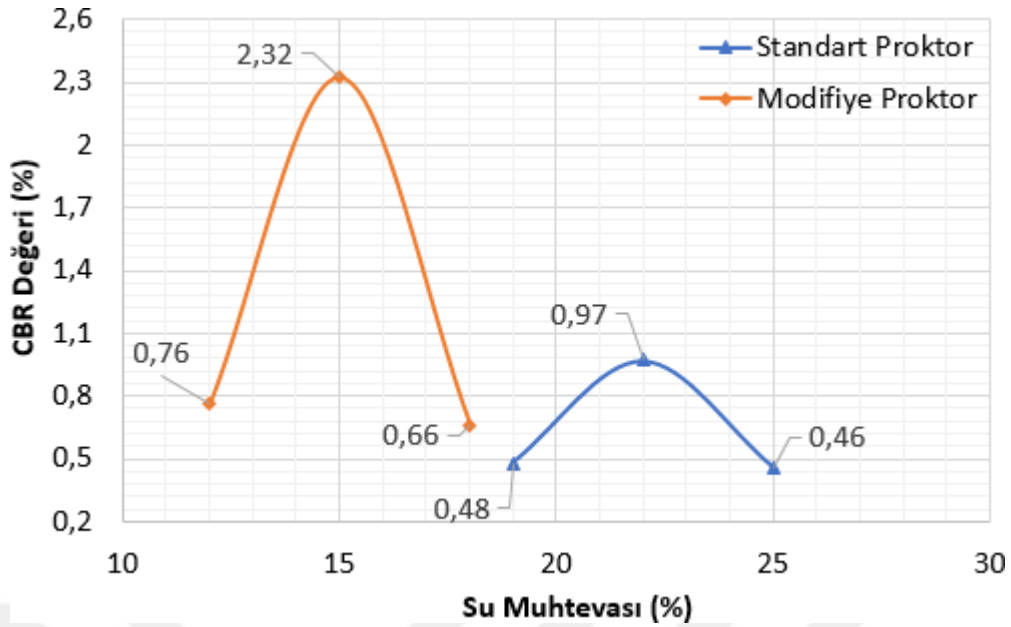
Şekil 4.6 600 [KJ/m^3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları



Şekil 4.7 2700 [KJ/m^3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları



Şekil 4.8 ES-7 deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m^3'den 2700 KJ/m^3'e yükselmesi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki



Şekil 4.9 ES-7 deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m$^{3'}$den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile CBR (%) değerleri arasındaki ilişki

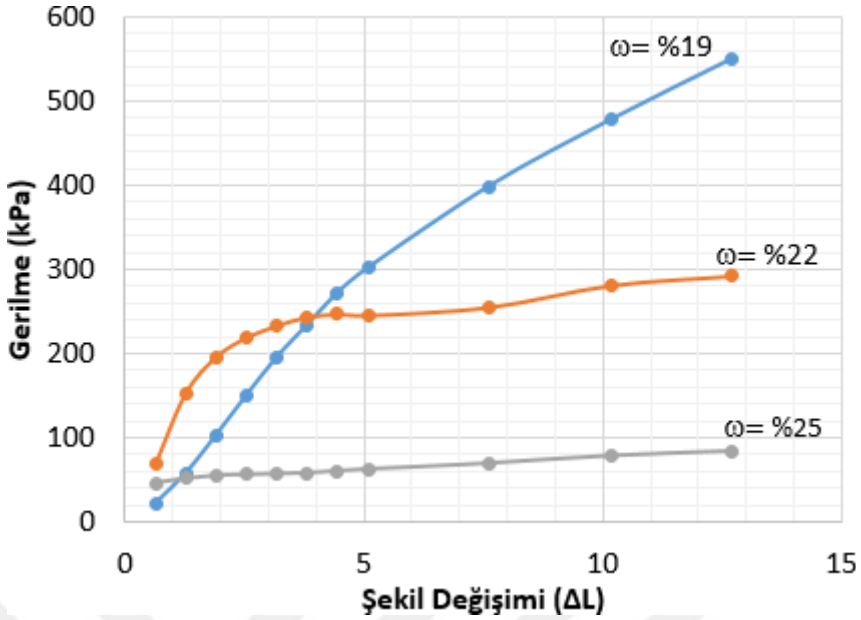
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilen gerilme şekil değişimi grafiği incelendiğinde; gerilme oranları; EP deney numunesinde de gözlendiği gibi $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. Kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m$^{3'}$den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile gerilme oranlarında meydana gelen ve en büyük değişimin yaşandığı $\omega_{optimum}$-3 su içeriğinde gerilmeler 359,81 kPa'dan 601,84 kPa'a kadar artış göstermiştir. $\omega_{optimum}$ su içeriğinde 323,56 kPa'dan 519,00 kPa'a, $\omega_{optimum}$+3 su içeriğinde ise 291,21 kPa'dan 490,52 kPa'a kadar artış gözlenmiştir.

Şekil 4.8'de görüldüğü üzere kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m$^{3'}$den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile şişme oranlarındaki artış $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir.

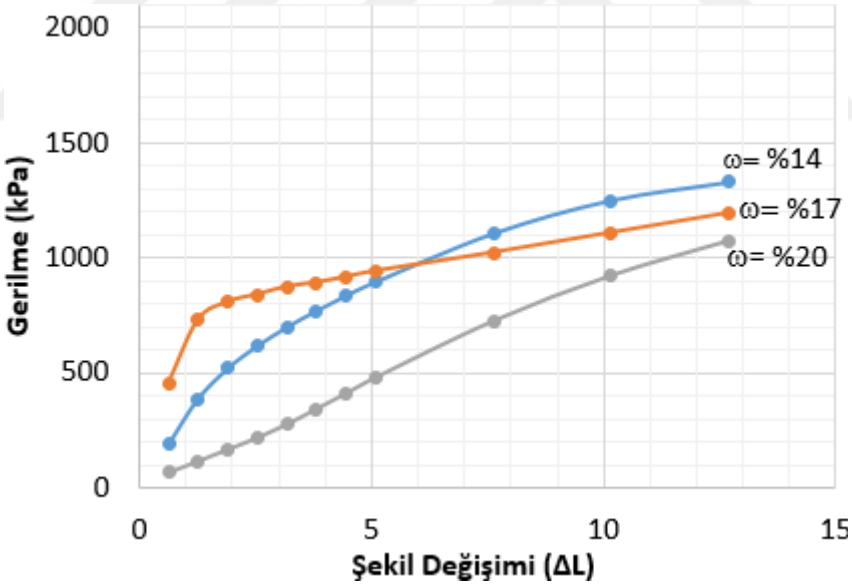
Su muhtevası ve kompaksiyon enerjisine göre değişiklik gösteren CBR değerleri ve şişme oranlarına ait bilgiler, EK-C'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Sıkıştırılan deney numunelerinin şişme potansiyelleri incelendiğinde optimum su içeriğinin altında; su ile temas halinde iken daha fazla şişme göstermiştir. Bu şişme ise ayrıştırıcı bir etkiye sebep olarak mukavemetin düşmesine neden olacaktır. Şşime potansiyeli optimum su muhtevasına doğru azalma eğilimindedir ve mukavemet; şişme eğilimindeki azalma ile artışa geçmektedir. Deney esnasında gözlenen ise şişme potansiyelinin bu noktadan sonra hemen hemen sabitleştiği olmuştur.

4.1.3 EK Deney Numunesi ile Gerçekleştirilen Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

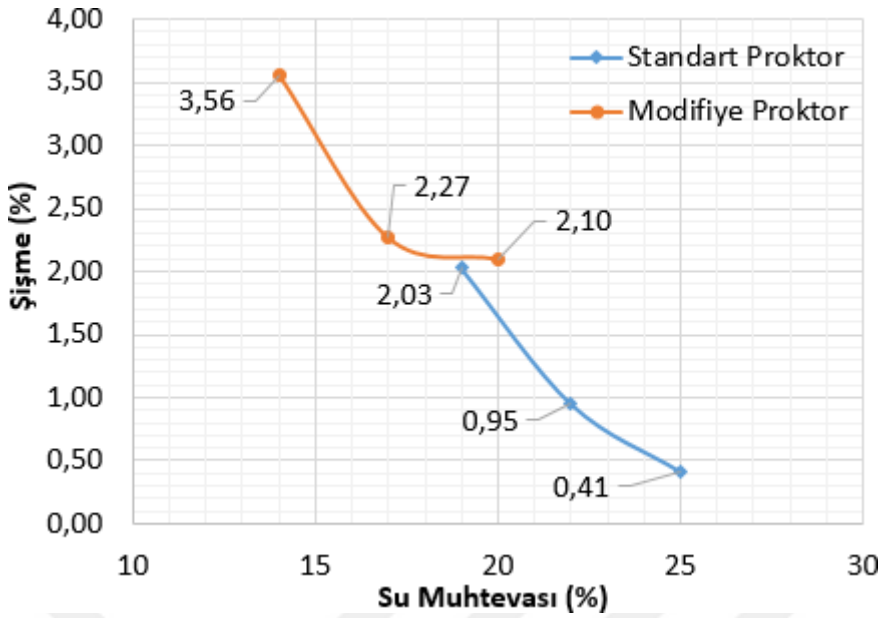


Şekil 4.10 600 [KJ/m^3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları

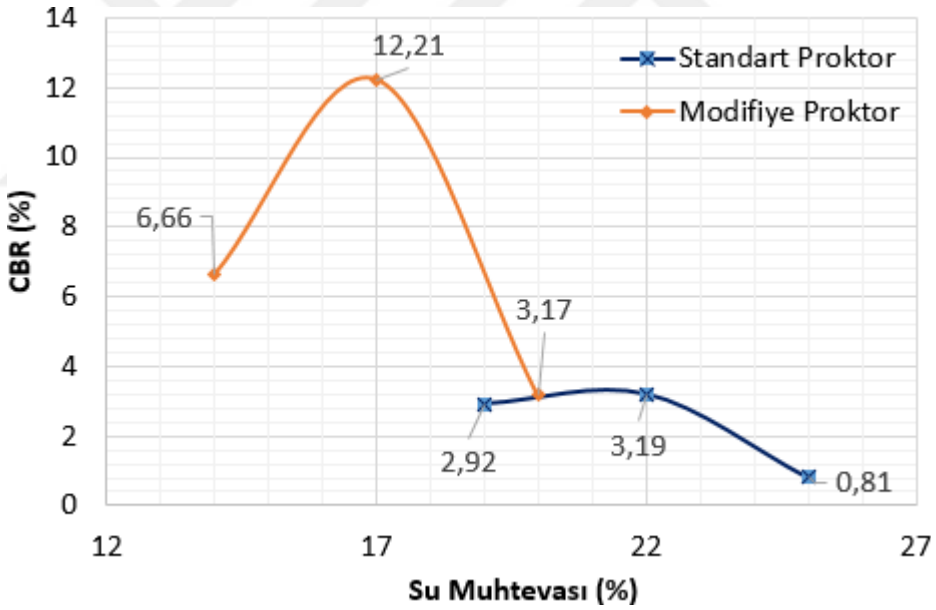


Şekil 4.11 2700 [KJ/m^3] sıkıştırma enerjisi kullanılarak farklı su muhtevalarında elde edilen CBR alt okumaları

Kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m$^{3'}$den 2700 KJ/m$^{3'}$e yükselmesi ile gerilme oranlarında meydana gelen değişim $\omega_{optimum}$-3 su içeriğinde 550,31 kPa'dan 1327,84 kPa'a kadar artış göstermiştir. $\omega_{optimum}$ su içeriğinde 291,64 kPa'dan 1192,927 kPa'a, $\omega_{optimum}$+3 su içeriğinde ise 84,20 kPa'dan 1074,24 kPa'a kadar artış gözlenmiştir.



Şekil 4.12 EK deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m^3'den 2700 KJ/m^3'e yükselmesi ile şişme potansiyeli arasındaki ilişki



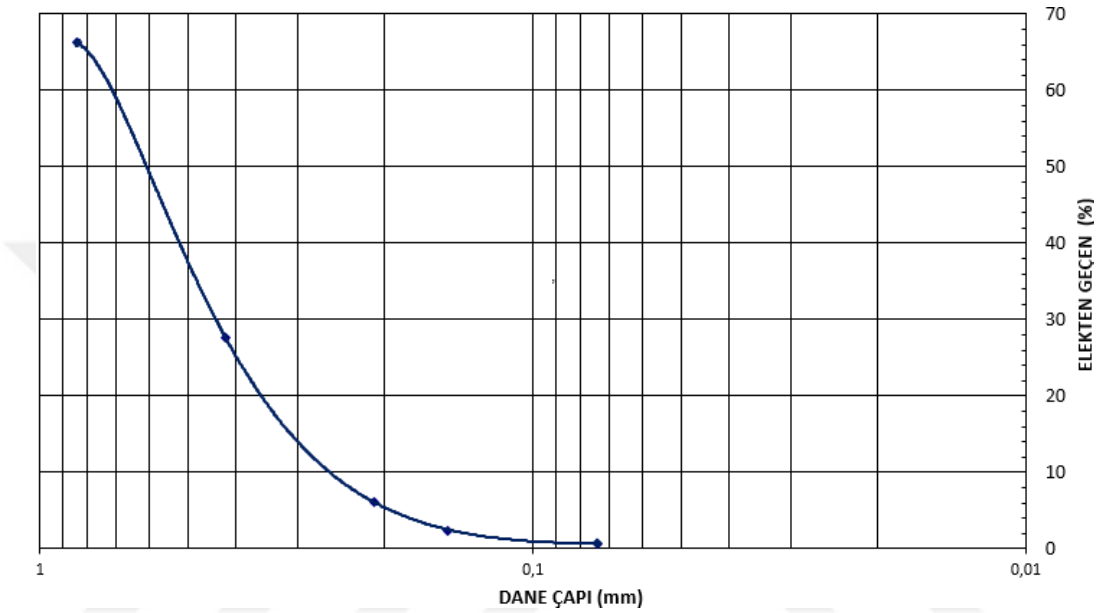
Şekil 4.13 EK deney numunesine ait kompaksiyon enerjisinin 600 KJ/m^3'den 2700 KJ/m^3'e yükselmesi ile CBR (%) değerleri arasındaki ilişki

Su muhtevası ve kompaksiyon enerjisine göre değişiklik gösteren CBR değerleri ve şişme oranlarına ait bilgiler, EK-D'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.2 EP, ES-7 ve EK Deney Numunesine Eklenen Kum Malzemesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Olan Etkisi

4.2.1 Kum Malzemenin Özellikleri

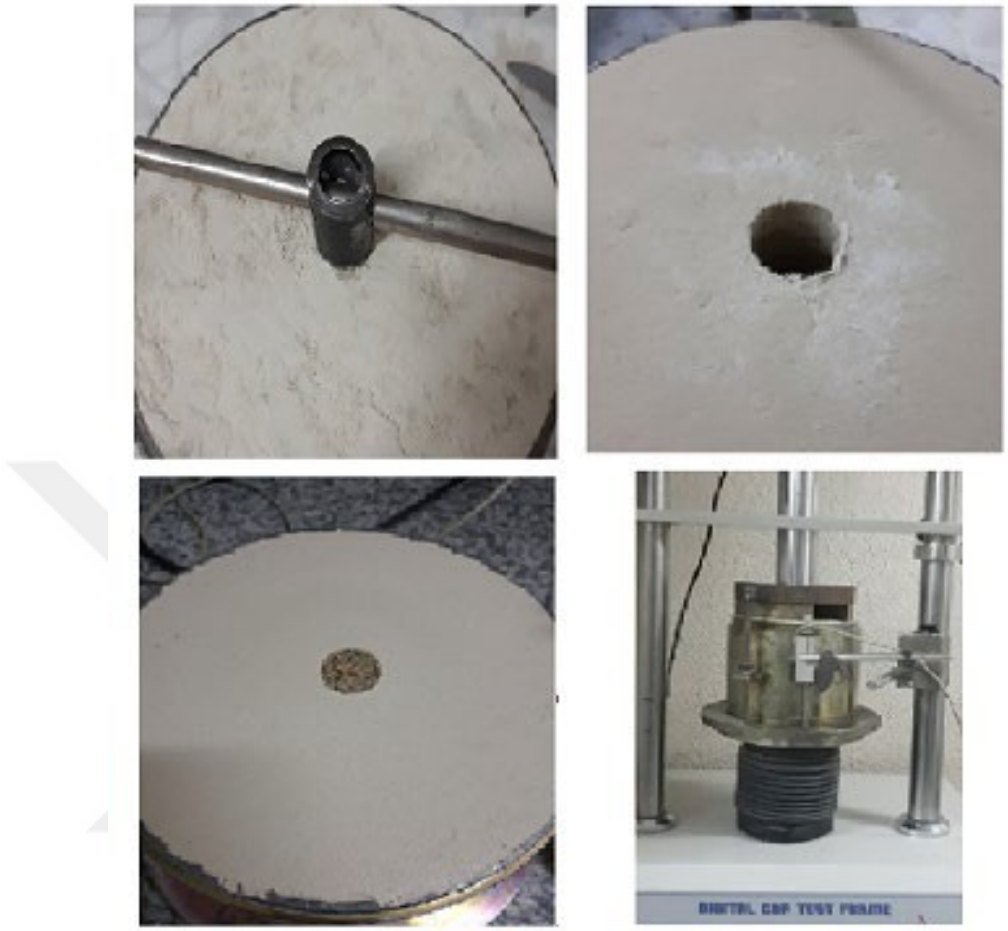
Tez çalışması kapsamında Tekirdağ kumu olarak adlandırılmış ve kötü derecelenmiş kum kullanılmıştır. Kumun dane çapı dağılımı Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Kullanılan kum malzemesinin dane çapı dağılım eğrisi

Yapılan elek analizi sonucunda dane dağılımı 20 nolu (0.84 mm) ve 40 nolu (0.42 mm) elek aralığında yoğunluk göstermiştir. Bu elek aralıklarında kullanılan kum ile CBR kalıplarında belirli su muhtevalarında ve kompaksiyon enerjisi kullanılarak sıkıştırılan zeminler su içerisinde bekletilerek CBR değerleri ve şişme potansiyellerinde meydana gelen farklılıklar incelenmiştir. Kompaksiyon kalıplarında kompakte edilen zeminlerin merkez noktalarından 1 cm ve 2 cm'lik dış çapa sahip çelik borular ile boşluklar oluşturulmuştur. Şekil 4.15'de 2 cm'lik dış çapa sahip çelik boru ile oluşturulan boşluk ve kum ile doldurulmuş kompaksiyon kalıbı su içerisinde 4 gün bekletilerek okumalar kaydedilmiştir. 4. günün sonunda sudan çıkarılan kalıpların, deney öncesi olduğu gibi, kalıp ve sıkıştırılmış zemin ağırlıkları tekrar tartılmıştır. Kompaksiyon kalıbı CBR test cihazına yerleştirilmiş, belirli ağırlıklar eklenerek okumalar kaydedilmiştir. EP, ES-7 deney numuneleri Yıldız Teknik Üniversitesi Kutay Özaydın Geoteknik Laboratuvarındaki deney ekipmanları ile manuel bir şekilde test edilmiştir. EK deney

numunelerinin CBR ölçümleri ise dijital CBR test cihazı ile elde edilen okumalar ile elde edilmiştir.

