İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKIŞTIRILMIŞ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİNİN DRENAJLI KOŞULLARDA İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz SATI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SIKIŞTIRILMIŞ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİNİN DRENAJLI KOŞULLARDA İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz SATI
(501131317)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501131317 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yılmaz SATI**,** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"**SIKIŞTIRILMIŞ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİNİN DRENAJLI KOŞULLARDA İNCELENMESİ**"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Recep İYİSAN** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **25 Kasım 2016**
Savunma Tarihi : **28 Aralık 2016**

Aileme ve çalışmamız esnasında vefat eden değerli hocam A.Oğuz Tan'a,

ÖNSÖZ

Zeminlerin kayma mukavemeti geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından biri olmakla beraber zeminlerde kayma mukavemeti parametrelerinin laboratuvar deneyleri ile tayin edilmesi ve elde edilen sonuçların doğru şekilde yorumlanması özellikle şev stabilitesi ve diğer stabilite problemlerinin çözümünde büyük önem arz etmektedir. Aşırı konsolide ve fisürlü killi zeminlerde veya önceden göçmüş şevlerde uzun süreli stabilite analizlerinde kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine göre tasarım yapılmaktadır. Klasik zemin mekaniğinde zeminlerin suya doygun olduğu kabulu yapılırken, iklim koşulları ve çevre şartları göz önüne alındığında doygun olmayan zeminler üzerinde bu kabule göre yapılan hesaplar yeterince gerçekçi olmamaktadır. Zeminlerin maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin suya doygun ve doygun olmayan durumda, drenajlı koşullardaki değişiminin incelenmesi bu araştırmanın temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında farklı geoteknik özelliğe sahip zemin numuneleri labaratuvar ortamında farklı sıkıştırma enerjilerinde hazırlanmış olup, drenajlı koşullarda suya doygun ve suya doygun olmayan durumda üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deney deneylerine tabi tutulmuştur. Bu yolla zemin numunelerinin drenajlı koşullarda, doygun ve doygun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametlerinin iki farklı deney yöntemi yardımıyla elde edilip, bu parametrelerin değişimi incelenmiş, deney yöntemleri arasındaki fark gözlemlenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans programı çerçevesinde hazırlamış olduğum bu tez çalışmasında benden hiçbir desteği esirgemeyen, çalışmamız esnasında vefat eden değerli hocam Doç.Dr. A.Oğuz Tan'a, benden desteğini esirgemeyen, her türlü özveriyi gösteren, bilgi ve deneyimlerini her zaman paylaşan değerli danışmanım Prof.Dr. Recep İyisan'a teşekkürü bir borç bilirim. Laboratuvar çalışmalarımda ve araştırmalarımda desteğini esirgemeyen ve her türlü yardımda bulunan değerli hocalarım Dr.Araştırma Görevlisi Sayın Mustafa Hatipoğlu, Sayın Ayşegül Bayın'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sisteminin düzenli deney yapılabilir hale getirilimesinde desteği olan Sayın Ehsan Etminan'a, deneysel çalışmalarımda destek olan Labaratuvar şefi Sayın İsmail Cantekin'e ve bana her zaman inanan ve güvenen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2016

Yılmaz Satı
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Amaç 2
1.2 Kapsam 4
2. ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ **7**
2.1 Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi 10
2.2 Kaba Daneli ve İnce Daneli Zeminlerin Kayma Mukavemeti 13
2.3 Zeminlerde Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi 14
2.3.1 Serbest basınç deneyi 14
2.3.2 Kesme kutusu deneyi 16
2.3.3 Üç eksenli basınç deneyi 18
2.3.4 Halka kesme deneyi 19
2.3.5 Veyn deneyi 21
2.4 Kalıcı Kayma Mukavemeti 21
2.4.1 Kalıcı kayma mukavemetinin tanımı ve mekanizması 21
2.4.2 Kalıcı kayma mukavemetinin deneysel yöntemlerle elde edilmesi 27
2.5 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Mukavemeti 31
2.5.1 Emme gerilmesi 33
3. MALZEME VE YÖNTEM **37**
3.1 Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri 39
3.2 Numune Hazırlama Yöntemi 41
3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi 44
3.3.1 CD deneyleri için numune hazırlanması ve deneylerin yapılışı 47
3.3.2 Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi 51
3.4 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi 56
3.4.1 TKK deneyleri için numune hazırlanması ve deneylerin yapılışı 59
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR **63**
4.1 Sınıflandırma Deneyleri 63
4.1.1 Elek ve hidrometre analizleri 63
4.1.2 Kıvam limitleri 66
4.1.3 Piknometre deneyleri 67
4.2 Sıkıştırma Enerji Seviyeleri 67
4.2.1 Kompaksiyon deneyleri 69

4.2.2 Konsolidasyon deneyleri ve ön konsolidasyon basınçlarının hesaplanması 75
4.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları 81
4.4 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçları 91
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA 99
5.1 Farklı Sıkıştırma Enerjilerindeki Ön Konsolidasyon Basıncı Değişimleri 99
5.2 Doygun Durumda Üç Eksenli Basınç ve Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 100
5.3 Doygun Olmayan Durumda CD Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi 108
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 115
KAYNAKLAR 117
EKLER 119
ÖZGEÇMİŞ 131

KISALTMALAR

A : Aktivite
AK : Aşırı Konsolide
AKO : Aşırı Konsolidasyon Oranı
BS : Belirlenen Özel Sıkılık
c : Kohezyon
$\mathbf{c_{kalıcı}}$: Rezidüel veya Kalıcı Kohezyon
$\mathbf{c_{pik}}$: Pik Kohezyon
CD : Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
CH : Yüksek Plastisiteli Kil
CL : Düşük Plastisiteli Kil
CPT : Koni Penetrasyon Deneyi
CU : Konsolidasyonlu-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
D : Çap
e : Boşluk Oranı
$\mathbf{G_s}$: Dane Özgül Ağırlığı
İDO : İnce Dane Oranı
$\mathbf{I_p}$: Plastisite İndisi
KY : Kil Yüzdesi
MH : Düşük Plastisiteli Silt
ML : Yüksek Plastisiteli Silt
MP : Modifiye Proktor
R : Regresyon Katsayısı
SE : Sıkıştırma Enerjisi
SP : Standart Proktor
SPT : Standart Penetrasyon Deneyi
TKK : Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi
USCS : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması
UU : Konsolidasyonsuz-Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi
V : Hacim
$\boldsymbol{\phi}$: Kayma Mukavmeti Açısı
$\boldsymbol{\phi_{kalıcı}}$: Rezidüel veya Kalıcı Kayma Mukavemeti Açısı
$\boldsymbol{\phi_{pik}}$: Pik Kayma Mukavemeti Açısı
$\mathbf{w_L}$: Likit Limit
$\mathbf{w_{opt}}$: Optimum Su Muhtevası
$\mathbf{w_p}$: Plastik Limit
$\boldsymbol{\tau}$: Kayma Gerilmesi
$\boldsymbol{\sigma}$: Normal Gerilme
$\boldsymbol{\sigma'}$: Efektif Normal Gerilme
$\boldsymbol{\sigma'_0}$: Ön Konsolidasyon Basıncı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Kum ve silt zeminler için efektif içsel sürtünme açısı değerleri (Das, 2010)..... 11
Çizelge 2.2 : Kırılma kriterleri arasındaki farklar (Budhu, 2011). 12
Çizelge 2.3 : Göçme hipotezleri (Önalp, 2013). 12
Çizelge 2.4 : Emme gerilmesi ölçüm yöntemleri 34
Çizelge 3.1 : Tüm numunelerin kıvam limitleri ve zemin sınıfları 40
Çizelge 3.2 : YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin geoteknik özellikleri 40
Çizelge 3.3 : Kesme hızı kalıcı-kayma mukavemeti ilişkisi (Skempton, 1985)..... 57
Çizelge 3.4 : Tez çalışmasına ait deney programı 61
Çizelge 4.1 : Kullanılan numunelerin kıvam limitleri ve zemin sınıfları 66
Çizelge 4.2 : Kullanılan numunelerin endeks özellikleri..... 67
Çizelge 4.3 : Numune hazırlama koşullarındaki sıkıştırma enerji seviyeleri 68
Çizelge 4.4 : Tüm numuneler üzerine yapılan standart proktor ve modifiye proktor deney sonuçları..... 70
Çizelge 4.5 : YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri için üç sıkıştırma enerjisindeki kompaksiyon deney sonuçları 75
Çizelge 4.6 : Numunelerin Casagrande (1936) ve Da Silva (1970) yöntemleri ile elde edilen ön konsolidasyon basınçları..... 80
Çizelge 4.7 : Numunelerin iki yöntem ile elde edilen sonuçlar içerisinden seçilen ön konsolidasyon basıncı değerleri 81
Çizelge 4.8 : Suya doygun ve doygun olmayan durumlar için elde edilen kayma mukavemeti parametreleri. 91
Çizelge 4.9 : Suya doygun durum için CD deneylerinden ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri..... 96
Çizelge 5.1 : Numunelerin üç enerji seviyesinde ön konsolidasyon basıncı-sıkıştırma enerjisi değişimi için elde edilen bağıntılar ve belirleme katsayıları. 100
Çizelge 5.2 : CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100)..... 102
Çizelge 5.3 : TKK deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100)..... 103
Çizelge 5.4 : CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100)..... 105
Çizelge 5.5 : TKK deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100)..... 106
Çizelge 5.6 : b oranının kil yüzdesi değerleri ile kıyaslanması sonucu elde edilen bağıntılar..... 111