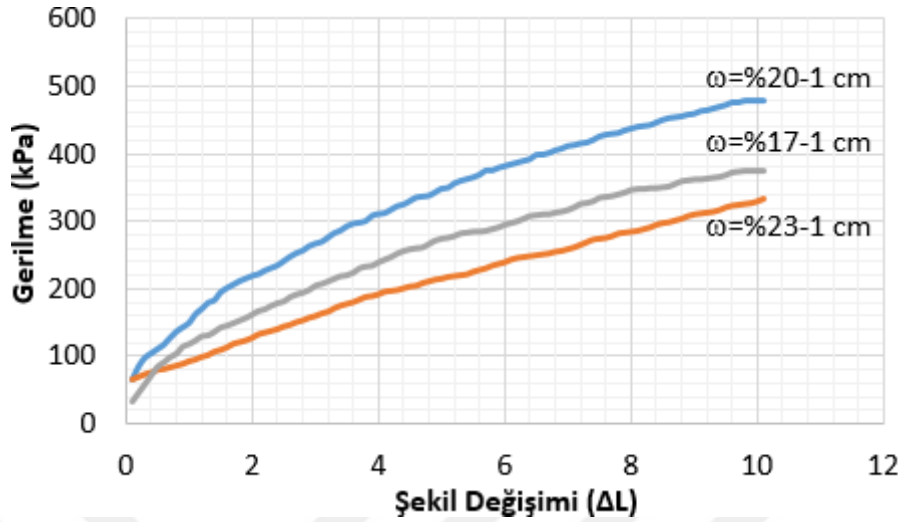


Şekil 4.15 Dış çapı 2 cm olan çelik boru ile sıkıştırılmış EP deney numunesinin merkez noktasında oluşturulan boşluk ve kum ile doldurulmuş hali

4.2.2 EP Deney Numunesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Kullanılan Katkı Malzemesinin Etkisi

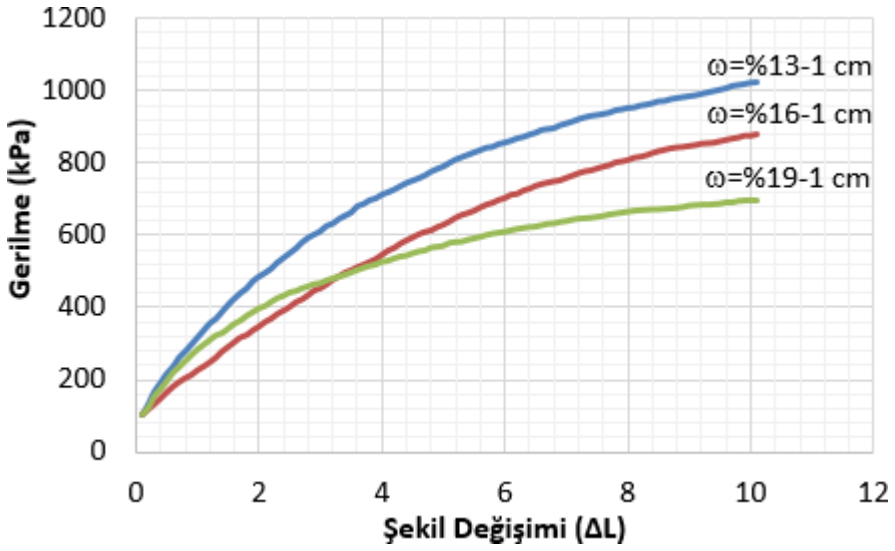
600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılan zeminde, kür süresinin başlatılmasından önce, tam merkez noktasından dış çapı 1 cm ve 2 cm olan borular ile delinmiştir. Kullanılacak kum katkı malzemesi sahip olduğu özgül ağırlık değeri ve borunun hacim oranlarına göre hesaplanarak açılan boşluklardan, sıkıştırma etkisi olmaksızın doğal bir şekilde kompaksiyon kalıbında oluşan 1 cm ve 2 cm boyutlarındaki boşluklara Şekil 4.15'de de görüldüğü gibi doldurulmuştur.

4.2.2.1 600 [KJ/m^3] ve 2700 [KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 1 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları



Şekil 4.16 600 KJ/m^3 sıkıştırma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

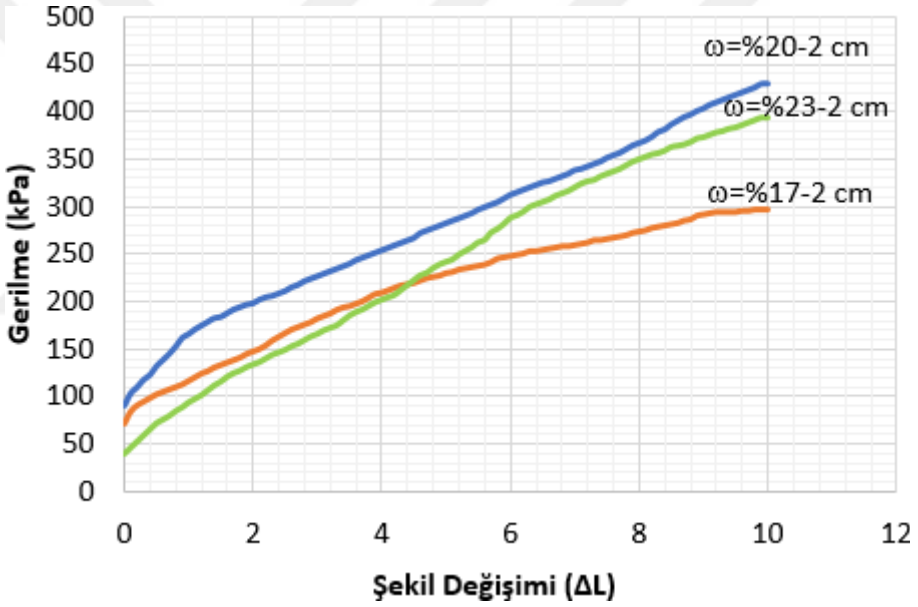
600 KJ/m^3 sıkıştırma enerjisi ile kompakte edilen EP zemininde, 1 cm boyutundaki boşluk yapılan hesaplamalar ile 13,5 gr kum ile doldurulmuştur. Dolum işleminden sonra yaş CBR deneyi için 4 gün suda bekletilmiştir. Elde edilen CBR okumaları ve su muhtevasındaki değişimler EK-B'de ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 4.17 2700 KJ/m^3 sıkıştırma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

EP deney numunesine ait 1 cm dış çapa sahip çelik borular yardımı ile boşluklar oluşturularak kum ile doldurulan bu boşluklar, farklı su muhtevalarında gerilme oranlarında değişimlere neden olmaktadır. EP deney numunesine ait veriler incelendiğinde; 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinin etkisi ile elde edilen gerilme dağılımı $\omega_{optimum}>\omega_{optimum}-3>\omega_{optimum}+3$ şeklindedir. $\omega_{optimum}$ su muhtevasında; 478,88 kPa'dan 877,51 kPa'a kadar artış gözlenmiştir. $\omega_{optimum}+3$ su muhtevasında ise; 333,92 kPa'dan 697,61 kPa'a ve $\omega_{optimum}-3$ su muhtevasında ise; 375,33 kPa'dan 1022,47 kPa'a artış gözlenmiştir.

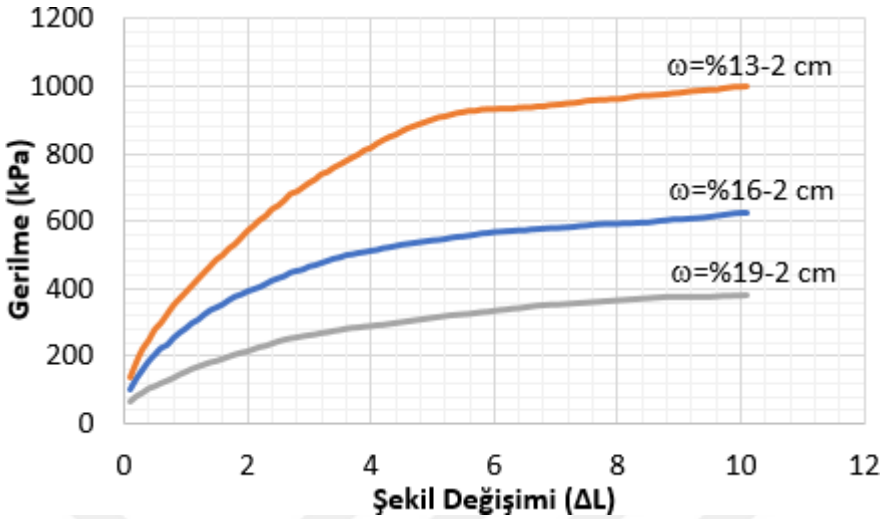
4.2.2.2 600 [KJ/m^3] ve [2700 KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 2 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları



Şekil 4.18 600 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

2 cm dış çapa sahip çelik boru yardımı ile açılan boşlukların kum ile doldurularak, 96 saat suda bekletildikten sonra CBR deneyi ile elde edilen gerilme oranları; $\omega_{optimum}>\omega_{optimum}-3>\omega_{optimum}+3$ şeklindedir. 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinin etkisi ile elde edilen gerilme $\omega_{optimum}$ su muhtevasında; 428,40 kPa'dan 627,72 kPa'a kadar artış gözlenmiştir. $\omega_{optimum}+3$ su muhtevasında ise 297,68 kPa'dan

380,51 kPa'a ve $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında ise 394,34 kPa'dan 997,88 kPa'a artış gözlenmiştir.



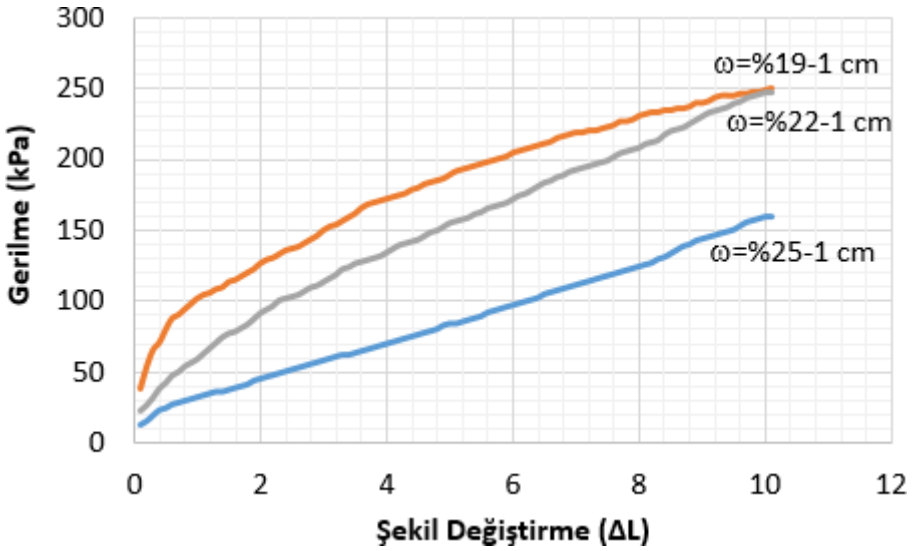
Şekil 4.19 2700 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan EP deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

4.2.3 ES-7 Deney Numunesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Kullanılan Katkı Malzemesinin Etkisi

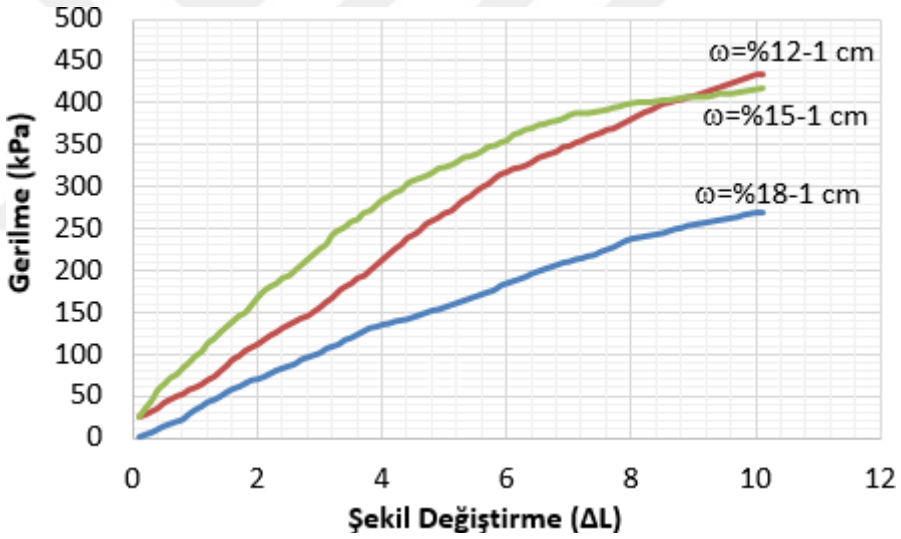
600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılan zeminde, kür süresinin başlatılmasından önce, tam merkez noktasından dış çapı 1 cm ve 2 cm olan borular ile delinmiştir. EP deney numunesinde de olduğu gibi kullanılacak kum katkı malzemesi; sahip olduğu özgül ağırlık değeri ve borunun hacim oranlarına göre hesaplanarak açılan boşluklardan, sıkıştırma etkisi olmaksızın doğal bir şekilde kompaksiyon kalıbında oluşan 1 cm ve 2 cm boyutlarındaki boşluklara Şekil 4.15'de de görüldüğü gibi doldurulmuştur.

4.2.3.1 600 [KJ/m^3] ve 2700 [KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 1 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları

600 KJ/m^3 sıkıştırma enerjisi ile kompakte edilen ES-7 zemininde, 1 cm boyutundaki boşluk yapılan hesaplamalar ile 13,5 gr kum ile doldurulmuştur. Dolum işleminden sonra yaş CBR deneyi için 96 saat suda bekletilmiştir.



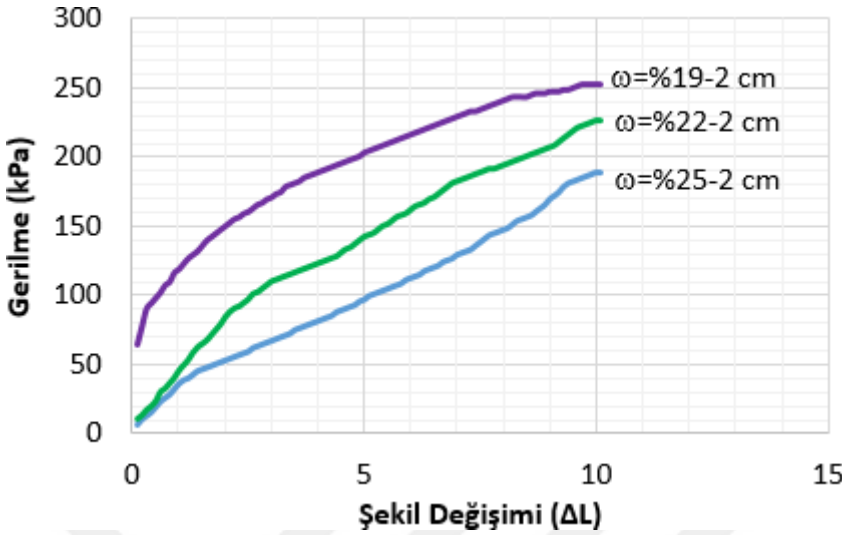
Şekil 4.20 600 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları



Şekil 4.21 2700 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

1 cm dış çapa sahip çelik boru yardımı ile açılan boşlukların kum ile doldurularak, 96 saat suda bekletildikten sonra CBR deneyi ile elde edilen gerilme oranları $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinin etkisi ile elde edilen gerilme $\omega_{optimum}$ su muhtevasında; 247,21 kPa'dan 418,05 kPa'a kadar artış gözlenmiştir. $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise 159,19 kPa'dan 267,91 kPa'a ve $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında ise 249,79 kPa'dan 434,87 kPa'a artış gözlenmiştir.

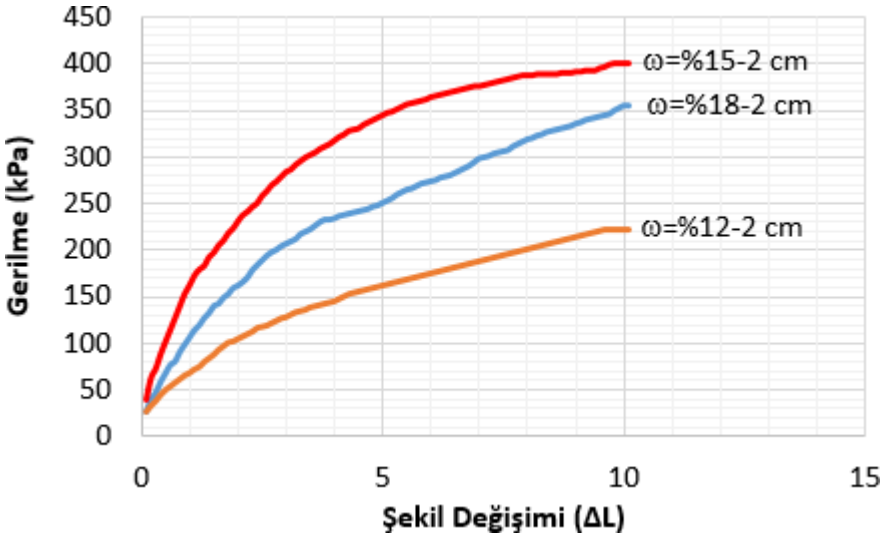
4.2.3.2 600 [KJ/m^3] ve 2700 [KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 2 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları



Şekil 4.22 600 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

ES-7 deney numunesine ait ve 96 saat suda bekletildikten sonra CBR deneyi ile elde edilen gerilme oranları 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen gerilme ve su muhtevası arasındaki ilişki $\omega_{optimum}$-3>$\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3 şeklindedir. 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi ile elde edilen gerilme oranları ise; $\omega_{optimum}$>$\omega_{optimum}$+3>$\omega_{optimum}$-3 şeklindedir.

2 cm dış çapa sahip çelik borular ile oluşturulan boşluklarda kullanılan 57,0 gr kum malzemenin; 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinin etkisi ile elde edilen gerilme oranlarında meydana gelen değişimler; $\omega_{optimum}$ su muhtevasında; 226,49 kPa'dan 399,93 kPa'a kadar, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise 188,96 kPa'dan 355,92 kPa'a artış gözlenirken $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında ise; Şekil 4.22'de de görüldüğü üzere 252,38 kPa'dan 221,32 kPa'a düşüş gözlenmiştir.

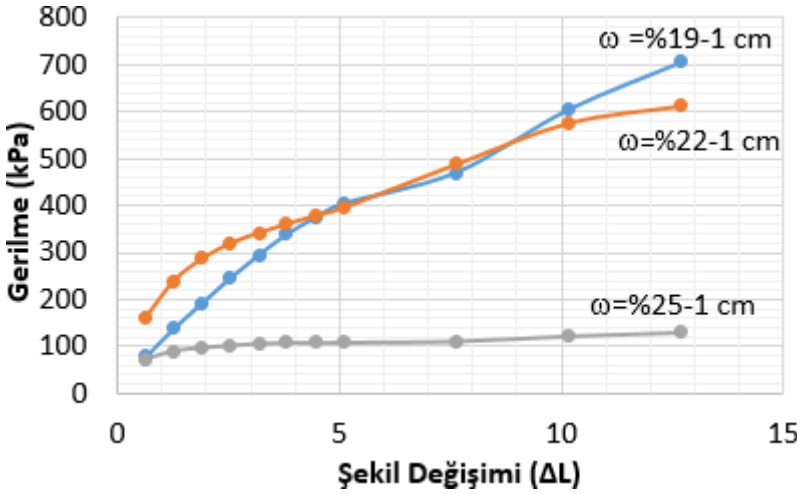


Şekil 4.23 2700 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan ES-7 deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

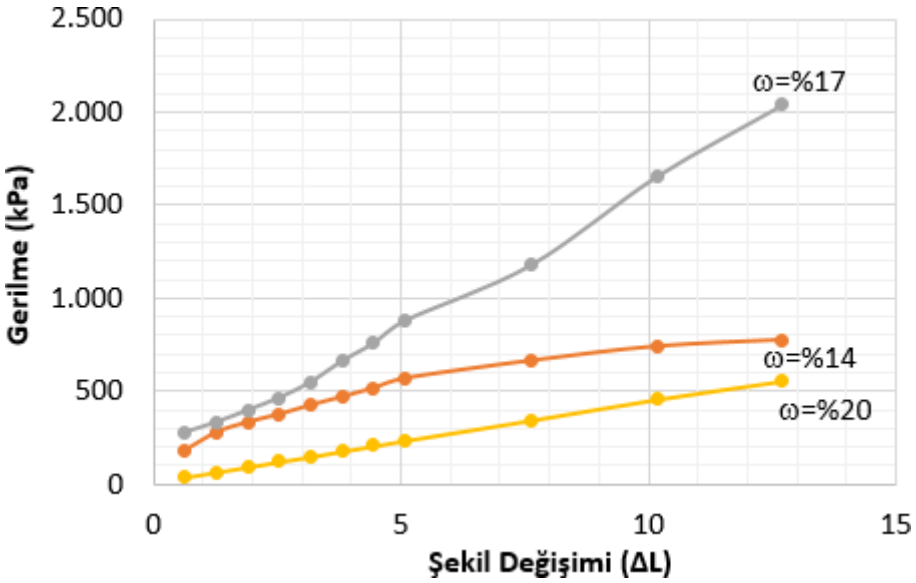
4.2.4 EK Deney Numunesinin Kaliforniya Taşıma Oranına (CBR) Kullanılan Katkı Malzemesinin Etkisi

EP ve ES-7 deney numunelerinin CBR deneyi için gerçekleştirilen aşamalar bu bölümde de tekrarlanmıştır.

4.2.4.1 600 [KJ/m^3] ve [2700 KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 1 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları



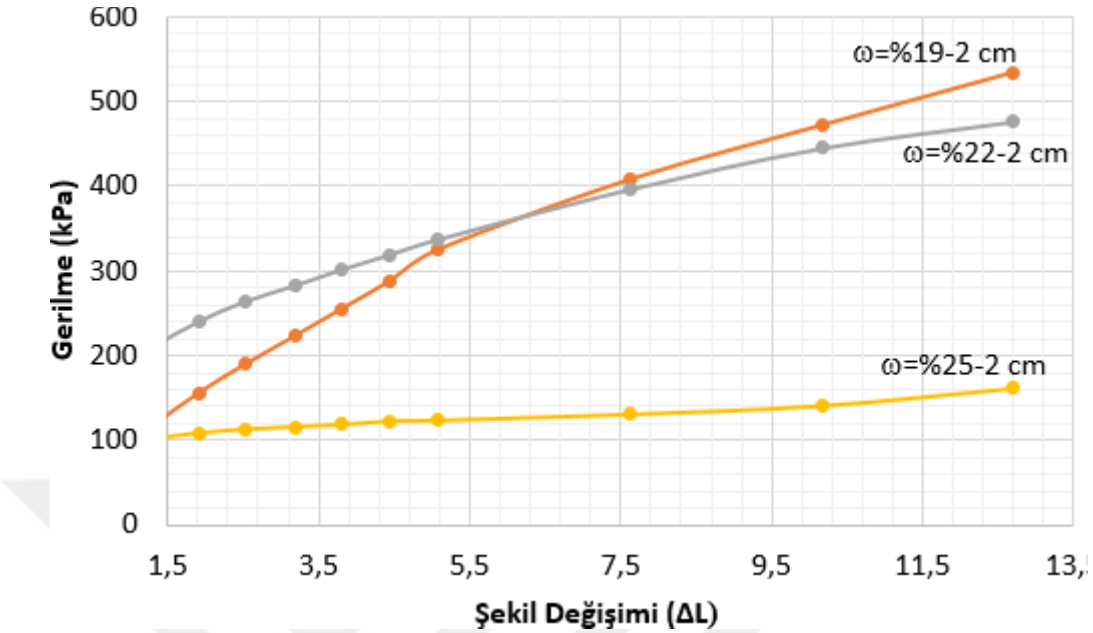
Şekil 4.24 600 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları



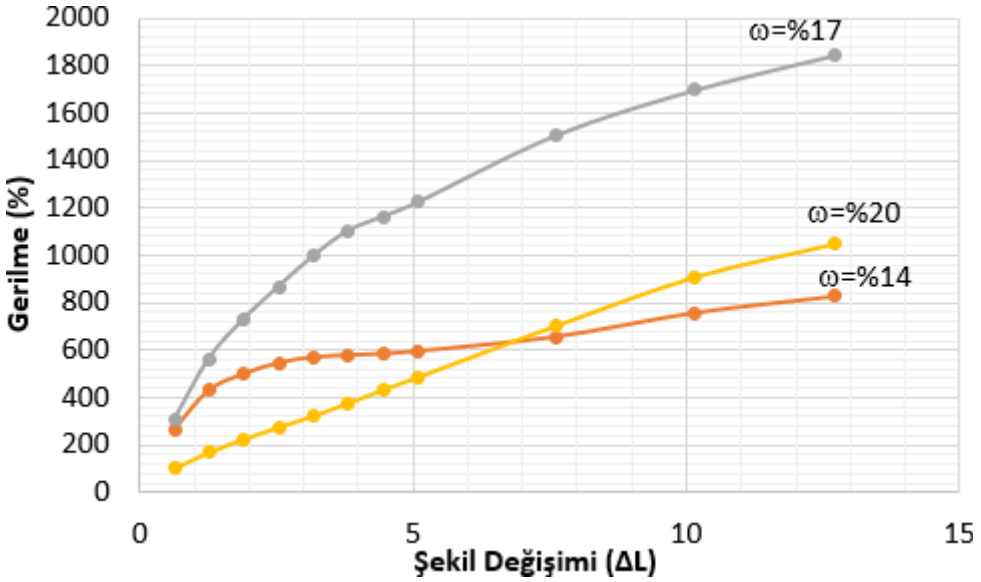
Şekil 4.25 2700 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 1 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de 1 cm dış çapa sahip çelik boru yardımı ile açılan boşlukların kum ile doldurularak, 96 saat suda bekletildikten sonra CBR deneyi ile elde edilen gerilme oranları görülmektedir. 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinin etkisi ile elde edilen gerilme $\omega_{optimum}$ su muhtevasında; 612,69 kPa'dan 2042,99 kPa'a kadar artış gözlenmiştir. $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; 130,35 kPa'dan 556,39 kPa'a ve $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında ise 706,02 kPa'dan 772,97 kPa'a kadar artış gözlenmiştir.

4.2.4.2 600 [KJ/m^3] ve [2700 KJ/m^3] Sıkıştırma Enerjisi Kullanılarak 2 cm Boyutundaki Boşluğa Doldurulan Kum Malzemenin CBR Alt Okumaları



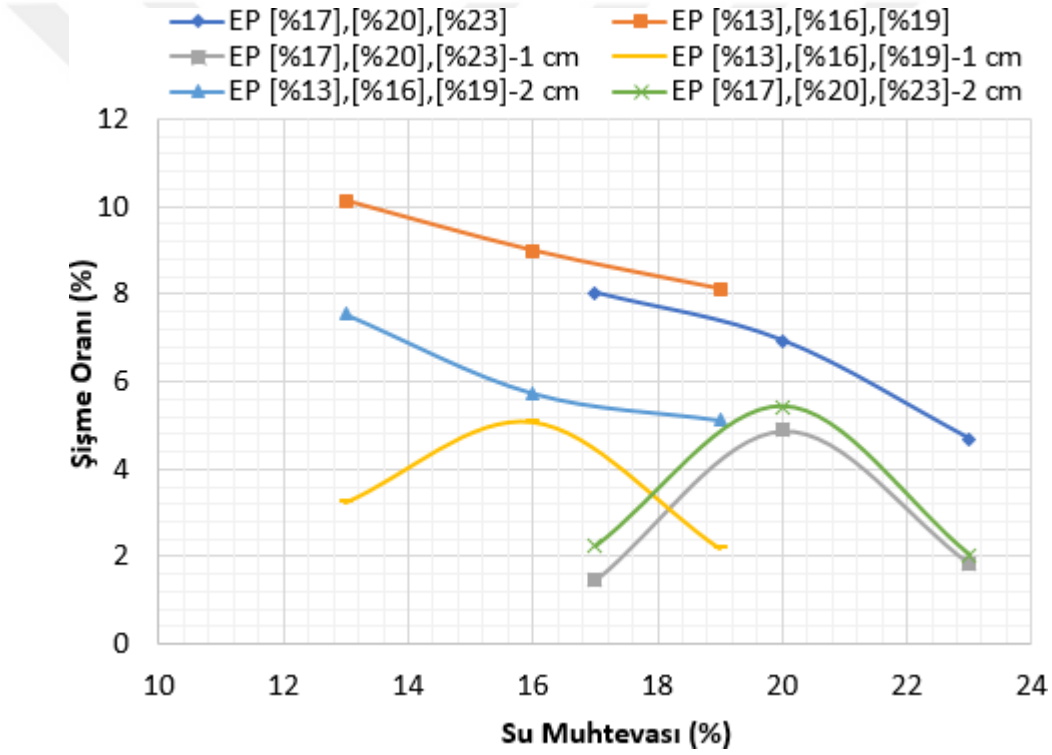
Şekil 4.26 600 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları



Şekil 4.27 2700 KJ/m^3 sıkışma enerjisi uygulanan EK deney numunesine ait ve 2 cm boyutundaki boşluğa doldurulan kum malzemesinin farklı su muhtevalarındaki CBR alt okumaları

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 incelendiğinde ise; 2 cm dış çapa sahip çelik borular ile oluşturulan boşluklarda kullanılan 57,0 gr kum malzemenin 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinin etkisi ile elde edilen gerilme oranlarında meydana gelen değişimler; $\omega_{optimum}$ su muhtevasında; 476,76 kPa'dan 1843,66 kPa'a kadar, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise 161,80 kPa'dan 1045,84 kPa'a artış gözlenirken; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında ise Şekil 4.26'da da görüldüğü üzere 534,08 kPa'dan 826,22 kPa'a artış gözlenmiştir.

4.3 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyinde Kum Malzemenin Zeminlerin Şişme Oranlarına Olan Etkisi



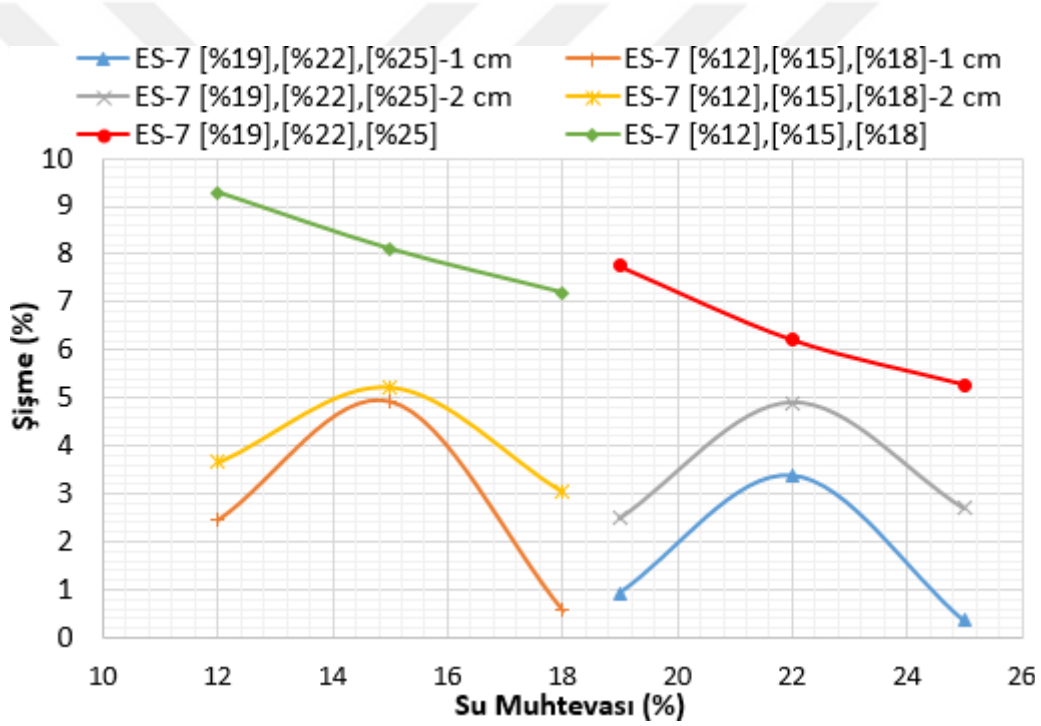
Şekil 4.28 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EP deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde şişme oranlarındaki değişim

Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da görüldüğü üzere 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde $\omega_{optimum}$-3, $\omega_{optimum}$ ve $\omega_{optimum}$+3 su içeriklerine sahip kısımlarda ilave edilen kum ile şişme potansiyellerinde düşüş gözlenmiştir. Herhangi bir katkı malzemesi olmaksızın, artan kompaksiyon enerjiside gözönünde bulundurulursa; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında elde edilen şişme oranı, %8,03 'den

%10,13'e, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %6,94'den %9,00'a ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %4,69'dan %8,13'e kadar artış gözlenmiştir.

1 cm çapa sahip açıklıkların kum ile doldurulması ile, 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde elde edilen şişme oranları $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %1,47 'den %3,25'e, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %4,88'den %5,08'e, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %1,85'den %2,20'ye kadar artış gözlenmiştir.

2 cm çapa sahip açıklıkların kum ile doldurulması ile, 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde elde edilen şişme oranları; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %2,24'den %7,55'e, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %5,43'den %5,73'e, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %2,04'den %5,11'e kadar artış gözlenmiştir.

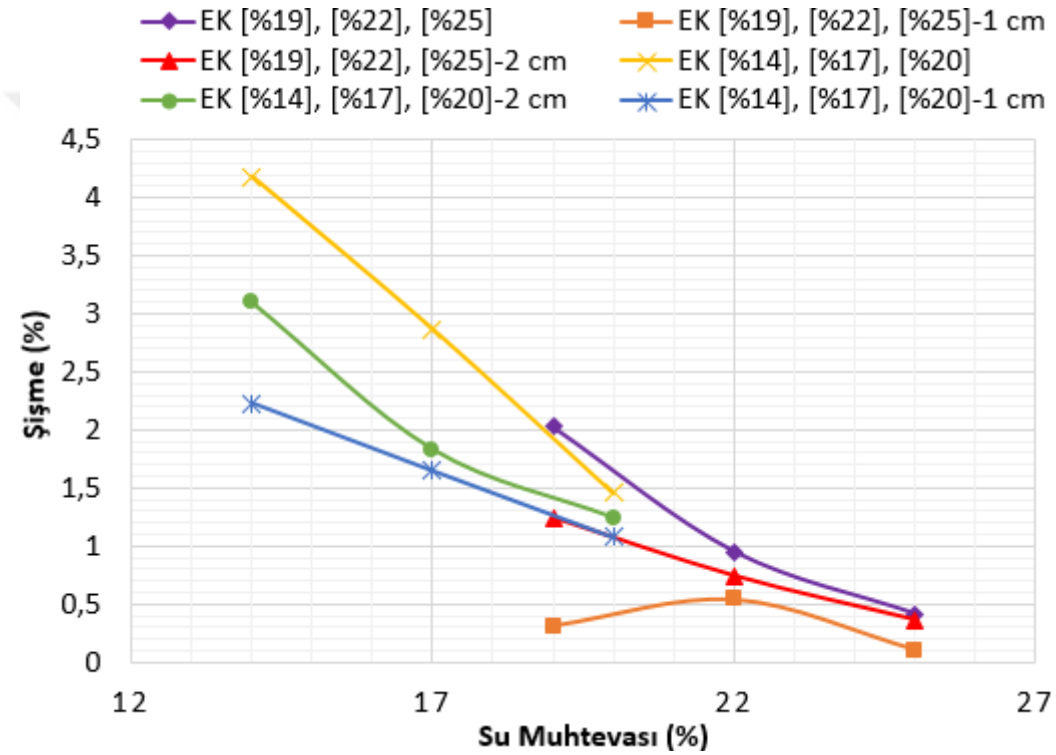


Şekil 4.29 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış ES-7 deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde şişme oranlarındaki değişim

Herhangi bir katkı malzemesi olmaksızın, artan kompaksiyon enerjiside gözönünde bulundurulursa; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında elde edilen şişme oranı, %7,76'dan %9,29'a, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %6,22'den %8,11'e ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %5,28'den %7,20'ye kadar artış gözlenmiştir.

1 cm çapa sahip açıklıkların kum ile doldurulması ile, 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde elde edilen şişme oranları; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,93'den %2,46'ya, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %3,38'den %4,93'e, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %0,35'den %0,56'ya kadar artış gözlenmiştir.

2 cm çapa sahip açıklıkların kum ile doldurulması ile, 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde elde edilen şişme oranları $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %2,50'den %3,66'ya, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %4,90'dan %5,23'e, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %2,71'den %3,04'e kadar artış gözlenmiştir.



Şekil 4.30 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EK deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde şişme oranlarındaki değişim

Kum katkısız ve artan kompaksiyon enerjiside gözönünde bulundurulursa; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında elde edilen şişme oranı, %2,03'den %4,18'e, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,95'den %2,87'ye ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise; %0,41'den %1,46'ya kadar artış gözlenmiştir.

1 cm çapa sahip açıklıkların kum ile doldurulması ile, 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde elde edilen şişme oranları; $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,31'den %2,23'e, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,54'den %1,65'e, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise %0,10'dan %1,08'e kadar artış gözlenmiştir.

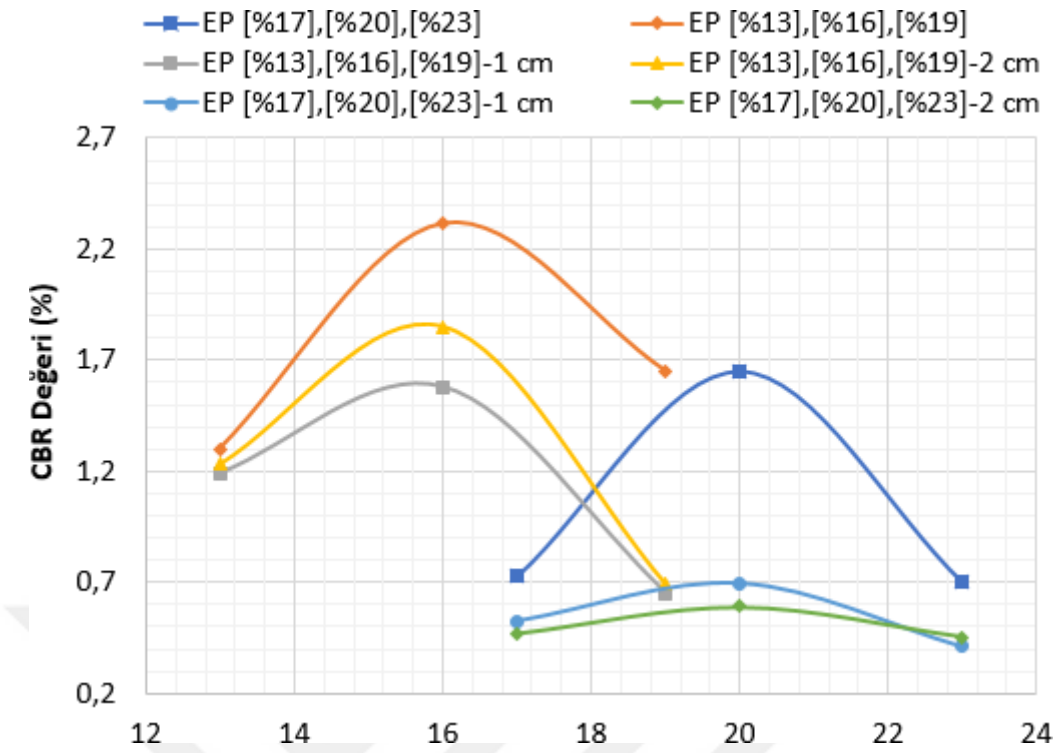
2 cm çapa sahip açıklıkların kum ile doldurulması ile, 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerinde elde edilen şişme oranları $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %1,24'den %3,10'a, $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,74'den %1,23'e, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında ise %0,36'dan %1,24'e kadar artış gözlenmiştir.