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Zeminde meydana gelen göçme örneği (Budhu, 2011) 7
Şekil 2.2 : Uygulanan kuvvetler etkisinde zeminlerin tipik davranışı (Budhu, 2011) 8
Şekil 2.3 : Zeminlerin kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi (Budhu, 2011)9
Şekil 2.4 : Zeminlerin düşey deformasyon-kayma deformasyonu ve boşluk oranı kayma deformasyonu ilişkisi (Budhu, 2011) 9
Şekil 2.5 : Coulomb sürtünme teorisi mekanizması (Das, 2010) 10
Şekil 2.6 : Mohr-Coulomb kırılma zarfı 11
Şekil 2.7 : Kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri (Craig, 2012)..... 13
Şekil 2.8 : Serbest basınç deney aleti (İTÜ) 15
Şekil 2.9 : Serbest basınç deneyi kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi 16
Şekil 2.10 : Kesme kutusu deney düzeneği (Das, 2010) 16
Şekil 2.11 : Kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kırılma zarfı (Das, 2010) 17
Şekil 2.12 : Üç eksenli basınç deney düzeneği (Craig, 2004) 18
Şekil 2.13 : Halka kesme deneyinde kullanılan numune ve kesme yüzeyi (Hatipoğlu, 2009)..... 19
Şekil 2.14 : Halka kesme deney düzeneği (Head, 1994) 20
Şekil 2.15 : Bromhead tipi halka kesme deney aleti (Bromhead, 1986) 20
Şekil 2.16 : Kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi (Craig, 2012) 22
Şekil 2.17 : Maksimum ve kalıcı kayma mukavemetine ait kırılma zarfları (Head, 2006)..... 22
Şekil 2.18 : Normal ve aşırı konsolide killerin kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi (Kil yüzdesi<%20) (Skempton, 1985)..... 23
Şekil 2.19 : Normal ve aşırı konsolide killerin kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi (Kil yüzdesi>%40) (Skempton, 1985)..... 23
Şekil 2.20 : Kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi üzerinde aşırı konsolidasyonun etkisi (Head, 2006) 24
Şekil 2.21 : Aşırı konsolideasyonun hacim değişimi ve boşluk oranı üzerindeki etkisi (Head, 2006)..... 25
Şekil 2.22 : Geliştirilmiş üç eksenli basınç deneyi sistemi (Meehan, Tiwari ve diğ., 2011)..... 29
Şekil 2.23 : Özel numune hazırlama yöntemi (Meehan, Tiwari ve diğ., 2011)..... 30
Şekil 2.24 : Üç eksenli basınç deneyi kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi (Meehan, Tiwari ve diğ., 2011)..... 31
Şekil 2.25 : Doygun olmayan zemin yapısı (Freudlund ve Vanapalli, 2002)..... 32
Şekil 2.26 : SM ve SC-SM numuneleri için kalıcı kayma mukavemeti açısı-emme gerilmesi ilişkisi (Hoyos, Velusa ve diğ., 2014) 36
Şekil 3.1 : Deneysel çalışma akış şeması..... 38
Şekil 3.2 : Tüm numunelerin Casagrande kartındaki yerleri..... 39
Şekil 3.3 : Üç eksenli basınç deney düzeneği..... 45

Şekil 3.4 : Üç eksenli basınç deney aleti (İTÜ) 46
Şekil 3.5 : Üç eksenli basınç deneyi kurulum aşamaları 49
Şekil 3.6 : Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi (İTÜ)..... 51
Şekil 3.7 : Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deneyi için numuneye ait bilgilerin girilmesi..... 51
Şekil 3.8 : Deneye ait parametrelerin girilmesi 53
Şekil 3.9 : Başlangıç aşaması..... 53
Şekil 3.10 : Konsolidasyon aşaması 54
Şekil 3.11 : Doygunluk aşaması 54
Şekil 3.12 : Kesme aşaması 55
Şekil 3.13 : Kesme kutusu deney aleti (İTÜ)..... 58
Şekil 3.14 : Kesme kutusu deney aleti enkesiti (Önalp, 2015) 58
Şekil 3.15 : Tekrarlı kesme deneyi sonrası numune ve kesme yüzeyi (S=%100) 60
Şekil 4.1 : YS1 numunesi dane çapı dağılımı 64
Şekil 4.2 : YS2 numunesi dane çapı dağılımı 64
Şekil 4.3 : YS3 numunesi dane çapı dağılımı 65
Şekil 4.4 : YS4 numunesi dane çapı dağılımı 65
Şekil 4.5 : Kullanılan numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleri 66
Şekil 4.6 : YS1 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları..... 71
Şekil 4.7 : YS2 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları..... 71
Şekil 4.8 : YS3 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları..... 73
Şekil 4.9 : YS4 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları..... 74
Şekil 4.10 : YS1 numunesi ön konsolidasyon basınçları..... 76
Şekil 4.11 : YS2 numunesi ön konsolidasyon basınçları..... 77
Şekil 4.12 : YS3 numunesi ön konsolidasyon basınçları..... 78
Şekil 4.13 : YS4 numunesi ön konsolidasyon basınçları..... 79
Şekil 4.14 : YS1 numunesi iki deney aleti sonuçlarının kıyaslanması 82
Şekil 4.15 : YS1 numunesi CD deney sonuçları (S=%100) 83
Şekil 4.16 : YS2 numunesi CD deney sonuçları (S=%100) 84
Şekil 4.17 : YS3 numunesi CD deney sonuçları (S=%100) 85
Şekil 4.18 : YS4 numunesi CD deney sonuçları (S=%100) 86
Şekil 4.19 : YS1 numunesi CD deney sonuçları (S<%100) 87
Şekil 4.20 : YS2 numunesi CD deney sonuçları (S<%100) 88
Şekil 4.21 : YS3 numunesi doygun ve doygun olmayan durumlar 89
Şekil 4.22 : YS4 numunesi CD deney sonuçları (S<%100) 90
Şekil 4.23 : YS2 numunesi TKK deneyi kesilme yüzeyleri 91
Şekil 4.24 : YS1 numunesi TKK sonuçları (S=%100) 92
Şekil 4.25 : YS2 numunesi TKK sonuçları (S=%100) 93
Şekil 4.26 : YS3 numunesi TKK sonuçları (S=%100) 94
Şekil 4.27 : YS4 numunesi TKK sonuçları (S=%100) 95
Şekil 4.28 : YS1 numunesi 2.sıkıştırma enerjisi TKK deney sonucu (S<%100, 200 kPa)..... 97
Şekil 4.29 : YS1 TKK deney sonrası kesme yüzeyi (S<%100)..... 97
Şekil 4.30 : YS2 numunesi 2.sıkıştırma enerjisi TKK deney sonucu (S<%100, 90 kPa)..... 98
Şekil 4.31 : YS2 TKK deney sonrası kesme yüzeyi (S<%100)..... 98
Şekil 5.1 : Numunelerin ön konsolidasyon basıncı - sıkıştırma enerjisi değişimleri. 99
Şekil 5.2 : CD deneyleri ve TKK deneyleri ile edilen maksimum kayma mukavemeti açılarının karşılaştırımlası (S=%100)..... 100

Şekil 5.3 : CD deneyleri ve TKK deneyleri ile edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması (S=%100)..... 101
Şekil 5.4 : CD deneylerinden ve TKK deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının doğrusal regresyon analizi ile karşılaştırılması (S=%100) 101
Şekil 5.5 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100)..... 102
Şekil 5.6 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla kıyaslanması..... 103
Şekil 5.7 : TKK deney sonuçlarına göre edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100)..... 103
Şekil 5.8 : TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılması 104
Şekil 5.9 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100)..... 104
Şekil 5.10 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılması 105
Şekil 5.11 : TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100) 105
Şekil 5.12 : TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılması 106
Şekil 5.13 : CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının a oranı ile değişimi (S=%100)..... 106
Şekil 5.14 : TKK deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının a oranı ile değişimi (S=%100)..... 107
Şekil 5.15 : CD deney sonuçlarına göre doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması..... 108
Şekil 5.16 : CD deney sonuçlarına göre doygun ve doygun olmayan durumdaki kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması..... 109
Şekil 5.17 : Doygun ve doygun olmayan durum maksimum kayma mukavemeti açılarının kıyaslanması..... 109
Şekil 5.18 : b oranının likit limit değişimi ile karşılaştırılması 110
Şekil 5.19 : b oranının plastisite indisi değişimi ile kıyaslanması..... 110
Şekil 5.20 : b oranının kil yüzdesi değişimi ile kıyaslanması..... 111
Şekil 5.21 : YS1, YS2 ve YS4 numunelerinin doygun ve doygun olmayan durumdaki CD deney sonuçları..... 112
Şekil 5.22 : Numunelerin c oranı ile doygunluk oranı farkı değerlerinin karşılaştırılması 113
Şekil A.1 : Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi..... 121
Şekil A.2 : Yazılıma şablon dosya yüklenmesi 122
Şekil A.3 : Deneye ve numuneye ait bilgilerein girilmesi..... 123
Şekil A.4 : Numune boyutları ve dane özgül ağırlığın belirtilmesi..... 123
Şekil A.5 : Deney başı ve deney sonu su muhtevası değerlerinin girilmesi..... 124
Şekil A.6 : Veri alma sıklığının belirtilmesi..... 125
Şekil A.7 : Deneye ait parametrelerin girilmesi 125
Şekil A.8 : Başlangıç aşaması..... 126
Şekil A.9 : Konsolidasyon/A aşaması 127
Şekil A.10 : Doygunluk aşaması 128

Şekil A.11 : Doygunluk sonrası konsolidasyon aşaması 129
Şekil A.12 : Kesme aşaması 129
Şekil A.13 : Pompaların başlangıç konumuna getirilmesi..... 130
Şekil A.14 : Yük teması sağlanması 130
Şekil A.15 : Hücre çubuğu serbest bırakma 130

SIKIŞTIRILMIŞ İNCE DANELİ ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİNİN DRENAJLI KOŞULLARDA İNCELENMESİ

ÖZET

Zeminler için kayma mukavemeti zemin danelerinin içsel sürtünmeden kaynaklanan kayma kuvvetlerine karşı gösterdiği mukavemet olarak tanımlanabilir. Zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi, taşıma gücü hesabı, geoteknik yapıların stabilite analizleri ve zeminlerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin belirlenmesi için gereklidir. Zeminlerin kayma mukavemeti deformasyon seviyesine bağlıdır. Kalıcı kayma mukavemeti, zeminin artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen, danelerin kesme yüzeyine paralel yönelimine ve kesme yüzeyine giren suyun yarattığı cilalanma etkisine bağlı olarak oluşan sabit bir mukavemet değerine ulaştığı durumdur. Aşırı konsolide, fisürlü ve önceden göçmüş zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti geoteknik tasarımlarda esas alınmaktadır.

Zeminlerde kayma mukavemetine etkiyen önemli faktörlerden biri de suya doygunluktur. Bilindiği üzere zeminler su, hava ve dane olmak üzere üç fazlı yapıdan meydana gelmektedir. Zemindeki boşlukların tamamının su ile dolu olduğu durum suya doygun durum olarak nitelendirilir. Klasik zemin mekaniğinde maksimum veya kalıcı kayma mukavemeti parametreleri elde edilirken zeminin suya doygun olduğu kabul edilir. Zeminin suya doygun olmadığı durum ise doygun olmayan zemin mekaniğinin araştırma konusunu oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin drenajlı koşullarda, suya doygun ve doygun olmayan durumlarda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda laboratuvarda örselenmiş numuneler üzerinde üç farklı sıkıştırma enerjisinde suya doygun ve doygun olmayan durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan numuneler üzerinde yapılan deneylerin sonucunda doygun durumda üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile elde edilen maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri kıyaslanmış, üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarından büyük olduğu gözlenmiştir. Doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi gözlenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler için ve uygulanan yöntem doğrultusunda elde edilen sonuçlara göre doygunluğun maksimum kayma mukavemeti parametrelerini etkilediği, kalıcı kayma mukavemeti parametreleri üzerinde ise önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (%80<S<%100 doygunluk oranı değerleri için geçerli olmak üzere). Pratik amaçlar doğrultusunda kullanılmak üzere çeşitli korelasyonlar önerilmiştir.

INVESTIGATION OF SHEAR STRENGTH OF COMPACTED FINE GRAINED SOILS IN DRAINAGE CONDITIONS

SUMMARY

The shear strength of soils can be defined as the strength of the soil particles against shear forces resulting from internal friction. Determination of shear strength of soils is necessary for calculation of bearing capacity, stability analysis of geotechnical structures and determination of stress-strain characteristics of soils. The shear strength of the soils depends on the level of deformation. Residual shear strength is a a constant strength value that does not change with increasing deformation level of the soil and it occurs due to the parallel orientation of the particles to the shear surface and the polishing effect created by the water entering the shear surface. Residual shear strength is based on overconsolidated clays, collapsed soils for geotechnical designs.

One of the significant factors affecting the shear strength of soils is saturation. As it is known, the floors composed of three-phase structure consisting of water, air and grain. The situation in which all of the voids in the soil are filled with water is considered to be saturated. In classical soil mechanics, it is considered that the ground is saturated when maximum or residual shear strength parameters are obtained. If the soil is not saturated, it is the main research area of the unsaturated soil mechanics.

In this study, it is aimed to investigate how the maximum and permanent shear strength parameters of the compacted fine grained soils change under drainage conditions in a saturated and a unsaturated situations. By using two different test methods (consolidated-drained triaxial test and multistage direct shear test), the change of shear strength parameters in the case of saturation and unsaturation is investigated and it is aimed to observe the differences between the results. For these aims, classification experiments are carried out on different samples, the index properties of the samples are determined according to the classification test results, and samples with favourable properties are selected.

The selected samples are subjected to the compaction tests at three different compression energies; the standard proctor stiffness, the modified proctor stiffness, and the specified stiffness. For each energy level, the optimum water content of the samples and the maximum dry unit volume weights of samples corresponding to these optimum water content values are determined. The used samples are prepared at the first compaction energy (the specified stiffness), the second compaction energy (the standard proctor stiffness) and the third compaction energy (the modified proctor stiffness) in the optimum water content and subjected to the odometer test to calculate pre-consolidation pressures at each energy level.

Samples with pre-consolidation pressures which calculated at each energy level by two different methods (Casagrande (1936) and Da Silva (1970) methods) are

subjected to consolidated-drained triaxial tests and multistage direct shear tests in case of saturated (S=%100) and unsaturated (according to the saturation of their energy levels) conditions, under the loading of pre-consolidation pressures at three compaction energies. In the direction of the obtained results, maximum and residual shear strength parameters are determined in saturated and unsaturated condition.

The main purpose of this method is to ensure that the samples prepared for the three compressing energies are protected at the beginning of the experiment and that the sample can be tested in the unsaturated state without changing the saturation level. In order to obtain the shear strength parameters in the non-saturating case, the samples are prepared in optimum water contents at three energy levels and consolidation is made under the pre-consolidation pressure for each energy level. This is why it is not desirable to allow any deformation of the samples in the positive or negative direction by loading under pre-consolidation pressure when the samples are ready for consolidated-drained triaxial testing and multistage direct shear testing. The void ratio and the saturation ratio change because the samples under the over pre-consolidation pressure are subject to compaction.

It is aimed to keep the saturation ratio at the initial level because used consolidated-drained triaxial pressure test system and the multistage direct shear test systems do not measure the change in pore air pressure. In the samples loaded under the pre-consolidation pressure, the void ratio and the saturation ratio are different from the conditions under which they are prepared, since they are swollen.

It is aimed to calculate the shear strength parameters of unsaturated situation as result of providing a boundary condition by maintaining the void ratio and water saturation ratio in the conditions that the samples are prepared at three energy levels. Since the samples are unlikely to be prepared at a certain saturation level and at a certain pre-consolidation pressure, the compaction energy is kept constant (the energy applied to compress the samples at three energy levels) and the saturation ratio and pre-consolidation pressure at the optimum water content at this level are determined.

The samples are subjected to the consolidated-drained triaxial test and the multistage direct shear test in the first stage and in the saturated condition. In the second stage, the same specimens were subjected to the consolidation-drainage three-axis pressure test and the repetitive shear box experiments at the initial saturation rates without saturating the water. According to the obtained results, the variation of maximum and permanent shear strength parameters in water saturated and unsaturated cases is investigated by two different test methods in accordance with the purpose of study. The consolidated-drained triaxial tests of the unsaturated samples were carried out with a computer-assisted triaxial testing instrument in the laboratory. In this way, computer-assisted triaxial testing device in Istanbul Technical University Soil Mechanics Laboratory has been made capable of making experiments efficiently.

In this study, the variation of the parameters of maximum and residual shear strength in the water saturated and unsaturated condition of the compacted finely grained soils under drainage conditions was investigated. For this purpose, consolidated-drained triaxial experiments and multistage direct shear experiments were carried out on three different compaction energies on specimens buried in the laboratory, in a saturated and unsaturated state, with consolidation and drainage.

As a result of the experiments performed, the maximum and residual shear strength parameters obtained by consolidated-drained triaxial tests and repeated shear box multistage direct shear tests in saturated condition were compared. It was observed

that the values of the residual shear strength obtained from consolidated-drained triaxial tests were greater than those of the shear strength obtained from the multistage direct shear tests. The variation of maximum and residual shear strength parameters in saturated and unsaturated condition was observed. According to the results obtained, saturation effected the maximum shear strength parameters, whereas the residual shear strength parameters had no significant effect. Several correlations have been proposed to be used in the direction of practical purposes.