4.4 Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyinde Kum Malzemenin Zeminlerin CBR Oranlarına Olan Etkisi

600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak kompakte edilen düşük plastisiteli EP, ES-7 ve EK zeminlerinde gerçekleştirilen kum katkısız ve kum katkılı CBR deneyinden elde edilen CBR değerleri Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de görülmektedir. Kompaksiyon kalıbında 1 cm ve 2 cm dış çapa sahip borular ile elde edilen açıklıklara, hesaplanan oranlarda eklenen kum malzemenin etkisinde elde edilen CBR değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. CBR değerlerinin kıyaslanmasında alt okumalar dikkate alınmıştır. Alt ve üst okumalarından elde edilen CBR değerleri ayrıntılı olarak EK-B'de verilmiştir.

Şekil 4.31'de görüldüğü üzere 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerine göre kompakte edilen EP deney numunesine ait CBR değerleri sırasıyla; $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %1,65'den %2,32'ye, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,73'den %1,3'e ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,70'den %1,65'e yükselmiştir.

1 cm çaplı çelik borular ile açılan boşluğa eklenen kum ile ve artan kompaksiyon enerjisine göre sırasıyla $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,69'dan %1,58'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,53'den %1,19'a ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,41'den %0,65'e kadar yükselmiştir.



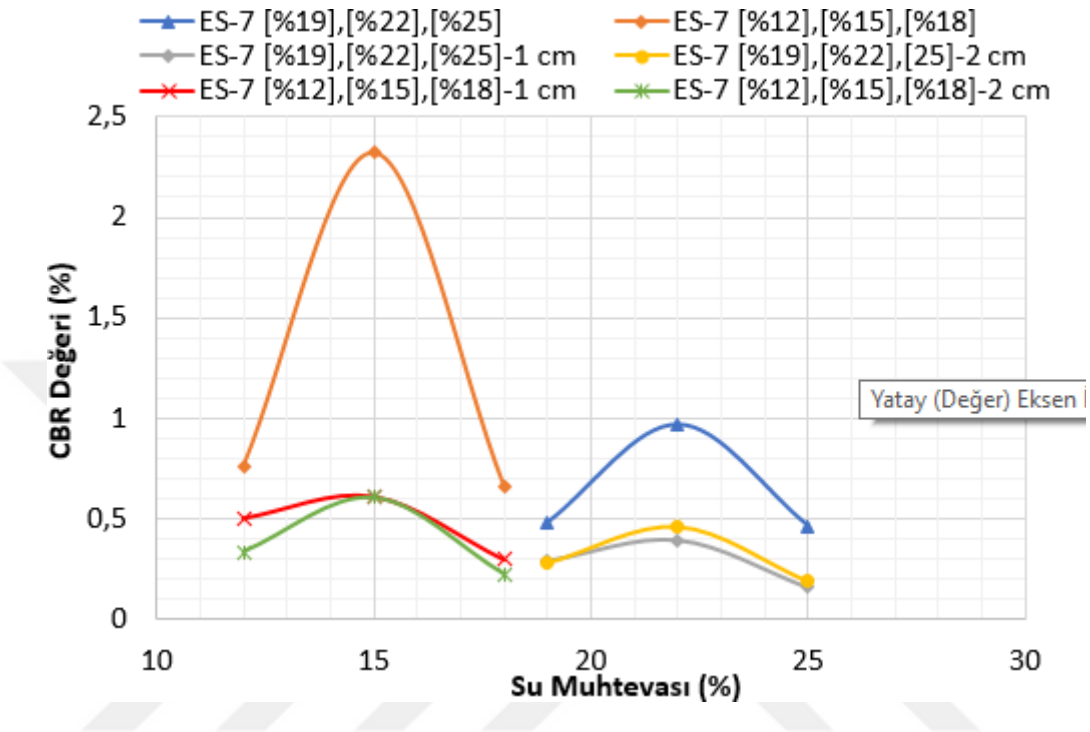
Şekil 4.31 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EP deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde CBR oranlarındaki değişim

2 cm çaplı çelik borular ile açılan boşluğa eklenen kum ile ve artan kompaksiyon enerjisine göre sırasıyla; $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,59'dan %1,85'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,47'den %1,23'e ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,45'den %0,69'a kadar yükselmiştir.

Şekil 4.31'de görüldüğü üzere; 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjilerine göre kompakte edilen EP deney numunesine ait CBR değerleri sırasıyla; $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,97'den %2,32'ye, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,48'den %0,76'ya ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,46'dan %0,66'ya yükselmiştir.

1 cm çaplı çelik borular ile açılan boşluğa eklenen kum ile ve artan kompaksiyon enerjisine göre sırasıyla $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,39'dan %1,61'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,29'dan %0,50'ye ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,16'dan %0,30'a kadar yükselmiştir.

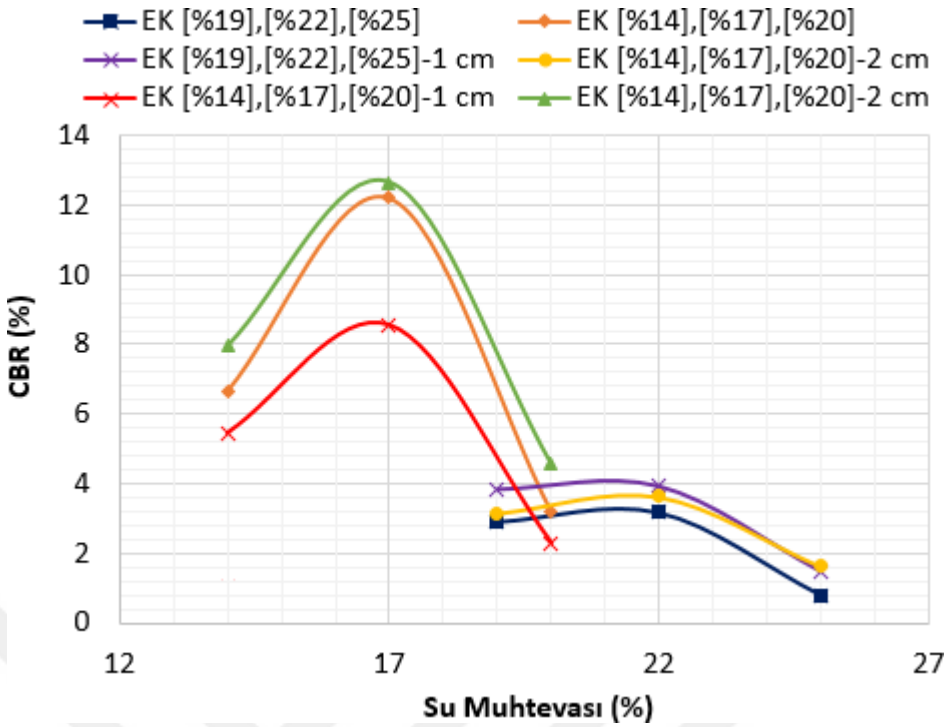
2 cm çaplı çelik borular ile açılan boşluğa eklenen kum ile ve artan kompaksiyon enerjisine göre sırasıyla $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %0,46'dan %0,61'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %0,28'den %0,33'e ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,19'dan %0,22'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 4.32 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış ES-7 deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde CBR oranlarındaki değişim

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de EP ve ES-7 deney numunelerinde olduğu gibi, EK deney numunesine ait CBR değerlerinin artan kompaksiyon enerjisine göre artış oranları Şekil 4.33'de verilmiştir. Üç su muhtevasında sırasıyla $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %3,19'dan %12,21'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %2,92'den %6,66'ya ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %0,81'den %3,17'ye şeklindedir.

1 cm çaplı çelik borular ile açılan boşluğa eklenen kum ile ve artan kompaksiyon enerjisine göre sırasıyla $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %3,93'den %8,54'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %3,84'den %5,45'e ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %1,49'dan %2,30'a kadar yükselmiştir.



Şekil 4.33 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri kullanılarak sıkıştırılmış EK deney numunesine ait 1 cm ve 2 cm çaplı kum dren modelinde CBR oranlarındaki değişim

2 cm çaplı çelik borular ile açılan boşluğa eklenen kum ile ve artan kompaksiyon enerjisine göre sırasıyla $\omega_{optimum}$ su muhtevasında %3,63'den %12,64'e, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında %3,16'dan %7,96'ya ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında %1,64'den %4,57'ye kadar yükselmiştir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında deneye tabi tutulan EP, ES-7 ve EK kil zeminlerin; kayma mukavemetine, şişme potansiyellerine ve CBR değerlerine, kompaksiyon enerjisinin ve su muhtevasının etkileri araştırılmıştır.

İlk olarak Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma (USCS) sistemine göre yer aldığı zemin sınıfı; şişme potansiyeli az, düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirlenmiştir. Hidrometre ve piknometre deneyleri ile fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneylerden sonra 600 KJ/m^3 ve 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjileri ile kompakte elde edilen zeminlerin $\omega_{optimum}$ ve $\gamma_{k\text{-}max}$ değerleri belirlenmiştir. Ardından ES-7 ve EP deney numuneleri üzerinde, boyu çapının en az iki katı olacak şekilde hazırlanan silindirik numuneler üzerinde hem serbest basınç hem de konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli (UU) deneyleri ile kayma mukavemeti parametreleri bulunmuştur.

Tek eksenli yüklemede elde edilen drenajsız kayma mukavemeti (C_u), kompaksiyon enerjisi 2700 KJ/$m^{3'}$e yükseldiğinde, 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisine göre artış göstermektedir. Literatürde yer alan (Hussain [9]), (Amarnath [10]), (Sabat ve Mohrana [14]), (Özaydın [41]) ve (Seed ve Chan [42]) çalışmaları ile kompaksiyon enerjisi ve su içeriğinin etkisinin, tek eksenli basınç dayanımlarındaki değişimler ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Üç eksenli basınç deneyinde (UU) elde edilen kayma mukavemeti parametreleri olan; kohezyon (c) su muhtevasındaki artış ile azalan bir davranış gösterirken, kayma

mukavemeti açısı (Ø) ise $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasından $\omega_{optimum}$ su muhtevasına doğru artan davranış sergilemiş ve bu noktadan sonra düşmeye başlamıştır.

İnce daneli zeminlerin geçirgenliği hakkında elde edilen bulgular; literatürde yer alan (Özaydın [41]), (Othman vd. [27]) ve (Mitchell [45]) çalışmaları ile uyumlu olduğu ve ince daneli zeminlerde, $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında en yüksek, $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında en düşük hidrolik iletkenlik değerine sahip olduğu ve $\omega_{optimum}$ ve $\omega_{optimum}$+3 su muhtevası ile arada büyük farkların olmadığı tespit edilmiştir.

CBR deneyinde, kompaksiyon enerjisi ve su içeriklerine göre farklılık gösteren gerilme oranları mevcuttur. Sıkıştırma enerjisindeki artış düşey gerilme oranlarını yükseltmiştir. Fakat kompaksiyon kalıplarında 1 cm ve 2 cm çaplı borular ile oluşturulan boşluklara eklenen kum malzemesi ile gerilme oranlarında düşüş gözlenmiştir.

Laboratuvar ortamında yaş method kullanılarak gerçekleştirilen CBR deneyleri sonuçları, farklı kompaksiyon enerjileri ve farklı üç su muhtevasına göre değerlendirilmiştir. Kompaksiyon enerjisinin artmasıyla elde edilen CBR değerlerinde artış gözlenmiştir ve optimum su muhtevasında maksimum değerler elde edilmiştir. Bu artış literatürde yer alan (Holtz [1]), (Amarnath [10]), (Horpibulsuk vd. [12]), (Sabat ve Mohrana [14]) ve (Vinod [17]) çalışmaları ile paraleldir.

Çalışma kapsamında kullanılan EP, ES-7 ve EK deney numunelerinden CBR deneyi sonucu elde edilen şişme oranları; literatürde yer alan (Hussain [9]) ve (Seed ve Chan [42])'ye ait çalışmalar da baz alınarak değerlendirildiğinde optimumdan kuru tarafta, kompaksiyon enerjisinin artması ile yükseldiğini görmekteyiz. İnce daneli zeminlerde optimum su muhtevasında kompaksiyon enerjisinin yükselmesi ile şişme oranlarındaki artış (Horpibulsuk vd. [12]) tarafından yürütülen çalışma ile paralellik göstermektedir.

Kompaksiyon kalıplarında kompakte edilen zeminlerde, maksimum 2 cm çaplı boru yardımı ile açılan boşluklara belirli oranlarda eklenen kum malzemenin, CBR değerleri ve şişme oranlarına olan etkisi araştırılmıştır. Kullanılan kum belirli bir sıkılıkta sıkıştırılmadığı için şişme drenlerin olduğu tarafa doğru meydana gelmiştir ve kompaksiyon enerjisi yükseldikçe gözlenen şişmenin yüzeyde meydana geldiği gözlenmiştir. 2 cm çaplı boru yardımı ile oluşturulan drenlerde zemin içerisindeki ıslanma oranı daha yüksektir. Su emme yüzeyi arttıkça şişme oranları 1 cm'lik boru 95

yardımı ile oluşturulan drenlere göre yükselmiş ve daha fazla mukavemet kaybı gözlenmiştir.

Kumsuz gerçekleştirilen CBR deneyleri ile kıyas edildiklerinde elde edilen CBR değerlerini ve şişme potansiyelini azaltıcı yönde etki etmişlerdir.

KAYNAKLAR

[1] Holtz, D. R., Kovacs, D. W., ve Sheaden, C. T., (2015). Geoteknik Mühendisliğine Giriş, 2, Nobel Akademik, Ankara.

[2] Malayoğlu, U., ve Akar, A., (21-22 Nisan). "Killerin Sınıflandırmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi", Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir / Türkiye.

[3] Altmeyer, W. T., 1955. Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Testing and Materials, 81(2): 17-19.

[4] Holtz, W. G. ve Gibbs, H. J., (1956). "Enginnering Properties of Expansive Clays" Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE), 121: 641–663.

[5] Schafer, W.M. ve Singer, M. J., (1976) " Influence of Physical and Minerological Properties on Swelling of Soils in Yolo Country, California " Soil Sceince Society American Journal: 557-562.

[6] El-Sohby, M. A. ve Rabba, E. A., (1981) "Some Factors Affecting of Clayey Soils" Geotechnical Engineering, 12(1):19-39.

[7] Attom, M. F., (1997). "The Effect of Compactive Energy Level on Some Soil Properties", Applied Clay Science, 1997, 12(1-2): 61-72.

[8] Sridharan, A. ve Gurtuğ, Y., (2004) "Swelling Behaviour of Compacted Fine Grained Soils". Engineering Geology 72(1): 9-18.

[9] Hussain, S., (2017) "Effect of Compaction Energy on Engineering Properties of Expansive Soils", Civil Engineering Journal, 3(8): 610-616.

[10] Amarnath, M.S., (2012). "Strength and Performance Characteristics of Soil Compacted at Different Energy Levels", International Journal of Earth Sciences and Engineering, 5(2):347-351.

[11] Gosh, R., (2013) "Effect of Soil Moisture in the Analysis of Undrained Shear Strength of Compacted Clayey Soil", Journal of Civil Engineering and Construction Technology No: 4 / JANUARY 2013, DOI : 10.5897/JCECT12.070.

[12] Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Chamket, A., ve Chinkulkijniwat A., (2013). "Compaction Behaviour of Fine Grained Soils and Crushed Rocks" , Soils and Foundations, 53(1):166-172.

[13] Talukdar, K.D., (2014). "A Study of Correlation Between California BearingRatio (CBR) Value With Other Properties of Soil", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, No:4 / JANUARY 2014, ISSN: 2250-2459.

[14] Sabat, A.K. ve Moharana, R,K., (2015). "Effect of Compaction Energy on Engineering Properties of Fly Ash–Granite Dust Stabilized Expansive Soil", International Journal of Engineering and Technology No: 5 / OCT-NOV 2015, ISSN: 0975-4024.

[15] Lakshmi, S.M., Subramanian, S., Lalithambik, M.P., Vela, A. M. ve Ashni, M., (2016), "Evalutıon Of Soaked and Unsoaked CBR Values of Soil Based on the Compaction Characteristics", Malaysian Journal of Civil Engineering, 28(2):172-182.

[16] Ramasubbarao, G.V. ve Siva Sankar, G., (2013) "Predicting Soaked CBR Value of Fine Grained Soils Using Index and Compaction Characteristics", Jordan Journal of Civil Engineering, 3:354-360.

[17] Vinod, P., Sridharan, A., ve Soumya, R.J., (2015). "Effect of Compaction Energy on CBR and Compaction Behavior" , Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 168(2):116-121.

[18] Rijal, P.R., (2011). Strength Behaviour of Clay Minerals in Unconsolidated Undrained Trixial Test, Postgraduate Thesis, California State University, Fullerton, Division, ASCE, 88(SM4):53-87.

[19] Seed, H.B., Woodward, R.J., ve Lungreen, R., (1962) "Predicting of Swelling Potential of Compacted Clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, 88 (3): 53-87.

[20] Nayak, N.V., ve Christensen R.W., (1971). "Swelling Characteristics of Compacted Expansive Soils", Clay and Clay Minerals, 19: 251-261.

[21] Komornik, A. ve David, D., (1969) "Prediction of Swelling Pressure of Clays" Journal of SMFE Div., ASCE, 95(1): 209-225.

[22] Alonso, E.E., Vanuat, J., ve Gens, A., (1999). "Modelling the Mechanical Bahaviour of Expansive Clays" , Engineering Geology, 54: 173-183.

[23] Şenkan, S., (2017). CBR Test Sonuçlarının Üç Eksenli Deney Sonuçları ile Korelasyonunun Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[24] Tiwari, B., Principe, M., ve Biabani, Mahdi., (2014). "Influence of Activity and Mineralogy in Compaction and Shear Strength Characteristics of Clays" , Geo-Congress Technical Papers, GSP 234 ASCE, 1357-1365.

[25] Mousavi, S. Ve Wong, L.S., (2015). “Mechanical Behaviour of Compacted Stabilized Kaolin and Cement”, Jordan Journal of Civil Engineering, 9(4):477-486.

[26] Goodary, R., Lecomte-Nana, G.L., Petit, C., ve Smith, D.S. (2012). “Investıgatıon of the strength development in Cement-Stabilized Soils of Volcanic Origin“, Construction and Building Materials, 28(1): 592-598.

[27] Othman M.A., ve Benson, C.H., (1992). “Effect of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity of Three Compacted Clays from Wisconsin, In Transportation Research Record 1369, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. : 118-125.

[28] Carman, P.C., (1937). “Fluid Flows Through Granular Beds”, Institute of Chemical Engineers, London, England, Vol.15.

[29] Burmister, D.M., (1954). “Principles of Permeability Testing of Soils”, ASTM Symposium on Permeability of Soils, Astm Special Technical Publication, No.163.

[30] Mıchaels A.S. ve Lin, C.S., (1954). “The Permeability of Kaolinite”Industrial and Enginering Chemistry, Vol.46.

[31] Isdale, M. ve Lee, Y.C., (1992). “An Object Oriented Modelling Framework for Geographic Information”, ISPRS XVII. Congress, 2-14 August 1992, Washington.

[32] Wang, M.C. ve Huang, C.C., (1984). ”Soil Compaction and Permeability Prediction Models”, Journal of Enviromental Engineering, 110(6): 1063-1083.