1. GİRİŞ

Zemin tabakaları üzerine uygulanan yüklerin etkisiyle veya jeolojik yüklerin etkisiyle zeminlerde gerilme artışları meydana gelmekte ve bu gerilme artışlarına bağlı olarak şekil değiştirmeler oluşmaktadır. Bu gerilme artışları ve şekil değiştirmeler, zeminin gerilme tarihçesi, başlangıç koşulları, yükleme hızı ve zemin bünyesindeki suyun drenaj koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Zemin heterojen yapıda bir malzeme olduğundan gerilme–şekil değiştirme davranışını tahmin etmek diğer yapı malzemelerine göre daha zordur. Zeminlerde gerilme–şekil değiştirme ilişkisi doğrusal olmamakla birlikte zemine etki eden yük kalktığında meydana gelmiş olan şekil değiştirmelerin çok büyük bir kısmı zeminin genel olarak plastik bir malzeme olmasından dolayı kalıcı olmaktadır. Uygulanan yükler zemin daneleri üzerinde aktarılır, zemin danelerinin birbiri üzerinde kaymaya karşı gösterdiği direnç ise kayma mukavemeti olarak tanımlanır. Zeminlerin göçme meydana gelmeden gösterebildiği en yüksek mukavemet değeri olarak tanımlanan kayma mukavemeti zemin sınıfı, drenaj koşulları, suya doygunluk, mineraloji, aşırı konsolidasyon oranı ve yükleme hızı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir. Aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda gerilme–şekil değiştirme ilişkisi incelendiğinde yükleme doğrultusunda göçme meydana gelmeden gösterilen maksimum mukavemetin artan deformasyon düzeyine bağlı olarak azaldığı, ve bir süre sonra artan deformasyon düzeyi ile değişmeyen sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Bu değer zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti olarak tanımlanmaktadır. İnce çatlaklı (fisürlü) veya aşırı konsolide olmuş killi zeminlerde stabilite analizlerinde maksimum kayma mukavemeti değerine göre yapılan tasarımlarda göçme meydana geldiği gözlenmiş, bu zeminlerin tasarıma esas kayma mukavemeti değerlerinin hesap edilen değerin altında olduğu görülmüştür. Bu sebepten dolayı maksimum kayma mukavemeti değerine ulaşılmasıyla deneyler sonlandırılmamış, kalıcı kayma mukavemeti değerine ulaşılıncaya kadar devam edilmiştir ve bu tip zeminlerde kalıcı kayma mukavemetine göre tasarım yapılmıştır (Skempton, 1985).

Zeminler su, hava ve dane olmak üzere üç fazlı bir yapıda olmakta ve su ve hava zemin daneleri arasındaki boşlukta yer almaktadır. Daneler arasındaki boşlukların tamamının su ile kaplı olduğu durum zemin için en kritik durum, zeminin suya doygun olduğu durum olarak tanımlanmaktır. Zemin daneleri arasındaki boşlukların tamamının su ile kaplı olmadığı durum doygun olmayan zemin mekaniğinin inceleme konusunu oluşturmaktadır.

Geleneksel zemin mekaniğine göre kayma mukavameti, oturma miktarı veya taşıma gücü hesapları zeminlerin suya doygun olduğu kabulune göre yapılmaktadır. Suya doygun olmayan durumda ise yapılan bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar yeterince gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Doygun olmayan zeminlerde emme gerilmesi olarak ifade edilen kavramdan dolayı kayma mukavemeti parametreleri suya doygun duruma göre farklı olmaktadır. Bu şartlardaki zeminlerin stabilite analizleri, taşıma gücü veya oturma miktarları doygun olmayan zemin mekaniği kavramları ile tasarlanmalıdır.

Zeminlerin maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek için yaygın olarak tekrarlı kesme kutusu deneyleri, halka kesme deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleri kullanılır. Bu deneyler zeminlerin suya doygun olduğu ve doygun olmayan durumları için kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan laboratuvar deneyleridir. Üç eksenli basınç deneyi, arazideki yükleme ve drenaj koşullarının gerçeğe en yakın şekilde sağlanabilmesi bakımından oldukça kullanışlı bir deney yöntemidir. Kesme kutusu deneyi yapılışı kolay ve maliyetinin düşük olması sebebiyle yaygın olarak kullanılan bir başka deney yöntemidir. Halka kesme deneyi ileri deformasyon seviyelerine ulaşılabilmesi bakımından özellikle kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin tayin edilmesinde kullanılır.

1.1 Amaç

Bu çalışma kapsamında sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin drenajlı koşullarda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin suya doygun ve suya doygun olmayan durumda nasıl değiştiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca iki farklı deney yöntemi ile (üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi) suya doygun durum ve suya doygun olmayan durumda kayma mukavemeti parametrelerindeki değişim incelenmiş, bu yolla iki deney yöntemi ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkların gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda uygulanan yöntem olarak farklı numuneler üzerinde sınıflandırma deneyleri yapılmış, sınıflandırma deney sonuçlarına göre numunelerin endeks özellikleri belirlenmiş, uygun özelliklere sahip numuneler seçilmiştir. Seçilen numuneler standart proktor, modifiye proktor ve belirlenen özel bir sıkılık olmak üzere üç farklı sıkıştırma enerjisinde kompaksiyon deneyine tabi tutulmuştur. Her enerji seviyesi için numunelerin optimum su muhtevaları ve bu optimum su muhtevası değerlerine karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Kullanılan numuneler 1.sıkıştırma enerjisinde (belirlenen sıkılık), 2.sıkıştırma enerjisinde (standart proktor sıkılığı) ve 3.sıkıştırma enerjisinde (modifiye proktor sıkılığı) optimum su muhtevalarında tekrar hazırlanmış ve her enerji seviyesindeki ön konsolidasyon basınçlarının hesaplanamabilmesi için konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Casagrande (1936) ve Da Silva (1970) yöntemleri olmak üzere iki farklı yöntemle her enerji seviyesindeki ön konsolidasyon basınçları hesaplanan numuneler, üç sıkıştırma enerjisinde suya doygun durumda (S=%100) ve suya doygun olmayan durumda (hazırlandıkları enerji seviyelerindeki doygunluk oranlarında) ön konsolidasyon basınçları altında yüklemeye maruz bırakılarak konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda suya doygun durumda ve doygun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir.

Bu yöntemin uygulanmasındaki temel amaç numunelerin üç sıkıştırma enerjisi için hazırlandıkları şartların deney başlangıcında korunması ve hazırlandığı koşuldaki suya doygunluk derecesi değişmeden doygun olmayan durumda deneye tabi tutulabilmesidir. Suya doygun olmayan durumda kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilebilmesi için, numuneler üç enerji seviyesinde optimum su muhtevalarında hazırlanıp, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basıncı altında konsolide edilmiştir. Bunun sebebi, numuneler hazırlandıktan sonra üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi için hazır hale getirildiğinde ön konsolidasyon basıncı altında yüklenerek numunelerde artı veya eksi yönde herhangi bir deformasyona izin verilmek istenmemesidir. Ön konsolidasyon basıncının üzerinde yüklenen numunelerde sıkışma meydana geleceğinden, boşluk oranı ve doygunluk oranı değişecektir.

Kullanılan üç eksenli basınç deney sistemi ve tekrarlı kesme kutusu deney sistemlerinde boşluk hava basıncı değişimi ölçülemediğinden, doygunluk oranının başlangıçtaki seviyede korunması amaçlanmıştır. Ön konsolidasyon basıncının altında yüklenen numunelerde ise şişme meydana geleceğinden, yine boşluk oranı ve doygunluk oranı hazırlandığı koşullarıdan farklı olacaktır.

Numunelerin üç enerji seviyesinde hazırlandıkları koşullardaki boşluk oranı ve suya doygunluk oranın korunması ile bir sınır durum sağlanması sonucu suya doygun olmayan durumda kayma mukavemeti parametrelerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Numuneleri belirli bir doygunluk seviyesinde ve belirli bir ön konsolidasyon basıncında hazırlamak olası olmadığından, sıkıştırma enerjisi sabit tutulmuş (üç enerji seviyesinde numuneleri sıkıştırmak için uygulanan enerji), ve bu seviyedeki optimum su muhtevasındaki doygunluk oranı ve ön konsolidasyon basıncı belirlenmiştir.

Numuneler belirtilen şartlarda birinci aşamada suya doygun durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine ve tekrarlı kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. İkinci aşamada ise aynı numuneler suya doygun hale getirilmeden, hazırlandığı andaki doygunluk oranlarında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre çalışmanın amacına uygun olarak maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin suya doygun ve doygun olmayan durumlardaki değişimi iki farklı deney yöntemiyle incelenmiştir. Numunelerin suya doygun olmayan durumdaki üç eksenli basınç deneyleri, laboratuvarda bulunan bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti ile gerçekleştirilmiştir. Bu yolla İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aletinin randımanlı bir şekilde deney yapılabilir hale getirilmesi de sağlanmıştır.

1.2 Kapsam

Çalışmanın birinci bölümünde tezin konusu ile ilgili genel bilgiler verilmiş, amaç ve amaç doğrultusunda uygulanan yöntem açıklanmıştır. Tezin tüm bölümlerinin içeriği hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümünde zeminlerin kayma mukavemeti, kalıcı kayma mukavemeti ve doygunluğun kayma mukavemetine etkileri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bu bölüm kapsamında kayma mukavemetinin tanımı, kırılma hipotezleri, kayma mukavemetinin belirlenmesi için yapılan laboratuvar deneyleri açıklanmıştır. Kalıcı kayma mukavemetinin tanımı ve mekanizması anlatılmış, kalıcı kayma mukavemeti ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmalar hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Kalıcı kayma mukavemetinin elde edilmesi için kullanılan deney yöntemleri anlatılmıştır. Doygun olmayan zeminlerde kayma mukavemeti ve doygunluğun maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisine değinilmiştir.