[33] Freudland, D.G., Xing, A., ve Huang, S., (1994). “Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil Water Characteristic Curve”, Canadian Geotechnical Journal, 31(4): 533-546.

[34] Nazari, S., Hassanolurad, M., Chavoshi, E., ve Mirzaii, A., (2018). “Experimental İnvestigation of Unsaturated Silt-Sand Soil Permeability”, Advances in Civil Engineering, , JANUARY/2018, DOI: 10.1155: 1-12.

[35] Rangeard, D., Phan, P.T.P., Martinez, J., ve Lambert, S., (2016). “Mechanical Behaviour of Fine Grained Soil Reinforced by Sand Columns”, An Experimental Laboratory Study”, Geotechnical Testing Journal, 39(4): 649-659.

[36] Hughes, J.M.O., ve Withers N.J., (1974). ”Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns” , Ground Eng., 7(3): 42-49.

[37] Narasimha Rao, S., Prasad, Y.V.N.S., ve Hanumanta Rao, V., (1992). “Use of the Stone Columns in Soft Marine Clays” , Proc., 45 th Canadian Geotechnical Conf., Canadian Geotechnical Society, Toronto, 9(1)-9(7).

[38] Muir Wood, D., Hu, W., ve Nash, D.F.T., (2000). “Group Effects in Stone Column Foundations: Model Tests” , Geotechnique, 50(6): 689-698.

[39] Sivakumar, V., Mckelvey, D., Graham, J., ve Hughus, D., (2004). “Trixial Tests on Model Sand Columns in Clay”, Canadian Geotechnical Journal, 41: 299-312.

[40] Mckelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., ve Graham, J., (2004). “Modelling Vibrated Stone Columns in Soft Clay” , Proc. Inst. Civil Eng. Geotech. Engineering, 157(3), 137-149.

[41] Özaydın K., (2011). Zemin Mekaniği, Güncelleştirilmiş Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[42] Seed, H.B., ve Chan C.K., (1959). “Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays” , Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 85 (SM5): 87-128.

[43] Lambe, T.W., (1958a). “The Structure of Compacted Clay” , Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 84 (SM2), 1655-1/1655-34.

[44] Das, M.Braja., (2014). Principles of Foundation Engineering, Eighth Edition, Cengage Learning, United States of America.

[45] Mitchell, J.K., Hooper D.R., ve Campanella, R.G., (1965). “Permeability of Compacted Clay” , Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 91 (SM4): 41-65.

[46] Head, K.H., (2006). Manual of Soil Laboratory Testing, Vol.2, Second Edition, Pentech Press, London.

[47] Murthy, V.N.S., (2009). Geotechnical Engineering Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, CRC Press Taylor&Francis Group, Newyork.

[48] Mitchell, J.K., (1993). Fundamentals of Soil Behaviour, Second Edition, John Wiley&Sons, Newyork.

[49] Özaydın, K., (2010). Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

[50] Terzaghi, K., Peck, B.Ralph., ve Mesri, G., (2000). Soil Mechanics in Engineering Practise, Third Edition, A Wiley İnterscience Publication, Illinois.

[51] Benson, C.H., ve Gribb, M.M., (1997). “Measuring Unsaturated Hydraulic Conductivity in the Laboratory and Field” , In Unsaturated Soil Engineering Practice, Geotechnical Special Publication No.68:113-168, American Society of Civil Engineers, Newyork.

[52] Aytekin, M., (2000). Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.

EK-A

ESANPLAST (EP), ESBKA-7 (ES-7) VE ESBAKAS (EK) DENEY NUMUNELERİNE AİT MİNERALOJİK ÖZELLİKLER

Çalışma kapsamında kullanılan zemin numuneleri mineralojik farklılıklarından dolayı birbirinden farklı kısaltmalar ile ifade edilmiştir. Deney numunelerine ait teknik ve mineralojik farklılıklar detaylı olarak verilmiştir.

A-1 Esanplast (EP) Deney Numunesine Ait Özellikler

Çizelge A.1 EP deney numunesinin kimyasal bileşenleri

A.Z. (LoI)	**(%)**	10,00 ± 1,00
SiO_2	**(%)**	57,50 ± 1,00
Al_2O_3	**(%)**	27,00 ± 1,00
Fe_2O_3	**(%)**	1,50 ± 0,30
TiO_2	**(%)**	1,20 ± 0,10
CaO	**(%)**	0,20 ± 0,10
MgO	**(%)**	0,45 ± 0,10
Na_2O	**(%)**	0,20 ± 0,10
K_2O	**(%)**	1,70 ± 0,20
Suda Çöz.Tuz (Soluable Salt)	**(%)**	0,40 ± 0,10
Suda Çöz. SO_4 (Soluable SO_4)	**(%)**	0,20 ± 0,10
C-Karbon İçeriği (Carbon Content)*	**(%)**	1,50 ± 0,10
SO_3-Sülfat İçeriği (Sulphate Content)*	**(%)**	0,15 ± 0,10

A-2 Esbka-7 (ES-7) Deney Numunesine Ait Özellikler

Çizelge A.2 ES-7 deney numunesinin kimyasal bileşenleri

A.Z. (LoI)	**(%)**	11,00 ± 1,00
SiO_2	**(%)**	54,00 ± 1,00
Al_2O_3	**(%)**	31,00 ± 1,00
Fe_2O_3	**(%)**	1,40 ± 0,20
TiO_2	**(%)**	1,00 ± 0,10
CaO	**(%)**	0,20 ± 0,10
MgO	**(%)**	0,40 ± 0,10
Na_2O	**(%)**	0,20 ± 0,10
K_2O	**(%)**	0,80 ± 0,20
Suda Çöz.Tuz (Soluable Salt)	**(%)**	0,40 ± 0,10
Suda Çöz. SO_4 (Soluable SO_4)	**(%)**	0,20 ± 0,10
C-Karbon İçeriği (Carbon Content)*	**(%)**	0,80 ± 0,20
SO_3-Sülfat İçeriği (Sulphate Content)*	**(%)**	0,20 ± 0,10

A-3 Esbakas (EK) Deney Numunesine Ait Özellikler

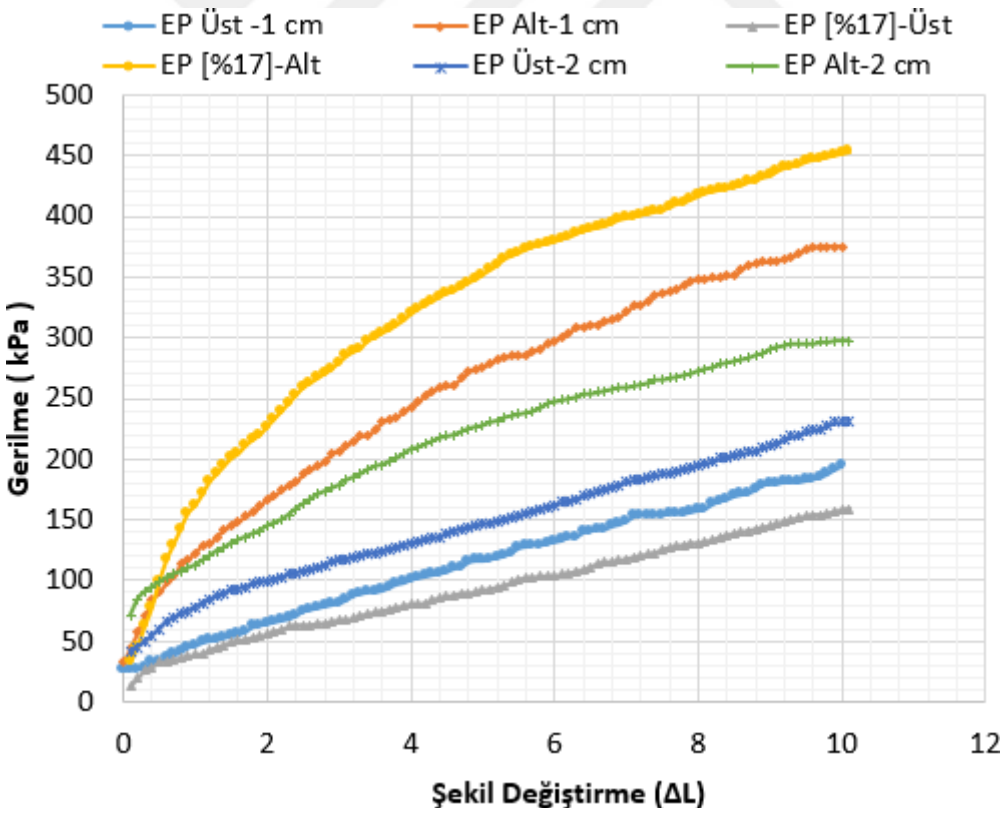
Çizelge A.3 EK deney numunesinin kimyasal bileşenleri

SiO_3	**(%)**	69,00
Al_2O_3	**(%)**	12,00-17,00
Fe_2O_3	**(%)**	0,50
TiO_2	**(%)**	Eser
CaO	**(%)**	0,10
Na_2O	**(%)**	0,20
K_2O	**(%)**	13,17
CR_2O_3	**(%)**	0,01
C-Karbon İçeriği (Carbon Content)*	**(%)**	1,50 ± 0,10
SO_3-Sülfat İçeriği (Sulphate Content)*	**(%)**	1,00

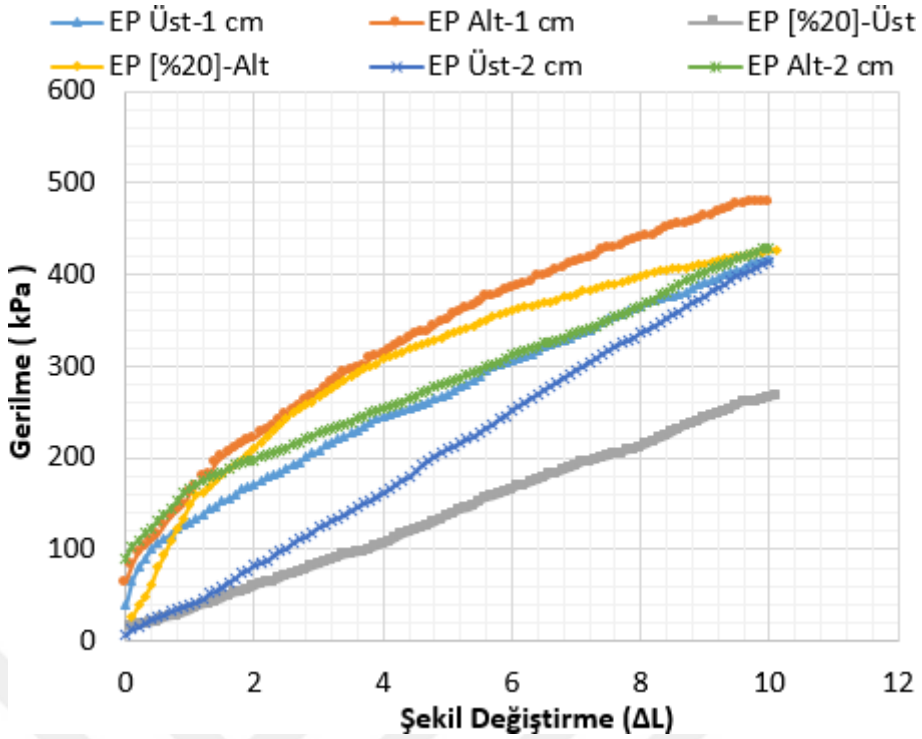
EK-B

ESANPLAST (EP) DENEY NUMUNESİNE AİT KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) DENEYİ SONUCU ELDE EDİLEN VERİLER

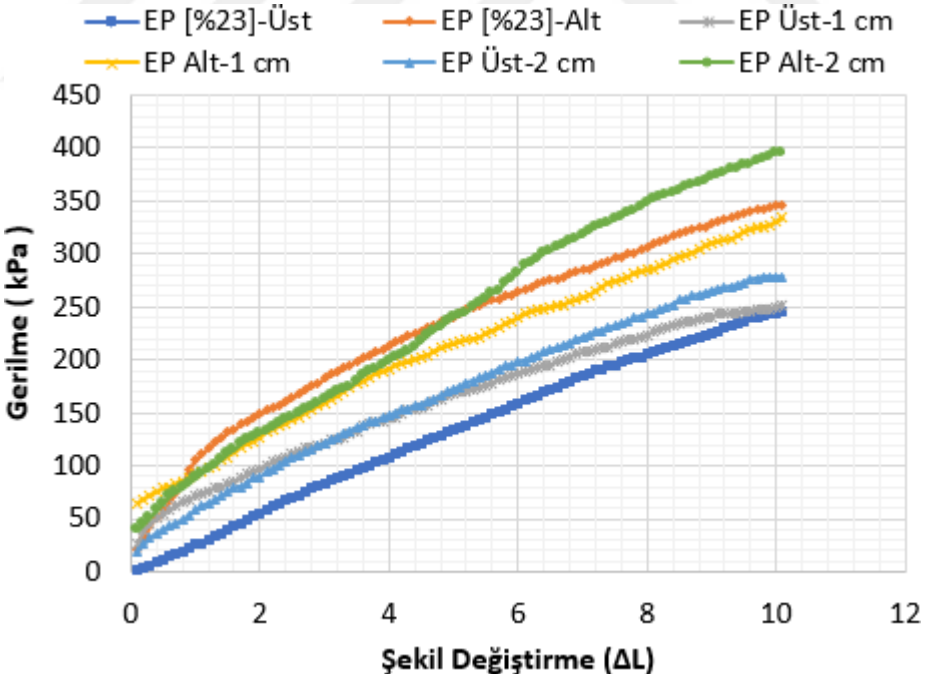
B-1 600 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EP Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri



Şekil B.1 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

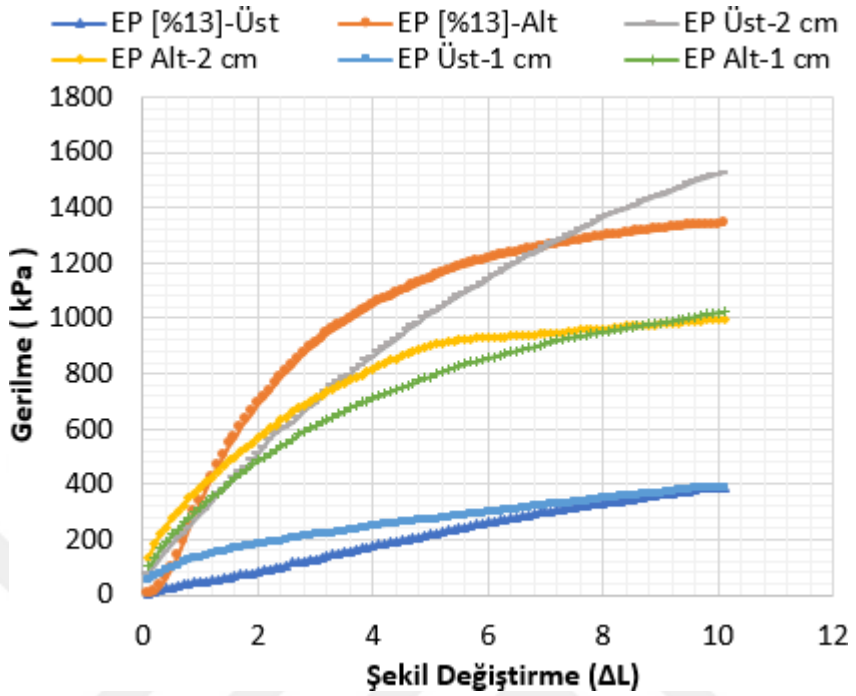


Şekil B.2 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

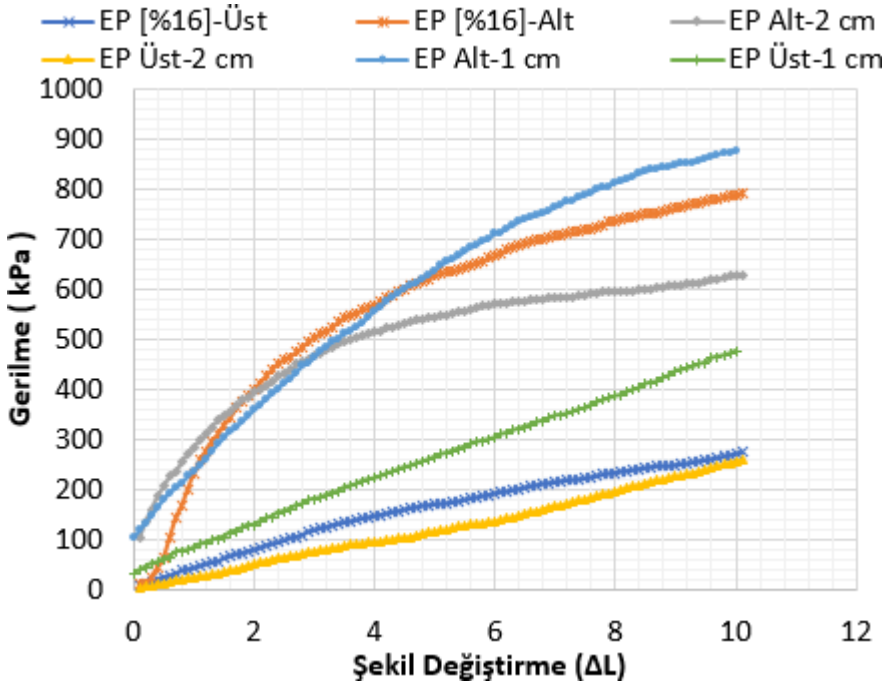


Şekil B.3 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

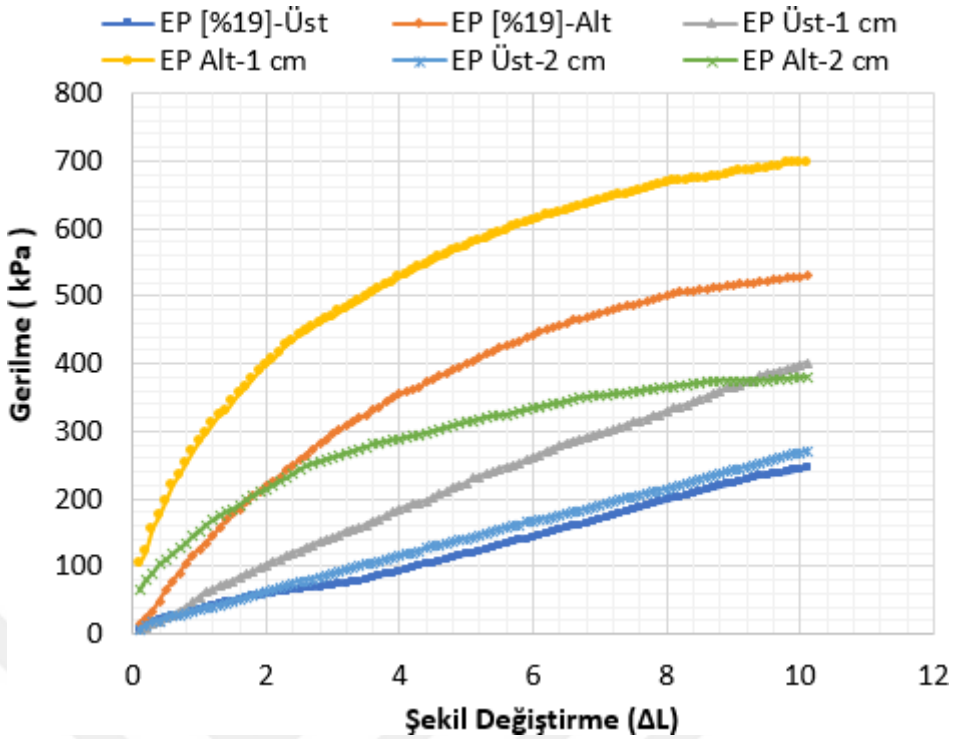
B-2 2700 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EP Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri



Şekil B.4 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması



Şekil B.5 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması



Şekil B.6 EP deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

B-3 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak EP Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları

Çizelge B.1 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	**-**	**Penetrasyon [mm]**	**CBR Okumaları [%]**	**Su Muhtevası [%]**	**Şişme Oranı [%]**
ω= [%17]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1778	26,86	8,03
		5,08 mm	0,1741		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,7346	24,23	
		5,08 mm	0,6652		
ω= [%20]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2032	27,49	6,94
		5,08 mm	0,2588		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,651	23,58	
		5,08 mm	0,4547		
ω= [%23]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2032	26,21	4,69
		5,08 mm	0,254		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,7003	25,12	
		5,08 mm	0,6289		

Çizelge B.2 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	**-**	**Penetrasyon [mm]**	**CBR Okumaları [%]**	**Su Muhtevası [%]**	**Şişme Oranı [%]**
ω= [%13]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,3265	22,91	10,13
		5,08 mm	0,4160		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,3062	20,92	
		5,08 mm	1,1804		
ω= [%16]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2902	24,61	9,00
		5,08 mm	0,3217		
	Alt Okuma	2,54 mm	2,3232	19,42	
		5,08 mm	2,1529		
ω= [%19]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1886	24,17	8,13
		5,08 mm	0,2249		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,6458	22,79	
		5,08 mm	1,0547		

B-4 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak Kum Katkılı EP Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları

Çizelge B.3 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	**-**	**Penetrasyon [mm]**	**CBR Okumaları [%]**	**Su Muhtevası [%]**	**Şişme Oranı [%]**
ω= [%17]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,3048	24,56	2,24
		5,08 mm	0,2757		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,4680	23,33	
		5,08 mm	0,4305		
ω= [%20]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2830	23,48	5,43
		5,08 mm	0,3918		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,5914	22,12	
		5,08 mm	0,5273		
ω= [%23]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,3084	25,47	2,04
		5,08 mm	0,3265		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,4172	24,11	
		5,08 mm	0,4523		

Çizelge B.4 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
ω= [%13]	**Üst Okuma**	2,54 mm	1,7417	22,36	7,55
		5,08 mm	1,9158		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,2337	20,20	
		5,08 mm	1,0232		
ω= [%16]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1923	27,55	5,73
		5,08 mm	0,2225		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,8505	29,90	
		5,08 mm	1,6933		
ω= [%19]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2213	29,74	5,11
		5,08 mm	0,2660		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,6966	23,60	
		5,08 mm	0,5902		

Çizelge B.5 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
ω= [%19]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,3592	27,70	0,20
		5,08 mm	0,4305		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,6518	22,64	
		5,08 mm	0,0837		
ω= [%16]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,4390	27,17	5,08
		5,08 mm	0,4959		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,5784	22,83	
		5,08 mm	1,4949		
ω= [%13]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,5733	29,09	3,25
		5,08 mm	0,5128		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,1518	22,91	
		5,08 mm	1,1901		

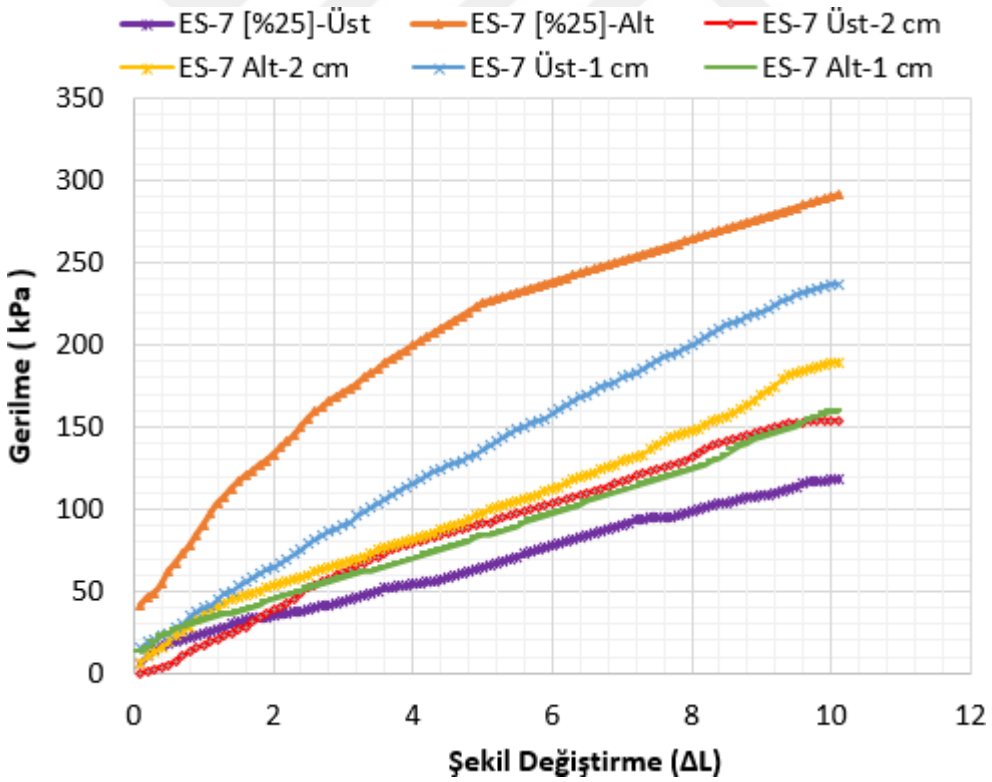
Çizelge B.6 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	**-**	**Penetrasyon [mm]**	**CBR Okumaları [%]**	**Su Muhtevası [%]**	**Şişme Oranı [%]**
ω= [%17]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2104	29,72	1,47
		5,08 mm	0,2177		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,5261	28,24	
		5,08 mm	0,5152		
ω= [%20]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,5297	30,25	4,88
		5,08 mm	0,5031		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,6930	23,77	
		5,08 mm	0,6531		
ω= [%23]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,3193	29,05	1,85
		5,08 mm	0,3168		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,4100	26,32	
		5,08 mm	0,4064		

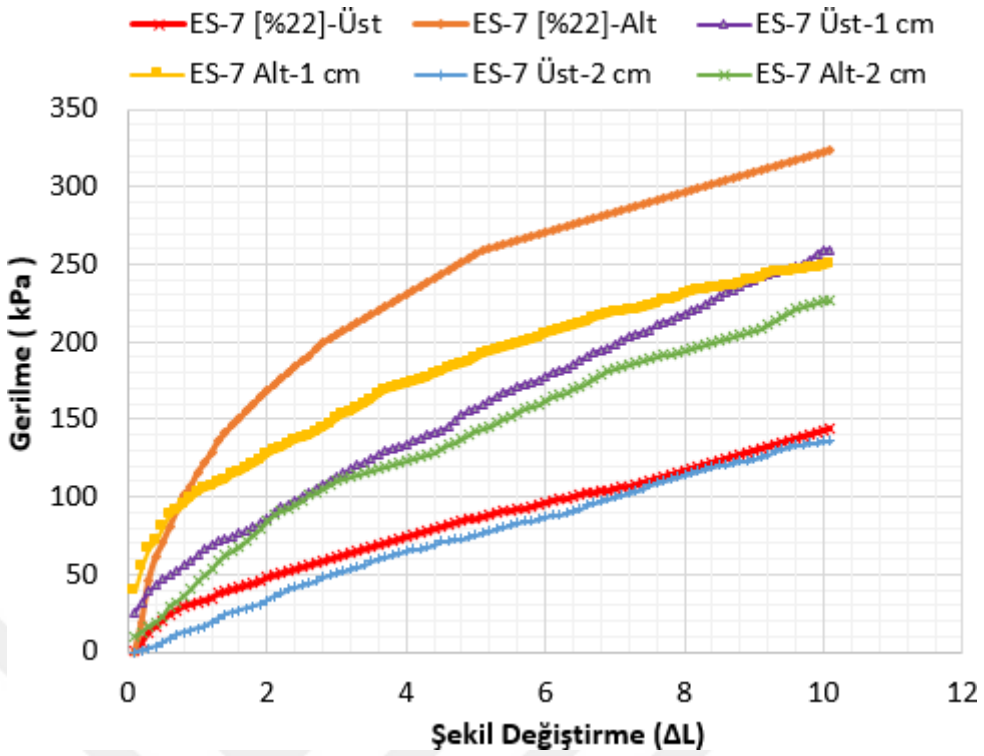
EK-C

ESBKA-7 (ES-7) DENEY NUMUNESİNE AİT KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) DENEYİ SONUCU ELDE EDİLEN VERİLER

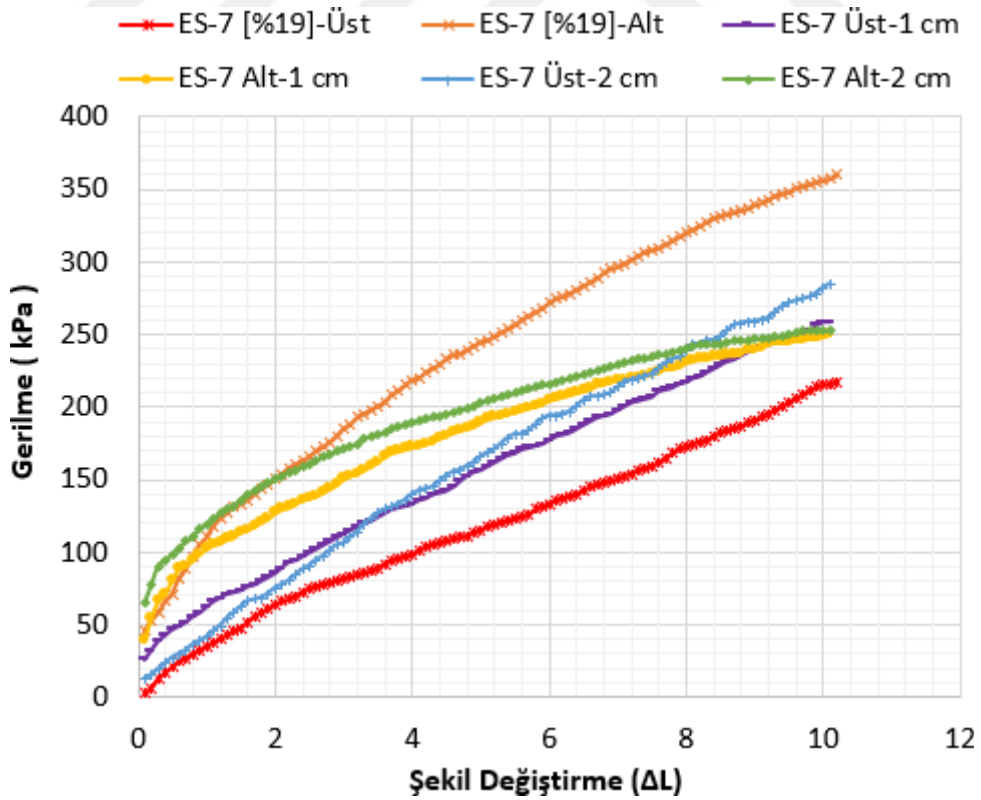
C-1 600 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EP Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri



Şekil C.1 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

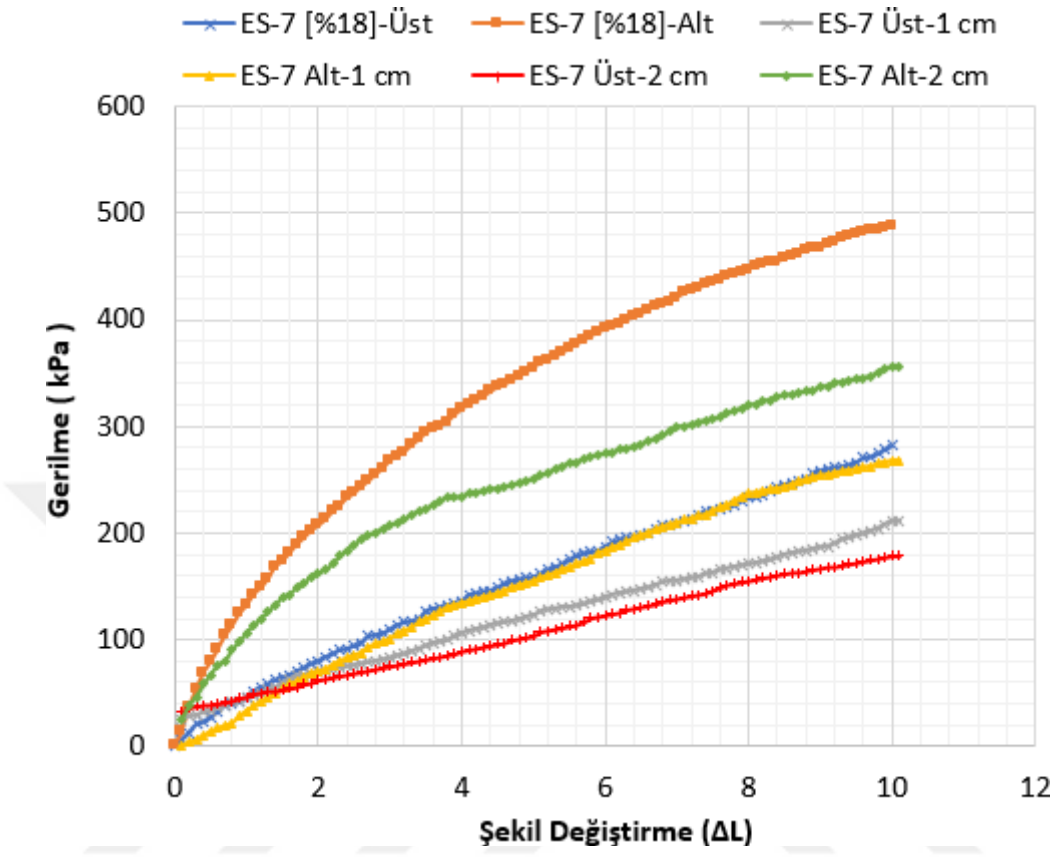


Şekil C.2 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırılması

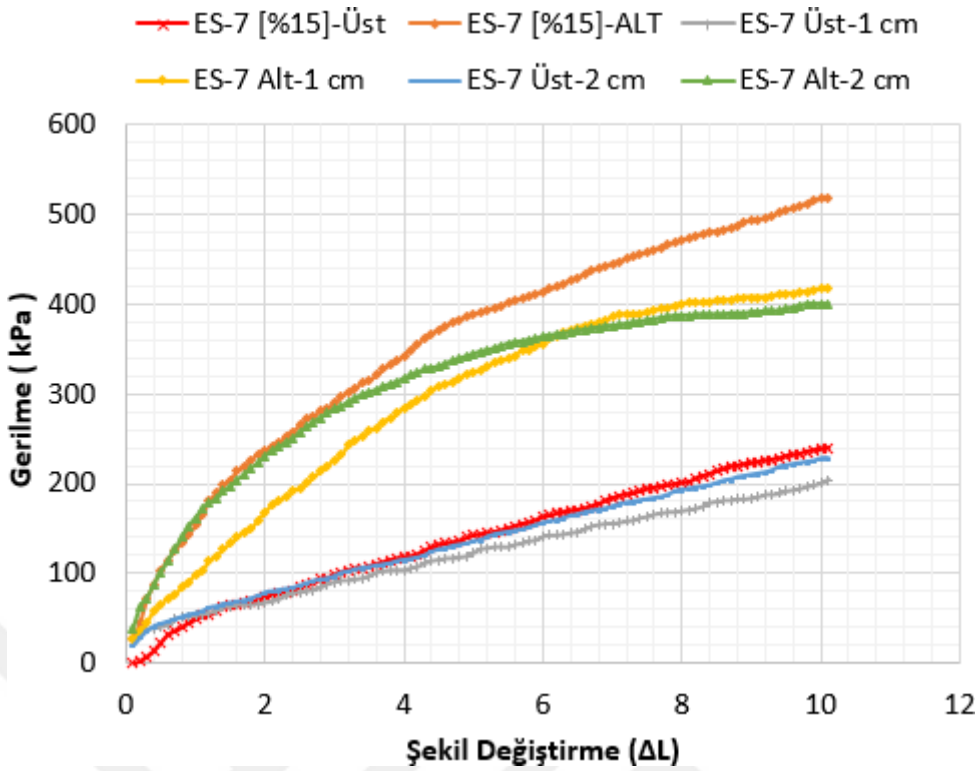


Şekil C.3 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırılması

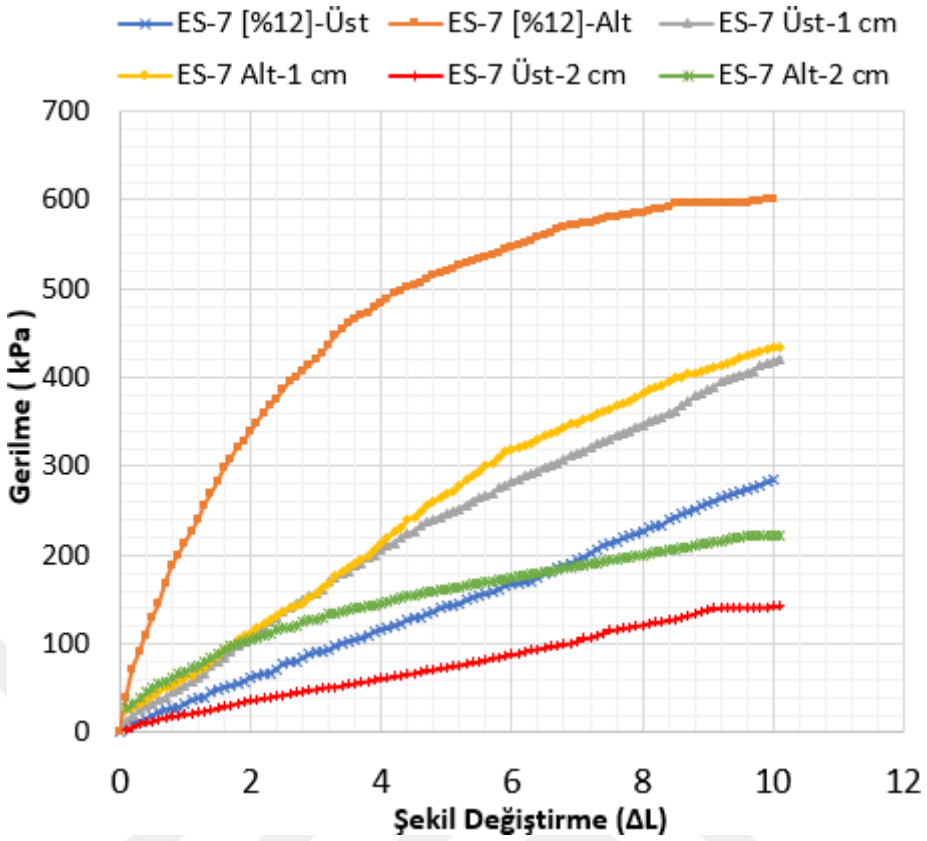
C-2 2700 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan ES-7 Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri



Şekil C.4 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırılması



Şekil C.5 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırılması



Şekil C.6 ES-7 deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırılması

C-3 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak ES-7 Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları

Çizelge C.1 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_=$ [%19]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2140	28,19	
		5,08 mm	0,2201		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,4753	23,75	
		5,08 mm	0,4596		
ω= [%22]	**Ust Okuma**	2,54 mm	0,1560	28,02	
		5,08 mm	0,1640		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,7334	24,41	
		5,08 mm	0,9662		
ω= [%25]	**Ust Okuma**	2,54 mm	0,1124	27,83	
		5,08 mm	0,1233		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,4563	25,39	
		5,08 mm	0,4233		