Üçüncü bölümde gerçekleştirilen deney yöntemleri ve incelenen numunelerin genel özellikleri verilmiştir. Doğada farklı doygunluk oranlarında numune bulunmasının zor olması sebebiyle laboratuvar ortamında çalışmanın amacının gerçekleştirilmesine yönelik numune hazırlama yöntemi açıklanmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında ilk defa kullanılan, İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sisteminin kullanımı açıklanmış, cihazın yazılım kısmının kullanımı ile ilgili bilgi verilmiştir. Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti düzenli olarak deney yapılabilir hale getirilmiş, deney aletine uzaktan erişim sağlanarak internet üzerinden başka bilgisayarlardan deney aşamalarının takip edilebilmesi ve yönetilebilmesi sağlanmıştır. Aynı koşullarda aynı numune üzerinde bilgisayar destekli basınç deney aleti ve manuel deney aleti ile yapılan sonuçların oldukça benzer sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Bölümün son kısmında tez çalışmasına ait deney programı gösterilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde elde edilen tüm deney sonuçları gösterilmiştir. Suya doygun durumda ve doygun olmayan durumda gerçekleştirilen konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçları ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları gösterilmiştir.

Beşinci bölümde elde edilen sonuçların yorumlanması, deney sonuçları doğrultusunda geliştirilen bağıntılar, pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek korelasyonlar önerilmiştir.

Son bölümde ise deney sonuçlarından elde edilen verilen yorumlanmış, pratik amaçlar doğrultusunda genel bağıntılar önerilmiştir.

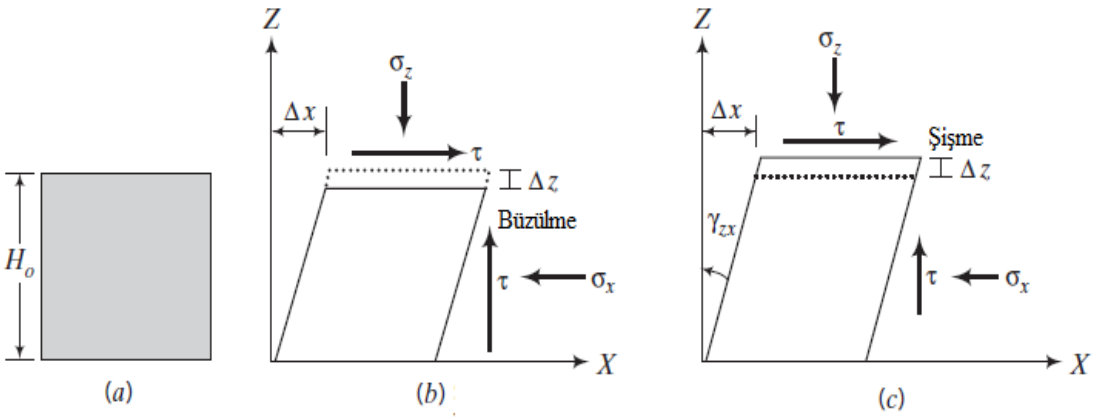
2. ZEMİNLERİN KAYMA MUKAVEMETİ

İnşaat mühendisliğinde genelde yapıların güvenliği inşa edildikleri zeminlerin dayanımına bağlı olmaktadır. Zeminde göçme olması, zeminin üzerindeki yapıların hasara uğramasına veya yıkılmasına, buna bağlı olarak ciddi can ve mal kayıplarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı zeminlerin kayma mukavemeti geoteknik mühendisliğinin en önemli konularından birini oluşturmaktadır. Zeminler için mukavemet terimi, kabaca zemin danelerinin içsel sürtünmeden kaynaklanan kayma kuvvetlerine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilmektedir. Zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi, taşıma gücü hesabı, geoteknik yapıların stabilite analizleri ve zeminlerin gerilme-deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesi için gereklidir (Budhu, 2011). Şekil 2.1'de göçme meydana gelmiş şev görülmektedir.



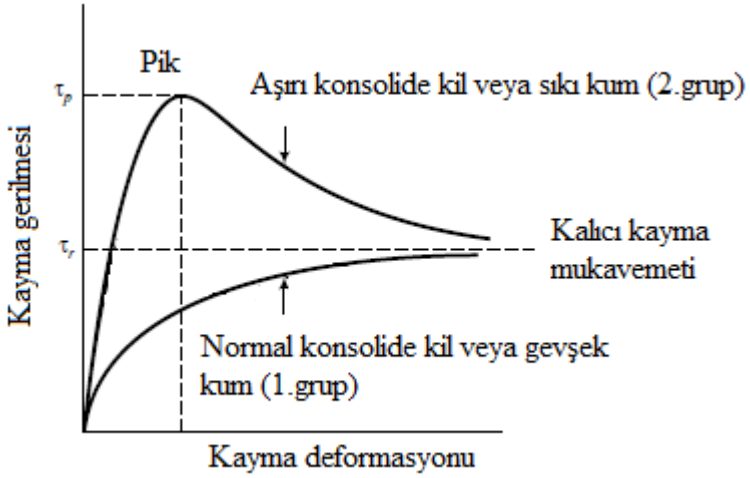
Şekil 2.1 : Zeminde meydana gelen göçme örneği (Budhu, 2011)

Zeminlerin kayma mukavemeti, uygulanan kuvvetler doğrultusunda zeminin göçme meydana gelmeden gösterdiği en yüksek mukavemet olarak tanımlanabilir. Burada zeminlerin kayma mukavemeti gevşek veya normal konsolide zeminler ve sıkı veya aşırı konsolide zeminler olmak üzere iki grup zemin için irdelenebilir (Budhu, 2011). Şekil 2.2'de belirtilen iki grup zemin için uygulanan gerilme etkisindeki deformasyon gösterilmiştir.



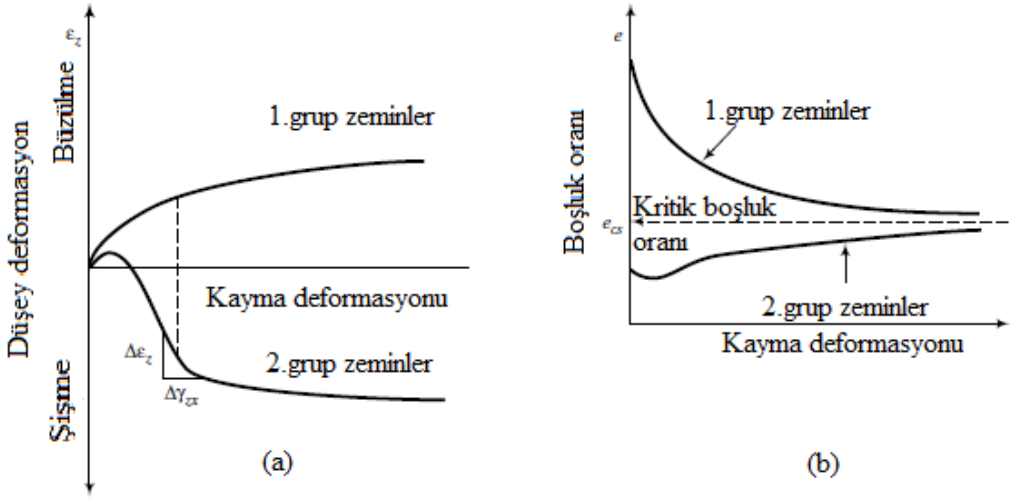
Şekil 2.2 : Uygulanan kuvvetler etkisinde zeminlerin tipik davranışı (Budhu, 2011)

Şekil 2.2'de görülen tabi haldeki zemin (a), basit kesme etkisi altındaki gevşek kum veya normal konsolide kil olarak belirtilen (b) ve basit kesme etkisi altındaki sıkı kum veya aşırı konsolide kil olarak belirtilen (c) zeminlerin uygulanan gerilme etkisindeki şekil değiştirmeleri gösterilmiştir. Birinci grup zeminlerin davranışını özetlemek gerekirse, düşey gerilmenin artışına bağlı olarak zeminde büzülme meydana gelmekte ve boşluk oranı azalmakta, zemin daha yoğun hale gelmektedir. İkinci grup zeminlerde ise uygulanan düşey gerilmeye bağlı olarak şişme meydana gelmektedir. Bu gerilme-deformasyon ilişkisi zeminlerin kayma mukavemeti üzerinde etkili olmaktadır. Şekil 2.3'de belirtilen iki grup zeminin kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi gösterilmektedir. Şekil 2.4'te normal konsolide kil veya gevşek kum (1.grup) ve aşırı konsolide veya sıkı kum (2.grup) zeminlerin düşey deformasyon-kayma deformasyonu (a) ve boşluk oranı-kayma deformasyonu (b) ilişkileri gösterilmektedir (Budhu, 2011). Aşırı konsolide killerde maksimum kayma mukavemeti aşıldıktan sonra kayma mukavemeti azalıp sabit bir değere ulaşmaktadır. Şekil 2.3'de 'τ_r' olarak gösterilen bu değer kalıcı kayma mukavemeti değeridir.



Şekil 2.3 : Zeminlerin kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi (Budhu, 2011)

Şekil 2.3'de görüldüğü üzere normal konsolide kil veya gevşek kum tipi zeminlerde artan deformasyon oranıyla kayma gerilmesi artmış, sabit bir değere ulaşmıştır. Aşırı konsolide kil veya sıkı kum tipi zeminlerde ise kayma gerilmesindeki bu artış aynı deformasyon seviyesinde daha yüksek olup, düşüşe geçme şeklinde devam etmiştir.



Şekil 2.4 : Zeminlerin düşey deformasyon-kayma deformasyonu ve boşluk oranı-kayma deformasyonu ilişkisi (Budhu, 2011)

Şekil 2.4'de görüldüğü üzere 1.grup zeminlerde artan deformasyon seviyesiyle birlikte büzülme yönünde (negatif yönde) bir düşey deformasyon, 2.grup zeminlerde ise şişme yönünde (pozitif yönde) bir düşey deformasyon oluşmaktadır (a). Boşluk oranı-deformasyon ilişkisi ise, boşluk oranının 1.grup zeminlerde azalması, 2.grup zeminlerde artması şeklinde olmaktadır.