Çizelge C.2 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
ω= [%12]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2467	26,59	9,29
		5,08 mm	0,2685		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,7620	23,96	
		5,08 mm	0,7305		
ω = [%15]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2177	26,54	8,11
		5,08 mm	0,2660		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,0813	24,04	
		5,08 mm	0,9700		
ω = [%18]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2648	24,71	7,2
		5,08 mm	0,2975		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,6640	20,61	
		5,08 mm	0,6628		

C-4 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak Kum Katkılı ES-7 Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları

Çizelge C.3 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_{=}$ [%19]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1233	%29,25	2,50
		5,08 mm	0.1427		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,2830	%25,35	
		5,08 mm	0,2685		
ω= [%22]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2648	%30,45	4,90
		5,08 mm	0.3144		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,4572	%26,02	
		5,08 mm	0.3822		
ω= [%25]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1487	%27,25	2,71
		5,08 mm	0.1717		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,1741	%26,55	
		5,08 mm	0.1862		

Çizelge C.4 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_{=}$ [%12]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1233	%25,44	3,66
		5,08 mm	0.1403		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,3338	%23,36	
		5,08 mm	0,3048		
ω= [%15]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2503	%23,12	3,23
		5,08 mm	0.2564		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,6136	%20,19	
		5,08 mm	0.6023		
ω= [%18]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,1959	%24,47	3,04
		5,08 mm	0.2007		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,2242	%22,18	
		5,08 mm	0,2041		

Çizelge C.5 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_=$ [%19]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2866	28,05	
		5,08 mm	0,2975		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,2939	26,60	
		5,08 mm	0,2927		
ω= [%22]	**Ust Okuma**	2,54 mm	0,1959	29,37	
		5,08 mm	0,2370		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,3882	25,73	
		5,08 mm	0,3580		
ω= [%25]	**Ust Okuma**	2,54 mm	0,2286	26,11	
		5,08 mm	0,2588		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,1487	24,27	
		5,08 mm	0,1572		

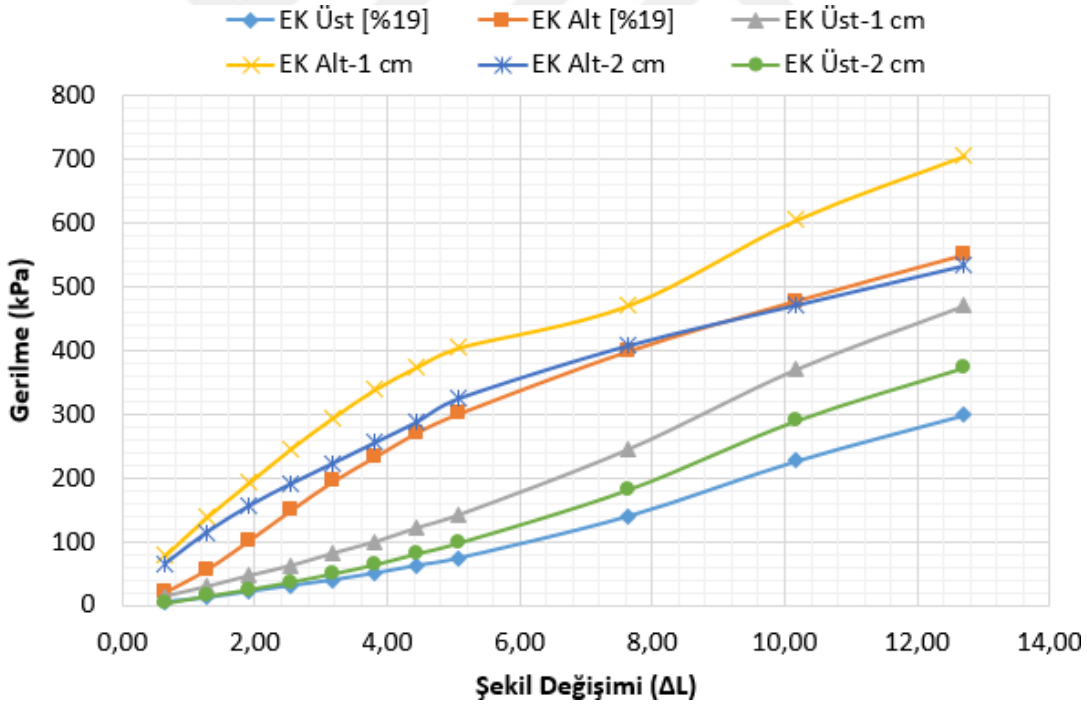
Çizelge C.6 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_=$ [%12]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,3955	%24,24	2,46
		5,08 mm	0,4668		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,3918	%21,30	
		5,08 mm	0,5018		
ω= [%15]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2249	%20,82	1,93
		5,08 mm	0,2370		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,5624	%19,56	
		5,08 mm	0,6096		
ω= [%18]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,2177	%23,85	0,56
		5,08 mm	0,2370		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,2467	%21,58	
		5,08 mm	0,2951		

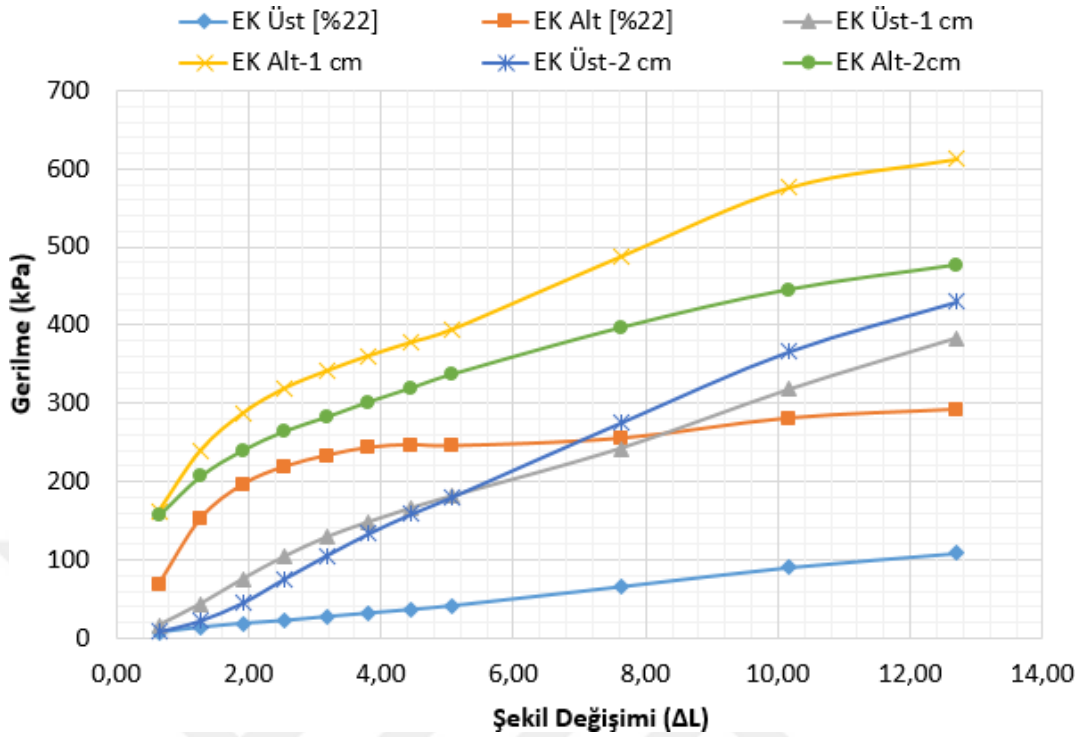
EK-D

EK DENEY NUMUNESİNE AİT KALİFORNİYA TAŞIMA ORANI (CBR) DENEYİ SONUCU ELDE EDİLEN VERİLER

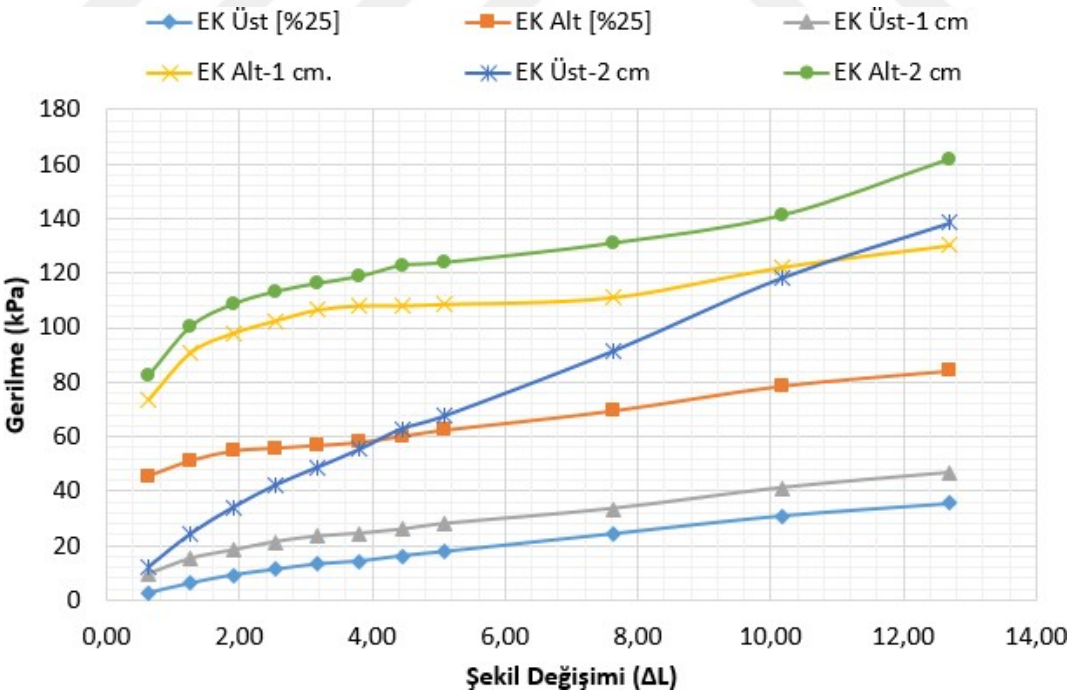
D-1 600 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EK Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri



Şekil D.1 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

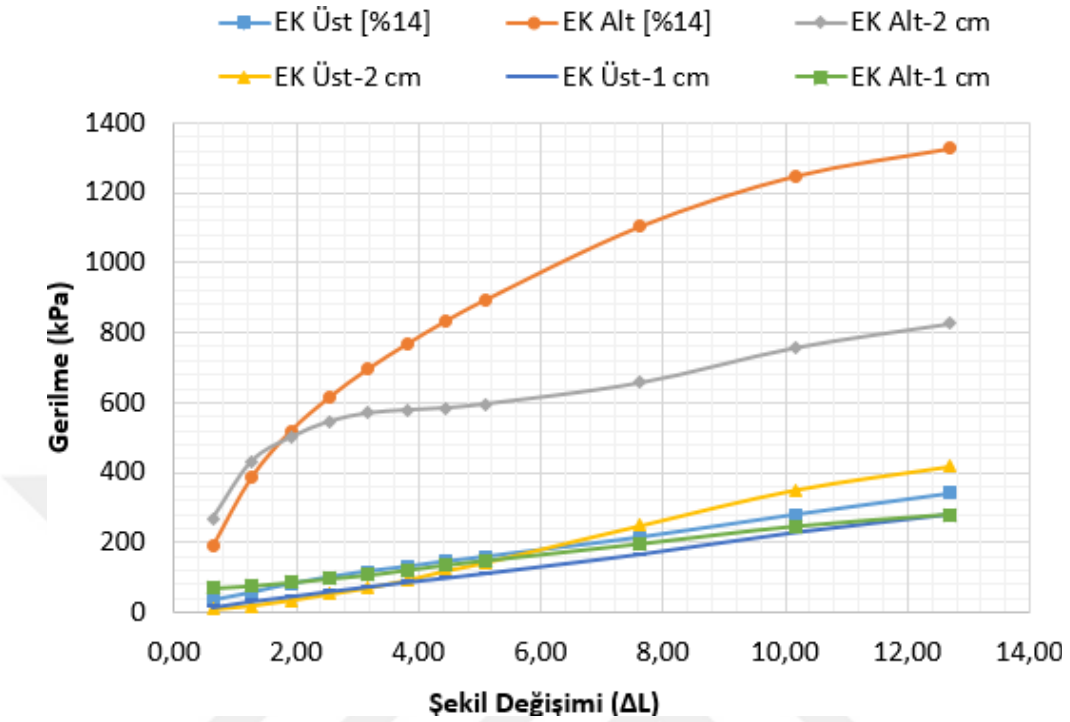


Şekil D.2 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

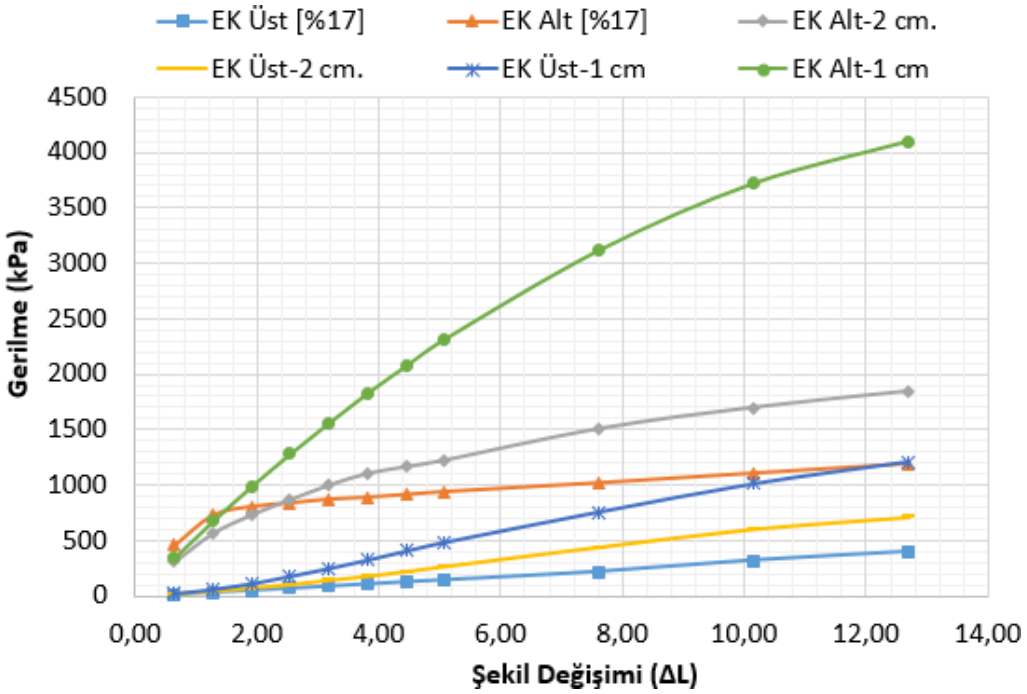


Şekil D.3 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

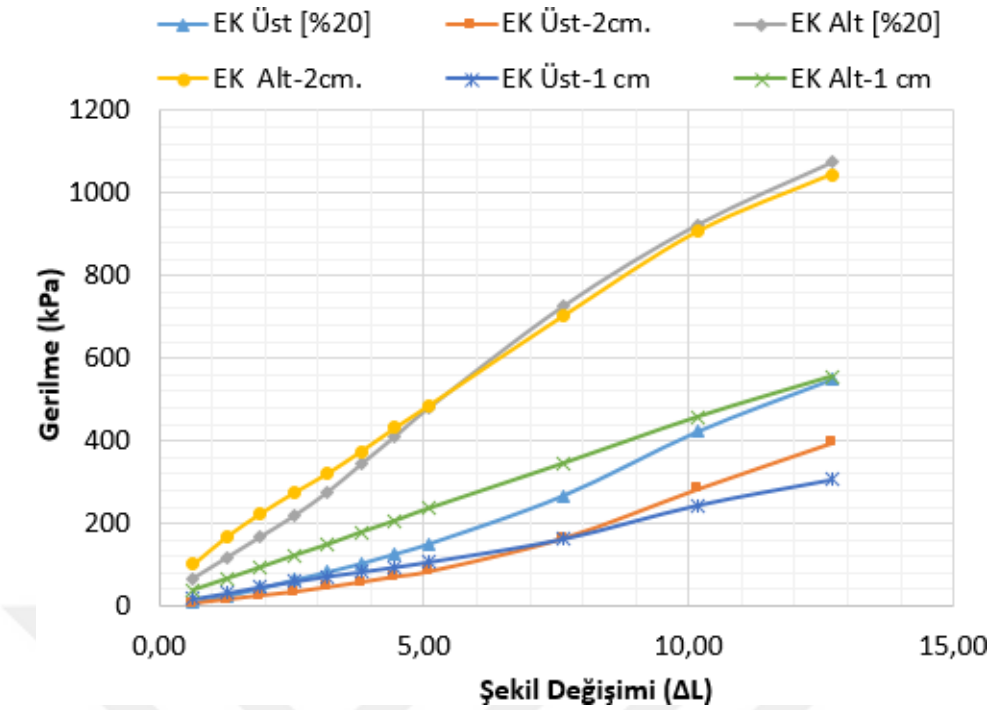
D-2 2700 KJ/m3'lük Sıkıştırma Enerjisi Kullanılan EK Deney Numunesine Ait Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Verileri



Şekil D.4 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$-3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması



Şekil D.5 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$ su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması



Şekil D.6 EK deney numunesine ait $\omega_{optimum}$+3 su muhtevasında gerçekleştirilen kum katkılı ve katkısız, alt ve üst CBR okumalarının karşılaştırması

D-3 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak EK Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları

Çizelge D.1 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_{=}$ [%19]	Üst Okuma	2,54 mm	0,46	27,48	2,03
		5,08 mm	0.72		
	Alt Okuma	2,54 mm	2,19	25,11	
		5,08 mm	2.92		
ω= [%22]	Üst Okuma	2,54 mm	0,31	30,18	0,95
		5,08 mm	0.40		
	Alt Okuma	2,54 mm	3,19	27,43	
		5,08 mm	2.38		
ω= [%25]	Üst Okuma	2,54 mm	0,16	30,84	0,41
		5,08 mm	0.17		
	Alt Okuma	2,54 mm	0,81	28,33	
		5,08 mm	0.61		

Çizelge D.2 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
ω= [%14]	Üst Okuma	2,54 mm	1,47	25,35	4,18
		5,08 mm	1.54		
	Alt Okuma	2,54 mm	6,66	24,47	
		5,08 mm	3,73		
ω= [%17]	Üst Okuma	2,54 mm	1,00	27,88	2,87
		5,08 mm	1.40		
	Alt Okuma	2,54 mm	12,21	23,59	
		5,08 mm	5.92		
ω= [%20]	Üst Okuma	2,54 mm	0,94	28,91	1,46
		5,08 mm	0.96		
	Alt Okuma	2,54 mm	3,17	22,88	
		5,08 mm	3.01		

D-4 Su Muhtevası Değişimine Bağlı Olarak Kum Katkılı ES-7 Deney Numunesine Ait Penetrasyon ve Şişme Oranları

Çizelge D.3 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
ω= [%19]	Üst Okuma	2,54 mm	0,54	27,82	1,24
		5,08 mm	0.96		
	Alt Okuma	2,54 mm	2,77	25,09	
		5,08 mm	3,16		
ω= [%22]	Üst Okuma	2,54 mm	1,10	29,09	0,54
		5,08 mm	1.75		
	Alt Okuma	2,54 mm	3,63	24,50	
		5,08 mm	3.28		
ω= [%25]	Üst Okuma	2,54 mm	0,61	31,43	0,10
		5,08 mm	0.66		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,64	27,24	
		5,08 mm	1.20		