2.1 Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi

Zeminlerde en yaygın olarak kullanılan kırılma hipotezi, Mohr ve Coulomb'un geliştirdiği Mohr-Coulomb kayma hipotezidir. Zemin mekaniği problemlerinde kayma düzlemi üzerinde oluşan kayma gerilmesini normal gerilme ile doğrusal bir fonksiyon şeklinde ifade eden Mohr-Coulomb bağıntısı;

$$\tau = c + \sigma * \tan\phi \qquad \textbf{(2.1)}$$

şeklinde ifade edilir. Burada 'τ' kayma gerilmesini, 'σ' normal gerilmeyi, 'c' kohezyon terimini ve 'ϕ' kayma mukavemeti açısını ifade etmektedir.

Suya doygun durumda toplam gerilme, efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı ilişkişi;

$$\sigma = \sigma' + u \qquad \textbf{(2.2)}$$

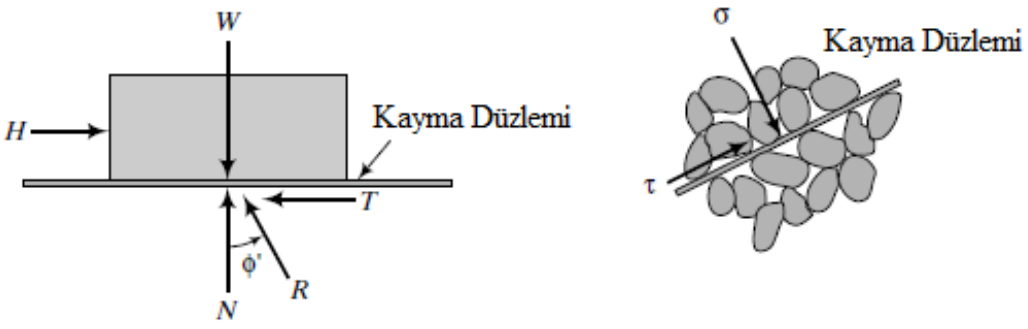
bağıntısı ile ifade edilir. Burada 'σ′' efektif normal gerilmeyi, 'u' boşluk suyu basıncını ifade etmektedir.

Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre efektif gerilmelere göre kayma gerilmesi;

$$\tau = c' + \sigma' * \tan\phi' \qquad \textbf{(2.3)}$$

bağıntısı ile gösterilir.

Şekil 2.5'de Coulomb sürtünme teorisinin mekanizması görülmektedir.

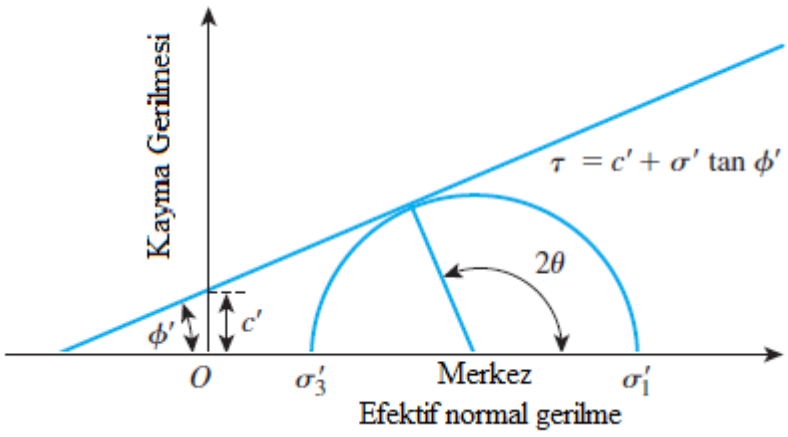


Şekil 2.5 : Coulomb sürtünme teorisi mekanizması (Das, 2010)

Çizelge 2.1'de silt ve kum zeminler için elde edilmiş efektif kayma mukavemeti açıları gösterilmiştir. Yuvarlak dane tipine ait gevşek, orta ve sıkı kumlar için ve köşeli dane tipine ait gevşek, orta ve sıkı kumlar için ve silt zeminler için ortalama değerler verilmiştir. Şekil 2.6'da Mohr-Coulomb göçme zarfı gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : Kum ve silt zeminler için efektif kayma mukavemeti açısı değerleri (Das, 2010).

Zemin Tipi	ϕ′
Kum (Yuvarlak Daneli)	
Gevşek	27 – 30
Orta	30 – 35
Sıkı	35 – 38
Kum (Köşeli Daneli)	
Gevşek	30 – 35
Orta	35 – 40
Sıkı	40 – 45
Çakıllı Kum	34 – 48
Kil	15 – 35
Silt	26 – 35



Şekil 2.6 : Mohr-Coulomb kırılma zarfı

Şekil 2.6'da görüldüğü üzere yatay eksende efektif normal gerilme, düşey eksende kayma gerilmesi yer almaktadır. Kırılma zarfı zeminin göçme sınır durumudur, zarfın altında göçme meydana gelmez ve zarfın üzeri zemin göçtükten sonraki durumudur.

Zeminler için Mohr-Coulomb kırılma kriteri dışında Tresca, Von Mises, Taylor hipotezleri de mevcuttur. Çizelge 2.2'de farklı kırılma hipotezleri, kırılma kriterleri ve hangi koşullarda kullanıldığı gösterilmiştir. Çizelge 2.3'de ise farklı kırılma hipotezlerine ait bağıntılar görülmektedir. Sünek davranış gösteren zemin gibi bir malzeme için gevrek kırılma teorisine ait bağıntı da yer almaktadır.

Çizelge 2.2 : Kırılma kriterleri arasındaki farklar (Budhu, 2011).

Ad	Kırılma Kriteri	Malzeme Tanımı	En Uygun Kullanım
Coulomb (1776)	Kayma düzleminde sürtünmeden ileri gelen kayma	Rijit ve sürtünmeli malzeme	Tabakalı halde bulunan veya aşırı konsolide zeminler
Mohr-Coulomb (1911)	Kayma düzleminde sürtünmeden, maksimum efektif gerilmeden ileri gelen kayma	Rijit ve sürtünmeli malzeme	Drenajlı koşullarıda aşırı konsolide ince daneli zeminler veya sıkı kaba daneli zeminler
Tresca (1869)	Maksimum gerilmenin yarısında oluşan kayma	Homojen-katı malzeme	Drenajsız koşullarda ince daneli zeminlerde
Taylor (1948)	Danelerin kenetlenmesinden dolayı oluşan sürtünme etkisinde meydana gelen kayma	Şekil değiştirebilir, sürtünmeli katı	Drenajlı veya drenajsız koşullarda homojen özellik gösteren zeminler

Çizelge 2.3 : Göçme hipotezleri (Önalp, 2013).

Teori	Bağıntı
Tresca-Coulomb	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2k_1$
Geliştirilmiş Tresca	$(\sigma_1 - \sigma_3) = k_2*(\sigma_1+ \sigma_2 + \sigma_3)$
Von Mises	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_3^2$
Geliştirilmiş Von Mises	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_4^2*(\sigma_1+ \sigma_2 + \sigma_3)$
Griffith (Gevrek)	$\sigma_1 = \sigma_t*(\sigma_1 + 3\sigma_3<0)$ $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8k_5*(\sigma_1 + 3\sigma_3>0)$

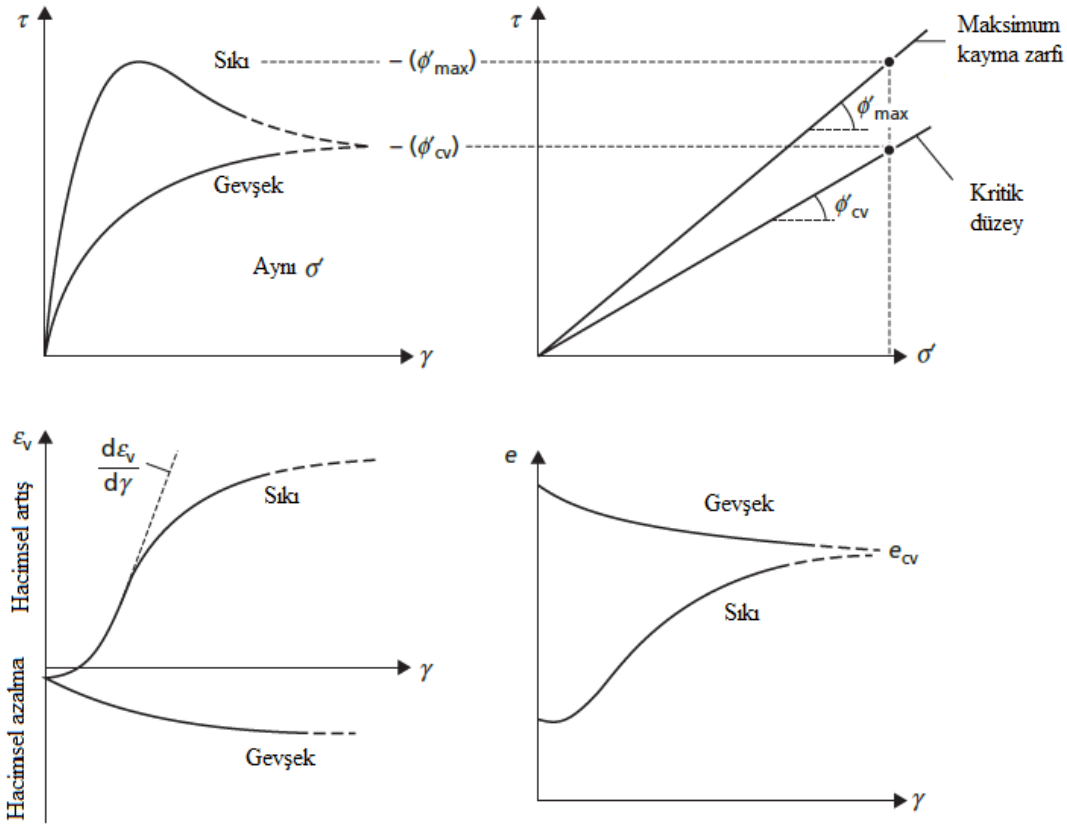
Çizelge 2.3'de verilen 'k' denklem değişmezlerini, 'σ_t' ise çekme dayanımlarını, '$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$' çekme dayanımı bileşenlerini göstermektedir.

2.2 Kaba Daneli ve İnce Daneli Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Kaba daneli (kohezyonsuz) olarak nitelendirilen zeminlerde, moleküler kuvvetlerden ziyade mekanik kuvvet olan yerçekimi kuvveti ön plana çıkmaktadır. İnce daneli zeminlerde ön plana çıkan moleküller arası çekim kuvvetleri kaba daneli zeminlerde etkin olmadığından, bu zeminlerde kohezyon terimi bulunmamaktadır. Bu doğrultuda kayma mukavemeti;

$$\tau = \sigma * \tan\phi \qquad \textbf{(2.4)}$$

bağıntısıyla tanımlanır. Kaba daneli zeminlerde geçirimlilik katsayısı yüksek olduğundan, yükleme sırasında zemin bünyesinde bulunan su hızlı şekilde drene olmaktadır ve buna bağlı olarak ilave boşluk suyu basıncı oluşmamaktadır. Bu duruma göre kaba daneli zeminlerde kayma mukavemeti incelenirken drenajlı koşullarda incelemek daha gerçekçi olmaktadır. Kaba daneli zeminlerde kayma mukavemeti açısı zeminin sıkılığına, dane çapı dağılımına ve dane şekline bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.7'de kaba daneli zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özellikleri görülmektedir.



Şekil 2.7 : Kumların gerilme-şekil değiştirme özellikleri (Craig, 2012)

Bu tip zeminlerde deprem esnasında oluşan dinamik yüklerin etkisiyle boşluk suyu basıncının ani olarak yükselip, toplam gerilmeye eşit olması durumda efektif gerilme sıfıra eşit olmaktadır. Bu durum sıvılaşma olarak adlandırılmaktadır. Sıvılaşmanın gerçekleştiği zeminler mukavemetlerini yitirmektedir.

İnce daneli zeminlerde danelerin boyutu çok küçük olduğundan moleküler arası çekim kuvvetleri ön plana çıkmaktadır ve bu tip zeminlerde kayma mukavemeti belirlenirken kohezyon terimi hesaba katılmaktadır. İnce daneli zeminlerde suya doygunluk derecesi, gerilme geçmişi, başlangıç koşulları, yükleme ve drenaj koşulları kayma mukavemetini etkileyen faktörler olarak sıralanabilir. İnce daneli zeminlerde stabilite analizlerinin güvenli şekilde yapılabilmesi için tasarımların toplam gerilmelere ve efektif gerilmelere göre yapılması önem arz etmektedir. Yüklemenin hızlı olarak uygulanacağı durumlar için drenajsız koşullara göre (toplam gerilmeler), yavaş yüklemeler için drenajlı koşullara göre (efektif gerilmeler) tasarım yapmak önemlidir. İnce daneli zeminlerde, özellikle killerde, permabilite katsayısı oldukça düşük olduğundan, boşluk suyu basıncının sönümlenmesi kaba daneli zeminlerin aksine oldukça uzun sürebilmektedir. Bu durumda drenajlı koşullara göre kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir.

2.3 Zeminlerde Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan çeşitli laboratuvar ve arazi deney yöntemleri mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan laboratuvar deneyleri serbest basınç deneyi, kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi, halka kesme deneyi, basit kesme deneyi ve laboratuvar Veyn deneyi olarak sıralabilir. Standart penetrasyon (SPT), konik penetrasyon (CPT) deney sonuçları ile bazı korelasyonlar kullanılarak ve arazi Veyn deneyi gibi arazide gerçekleştirilen deneyler ile kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek mümkündür.

2.3.1 Serbest basınç deneyi

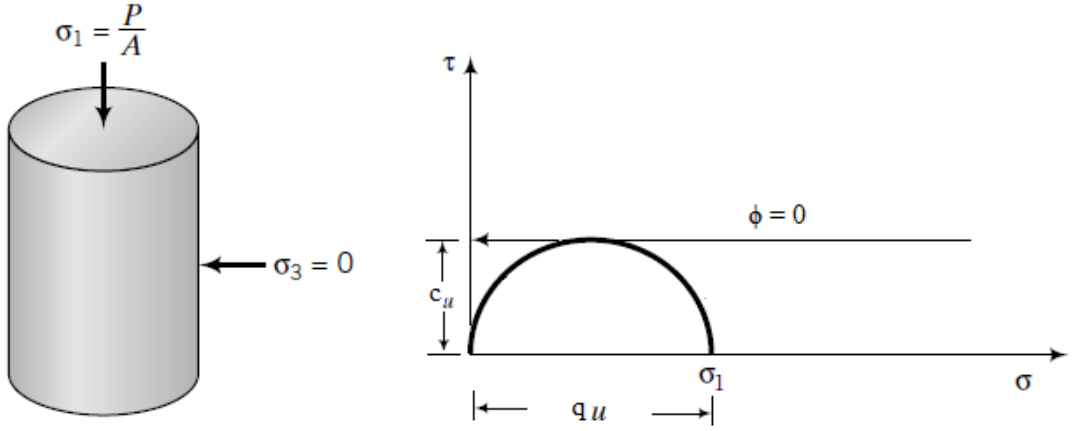
Genellikle suya doygun normal konsolide killi zeminlerde kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deney olup, deney sonucunda elde edilen Mohr dairesinden zemine ait kayma direnci hesaplanabilmektedir. Deneyde tercihen 38mm çapında ve 76mm boyunda silindirik kohezyonlu zemin numuneleri kullanılmaktadır.

Serbest basınç deneyi oldukça çabuk sonuç vermesinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Bu deney, gerilme kontrollü ve deformasyon kontrollü olmak üzere iki şekilde yapılmakla birlikte, yaygın olarak birim boy kısalması kontrollü olanı tercih edilmektedir. Deney, numunenin deney süresince su içeriğinde değişiklikler olabileceğinden dolayı 5-10dk içerisinde tamamlanmalı ve birim boy kısalması %0.5/dk-%2/dk olmalıdır. Deneye, numunenin taşıdığı yük azalmaya başladığı zaman ya da boy kısalmasının %20'ye ulaşmasından sonra son verilebilir (Yılmaz ve diğ., 2009). Bu deneyde eksenel gerilmenin en büyük değeri serbest basınç dayanımını (q_u) verir. Drenajsız kayma mukavemeti ise; $\tau = c_u = q_u/2$ bağıntısı ile elde edilir.

Serbest basınç deneyi uygulanan hücre basıncının sıfıra eşit olduğu durumda konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyinin (UU) özel bir çeşidi olarak nitelendirilebilir. Bu deneyde kullanılan numune suya doygun normal konsolide olmalı, fisür veya çatlak barındırmamalıdır. Aksi halde elde edilen sonuçlar gerçekçi olmayacaktır. Şekil 2.8'de serbest basınç deney düzeneği gösterilmiştir. Şekil 2.9'da serbest basınç deneyine ait grafikler yer almaktadır.



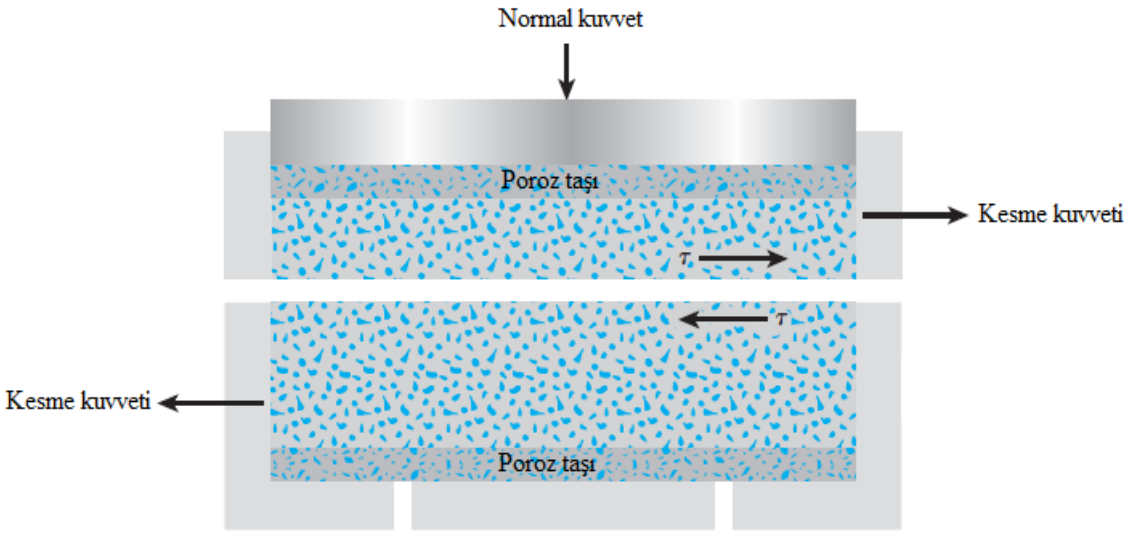
Şekil 2.8 : Serbest basınç deney aleti (İTÜ)



Şekil 2.9 : Serbest basınç mukavemeti kayma gerilmesi-normal gerilme ilişkisi

2.3.2 Kesme kutusu deneyi

Kesme kutusu deney yöntemi, kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek için kullanılan en eski ve basit deney yöntemi olarak nitelendirilir. Kesme kutusu deney aletine yerleştirilen kare veya daire şekillerinde numunenin yüklenmesi ve ortasından kesilmesi şeklinde gerçekleşir. Deney gerilme veya deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilebilmektedir (Das, 2010). Şekil 2.10'da kesme kutusu deney düzeği görülmektedir.