Çizelge D.4 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 2 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_=$ [%14]	Üst Okuma	2,54 mm	0,77	27,42	3,10
		5,08 mm	1,38		
	Alt Okuma	2,54 mm	7,96	24,97	
		5,08 mm	5,79		
ω= [%17]	Üst Okuma	2,54 mm	1,41	26,84	1,83
		5,08 mm	2,53		
	Alt Okuma	2,54 mm	12,64	22,04	
		5,08 mm	11,88		
ω= [%20]	Üst Okuma	2,54 mm	0,50	24,63	1,24
		5,08 mm	0,81		
	Alt Okuma	2,54 mm	4,00	22,36	
		5,08 mm	4,57		

Çizelge D.5 600 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_=$ [%19]	Üst Okuma	2,54 mm	1,91	27,82	1,45
		5,08 mm	1,38		
	Alt Okuma	2,54 mm	3,59	25,09	
		5,08 mm	3,93		
ω= [%22]	Üst Okuma	2,54 mm	1,51	28,59	0,65
		5,08 mm	1,76		
	Alt Okuma	2,54 mm	4,66	24,36	
		5,08 mm	3,93		
ω= [%25]	Üst Okuma	2,54 mm	0,31	33,56	0,31
		5,08 mm	0,27		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,49	29,77	
		5,08 mm	1,06		

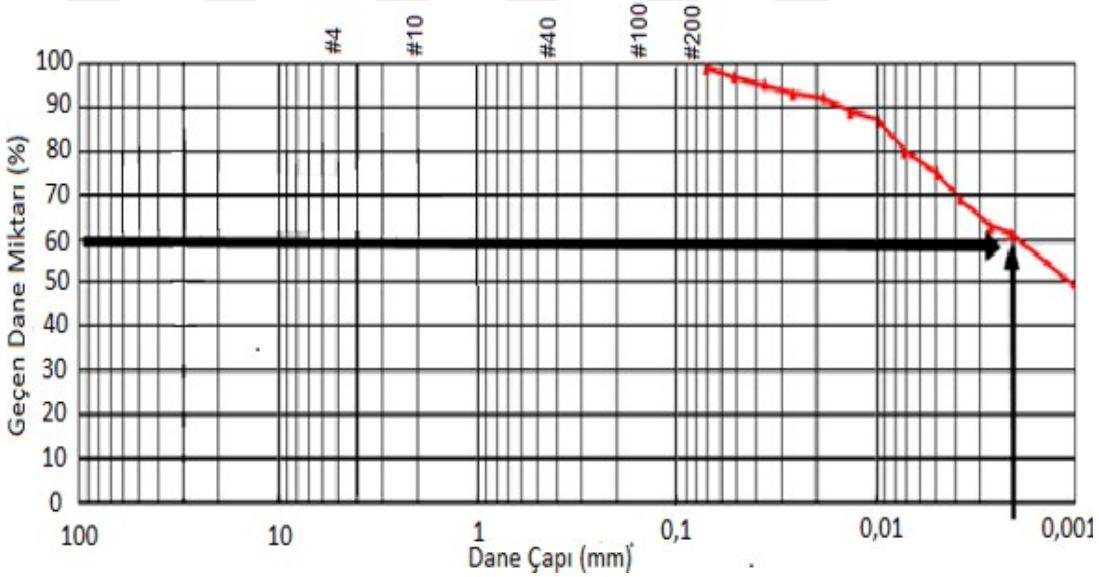
Çizelge D.6 2700 KJ/m^3 kompaksiyon enerjisi kullanılarak 1 cm açıklık ile elde edilen penetrasyon, su muhtevası ve şişme oranları

Kompaksiyon Su Muhtevası [%]	-	Penetrasyon [mm]	CBR Okumaları [%]	Su Muhtevası [%]	Şişme Oranı [%]
$\omega_=$ [%14]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,87	26,71	2,23
		5,08 mm	1,08		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,43	21,55	
		5,08 mm	1,45		
ω= [%17]	**Üst Okuma**	2,54 mm	2,56	24,76	1,65
		5,08 mm	4,69		
	Alt Okuma	2,54 mm	8,54	20,77	
		5,08 mm	7,48		
ω= [%20]	**Üst Okuma**	2,54 mm	0,87	23,95	1,08
		5,08 mm	1,04		
	Alt Okuma	2,54 mm	1,79	22,88	
		5,08 mm	2,30		

EK-E

EP, ES-7 VE EK DENEY NUMUNELERİNE AİT FİZİKSEL ÖZELLİKLER

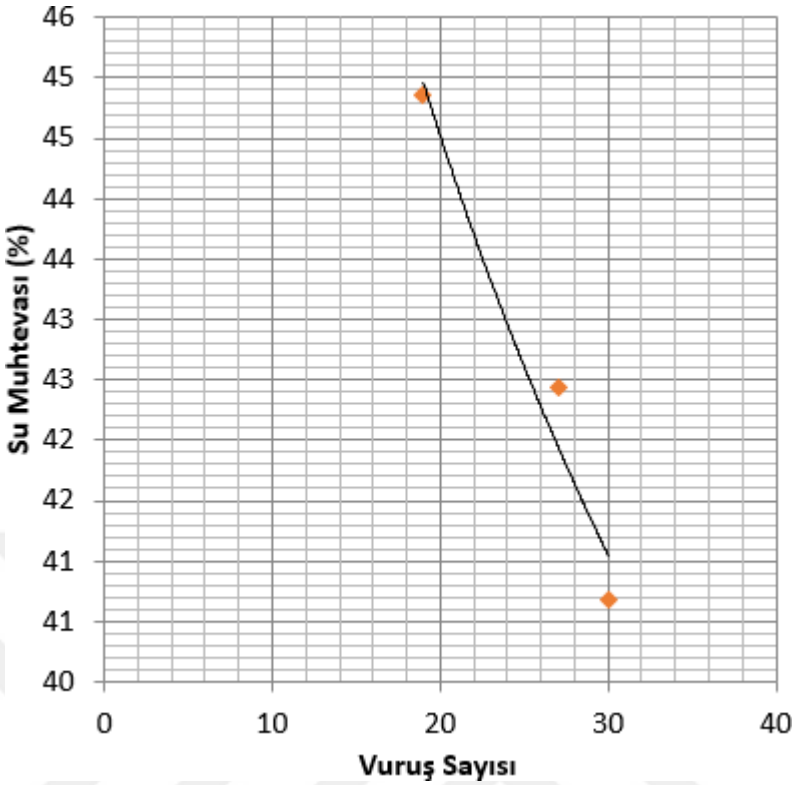
E-1 EP Deney Numunesine Ait Fiziksel Özellikler



Şekil E.1 EP deney numunesine ait dane çapı dağılım eğrisi

Çizelge E.1 EP deney numunesine ait plastik limit (W_p) deneyi sonuçları

Kap No:	ZM-71	ZM-50	ZM-93
Kap Ağırlığı (gr)	49,48	48,45	49,45
Kap + Yaş Numune (gr)	53,89	53,97	54,38
Kap + Kuru Numune (gr)	53,25	52,93	53,5
Kuru Numune (gr)	3,77	4,48	4,05
Su Miktarı (gr)	0,64	1,04	0,88
ω (%)	16,98	23,21	21,73
Plastik Limit, W_p , (%)	20,64		

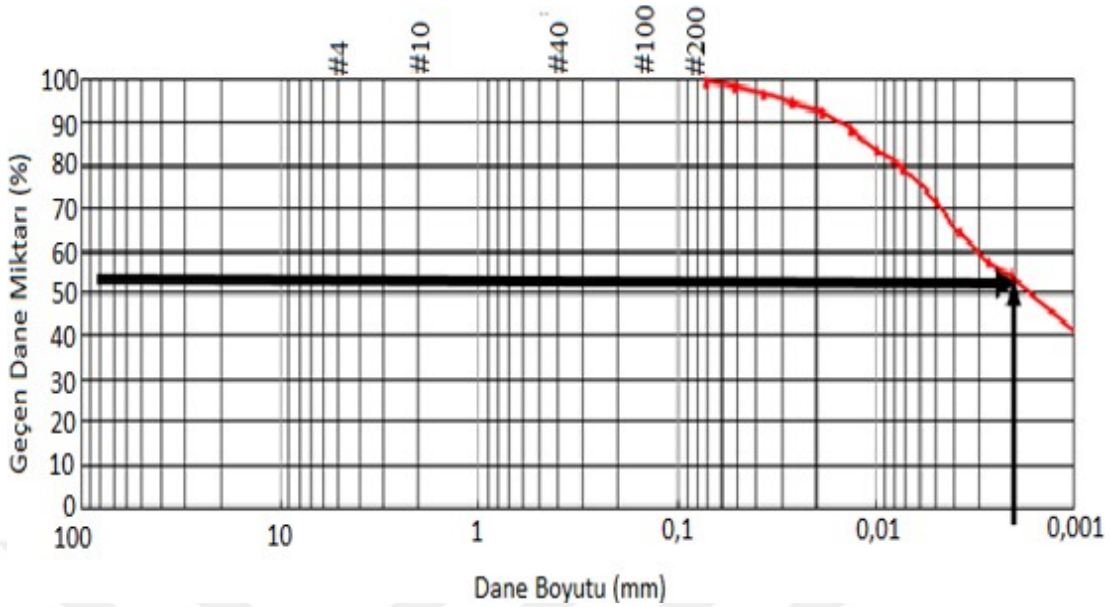


Şekil E.2 EP deney numunesine ait likit limit (W_L) grafiği

Çizelge E.2 EP deney numunesine ait özgül ağırlık (G_s) sonuçları

Piknometre No:	1	2
Kuru Zemin Ağırlığı (gr) (W_1):	10	10
Su + Piknometre Ağırlığı (gr) (W_2):	140,26	141,81
(W_1+ W_2):	150,26	151,81
Su + Piknometre + Zemin Ağırlığı (gr) (W_3):	146,38	147,97
(W_1 + W_2 – W_3):	3,88	3,84
G_s (gr/cm^3):	2,63	2,65
G_s (Ortalama) (gr/cm^3):	2,64	

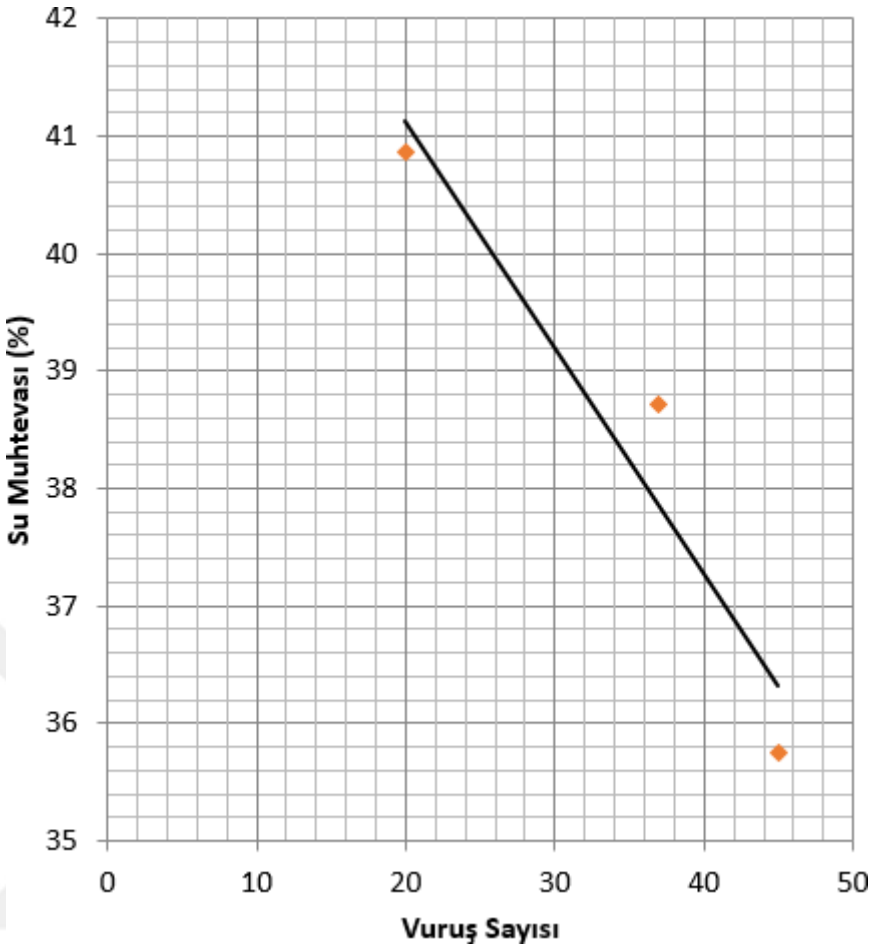
E-2 ES-7 Deney Numunesine Ait Fiziksel Özellikler



Şekil E.3 ES-7 deney numunesine ait dane çapı dağılım eğrisi

Çizelge E.3 ES-7 deney numunesine ait özgül ağırlık (G_s) sonuçları

Piknometre No:	1	2
Kuru Zemin Ağırlığı (gr) (W_1):	10,03	10,02
Su + Piknometre Ağırlığı (gr) (W_2):	141,83	148,5
(W_1 + W_2):	151,86	158,52
Su + Piknometre + Zemin Ağırlığı (gr)(W_3):	148	154,59
(W_1 + W_2 – W_3):	3,86	3,93
G_s (gr/cm^3):	2,65	2,60
G_s (Ortalama) (gr/cm^3):	2,62	

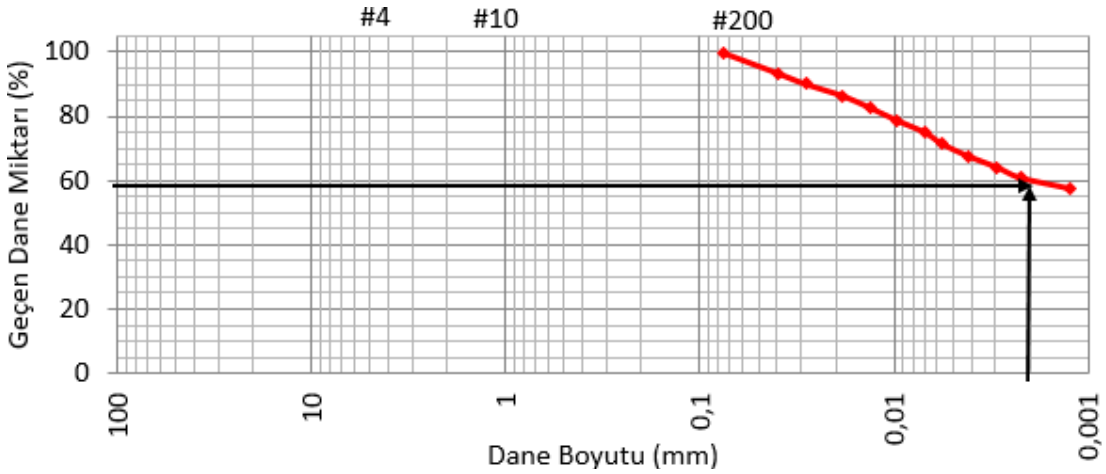


Şekil E.4 ES-7 deney numunesine ait likit limit (W_L) grafiği

Çizelge E.4 ES-7 deney numunesine ait plastik limit (W_p) deneyi sonuçları

Kap No:	ZM-71	ZM-50	ZM-93
Kap Ağırlığı (gr)	49,48	48,20	49,45
Kap + Yaş Numune (gr)	54,74	52,20	53,44
Kap + Kuru Numune (gr)	53,78	51,51	52,89
Kuru Numune (gr)	4,30	3,31	3,44
Su Miktarı (gr)	0,96	0,69	0,55
ω (%)	22,33	20,85	15,99
Plastik Limit, W_p , (%)	19,72		

E-3 EK Deney Numunesine Ait Fiziksel Özellikler



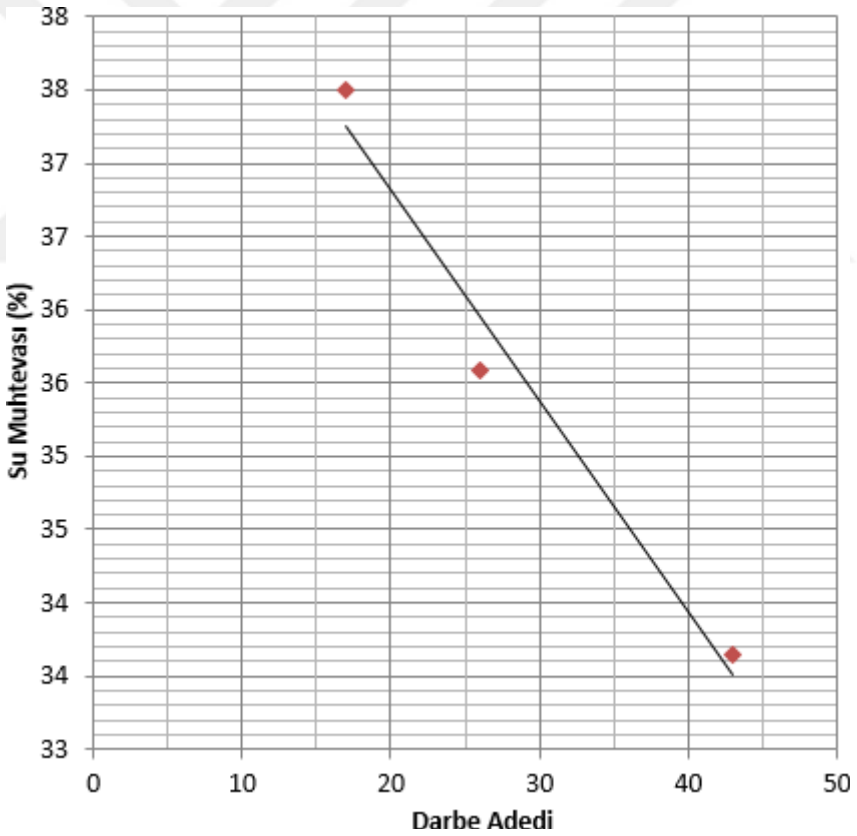
Şekil E.5 EK deney numunesine ait dane çapı dağılım eğrisi

Çizelge E.5 EK deney numunesine ait özgül ağırlık (G_s) deneyi sonuçları

Piknometre No:	1	2
Kuru Zemin Ağırlığı (gr) (W_1):	30,00	30,00
Su + Piknometre Ağırlığı (gr) (W_2):	380,74	381,00
(W_1 + W_2):	410,74	411,11
Su + Piknometre + Zemin Ağırlığı (gr)(W_3):	399,44	399,92
(W_1 + W_2 – W_3):	11,3	11,19
G_s (gr/cm^3):	2,66	2,68
G_s (Ortalama) (gr/cm^3):	2,67	

Çizelge E.6 EK deney numunesine ait plastik limit (W_p) deneyi sonuçları

Kap No:	387	479
Kap Ağırlığı (gr)	37,29	26,78
Kap + Yaş Numune (gr)	41,73	31,13
Kap + Kuru Numune (gr)	41,20	30,61
Kuru Numune (gr)	3,91	3,83
Su Miktarı (gr)	0,53	0,52
ω (%)	13,55	13,58
Plastik Limit, W_p , (%)	13,57	



Şekil E.6 EK deney numunesine ait likit limit (W_L) grafiği

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gökçe Nazlı KALBAZ

Doğum Tarihi ve Yeri : 29.04.1990, Eskişehir

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : gkckalbaz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Geoteknik A.B.D	Yıldız Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	Jeoloji Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Ahmet Kanatlı Anadolu Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2018-…	Geoteknik Geoteknik Ölçümleme Laboratuvar İnşaat San. ve Tic. Ltd. Şti.	Jeoloji Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

Kalbaz, G. ve Özçoban, Ş.M., (2018). ‘’Determination of Strength Parameters ın Clayey Soils and California Bearing Ratio by Laboratory Tests”, 3. International Conference on Civil and Environmental Engineering, , 24-27 April 2018, İzmir, 2: 213.