Şekil 2.10 : Kesme kutusu deney düzeneği (Das, 2010)

Rijit bir kutu içerisine yerleştirilen numunenin belirlenen yüklemede konsolidasyonu tamamlandıktan sonra belirlenen hızda kesme işlemi gerçekleşir.

Kesme sırasında beliren fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi kesme hızına bağlıdır. Ancak bu deneyde numune ne denli hızlı kesilirse kesilsin drenaj tümüyle önlenemeyeceğinden, gerçek bir drenajsız deneyin gerçekleşmeyeceği kabul edilmektedir. Bu deneyin en sakıncalı yanı, zorlanan kayma yüzeyi ile eğer varsa, numunede mevcut en zayıf kayma yüzeyinin çakışmama olasılığının yüksek olmasıdır. Kesme kutusu deneyinde normal gerilme;

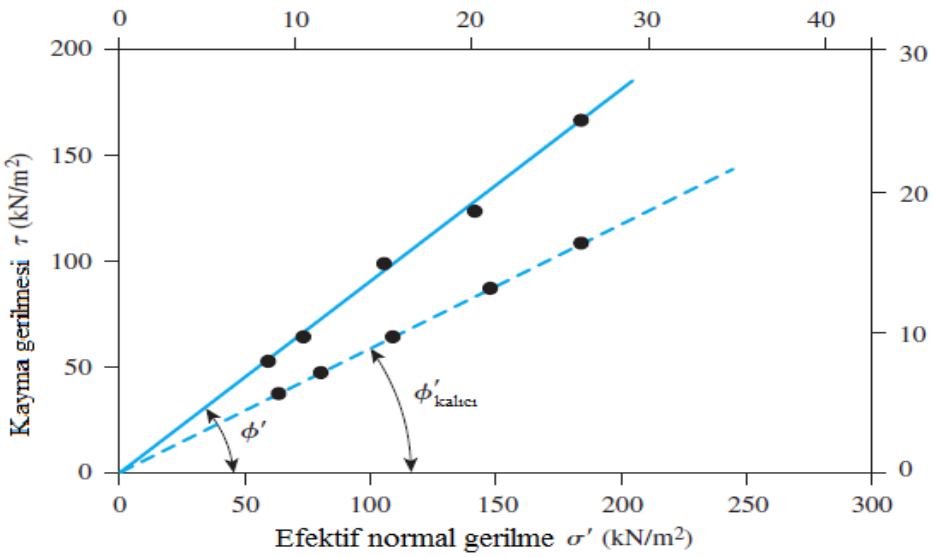
$$\sigma = \frac{\text{Normal Kuvvet}}{\text{Düzeltilmiş Alan}} \qquad \textbf{(2.5)}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Kayma gerilmesi ise;

$$\tau = \frac{\text{Kayma Kuvveti}}{\text{Düzeltilmiş Alan}} \qquad \textbf{(2.6)}$$

bağıntısı ile elde edilir.

Kesme kutusu deneyi özellikle kumların drenajsız kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Ucuz ve yapılışı basit bir deney yöntemi olması en büyük avantajlarındandır. Şekil 2.11'de kesme kutusu deney sonuçlarına göre çizilen kırılma zarfları görülmektedir.

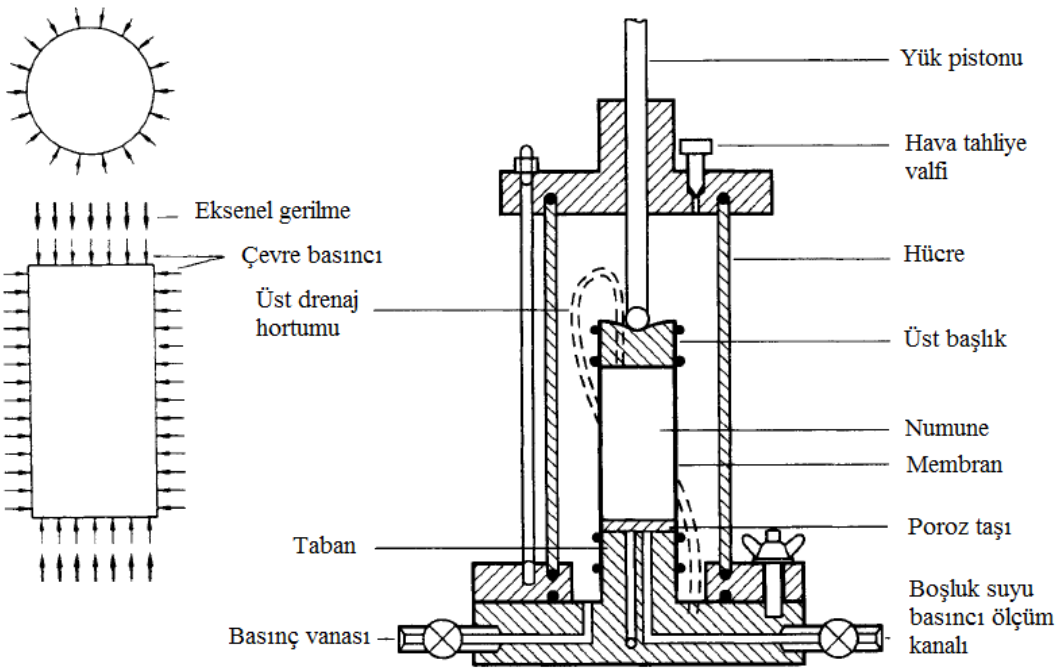


Şekil 2.11 : Kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kırılma zarfı (Das, 2010)

Normal gerilme-kayma gerilmesi değişimine göre elde edilen sonuçlar yardımıyla kayma mukavemeti açısı ve varsa kohezyon terimi elde edilmektedir.

2.3.3 Üç eksenli basınç deneyi

Üç eksenli basınç deney yöntemi, kayma mukavemeti parametrelerini elde etmede kullanılan en kapsamlı deney yöntemi olmakla beraber kullanışlı bir deney yöntemidir. Bu deney yöntemi drenaj koşullarının kontrol edilebilmesi, düşük permabiliteli zeminlerde doygunluk ve konsolidasyonun kontrol edilebilmesi ve boşluk suyu basıncının ölçülebilmesi açısından avantaja sahiptir. Genellikle boy/en oranı iki olan silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilen bu deneyde numuneye her yönden uygulanan basınçla arazi koşullarına en yakın durumun elde edilebilmesine olanak sağlanır. Bu deney yöntemi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajsız (CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Craig, 2004). Şekil 2.12'de üç eksenli basınç deney düzeneği görülmektedir.



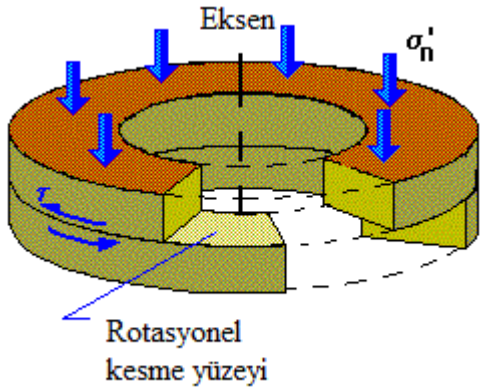
Şekil 2.12 : Üç eksenli basınç deney düzeneği (Craig, 2004)

UU deneyi, konsolidasyonsuz-drenajsız olarak gerçekleşen hızlı bir deneydir. Elde edilen sonuçlar yaygın olarak taşıma gücü hesabında kullanılır. CU deneyi, konsolidasyonlu-drenajsız olarak uygulanan deneydir. Kesme hızı UU deneyine göre daha yavaş olarak gerçekleşir. Deneyde boşluk suyu basıncı değişimi ölçülür, kayma mukavemeti parametreleri toplam ve efektif gerilmelere göre elde edilir (Craig, 2004).

Elde edilen sonuçlar su seviyesinde ani değişimlerin olduğu bölgelerdeki stabilite analizlerinde kullanılabilir. CD deneyi ise konsolidasyonlu-drenajlı olarak gerçekleştirilen üç eksenli basın deneyidir. Kesme hızı çok düşük olduğundan ilave boşluk suyu basıncı oluşmaz, toplam gerilmeler efektif gerilmelere eşit olur. Uzun süreli stabilite analizleri için bu deney yöntemi kullanılır (Craig, 2004).

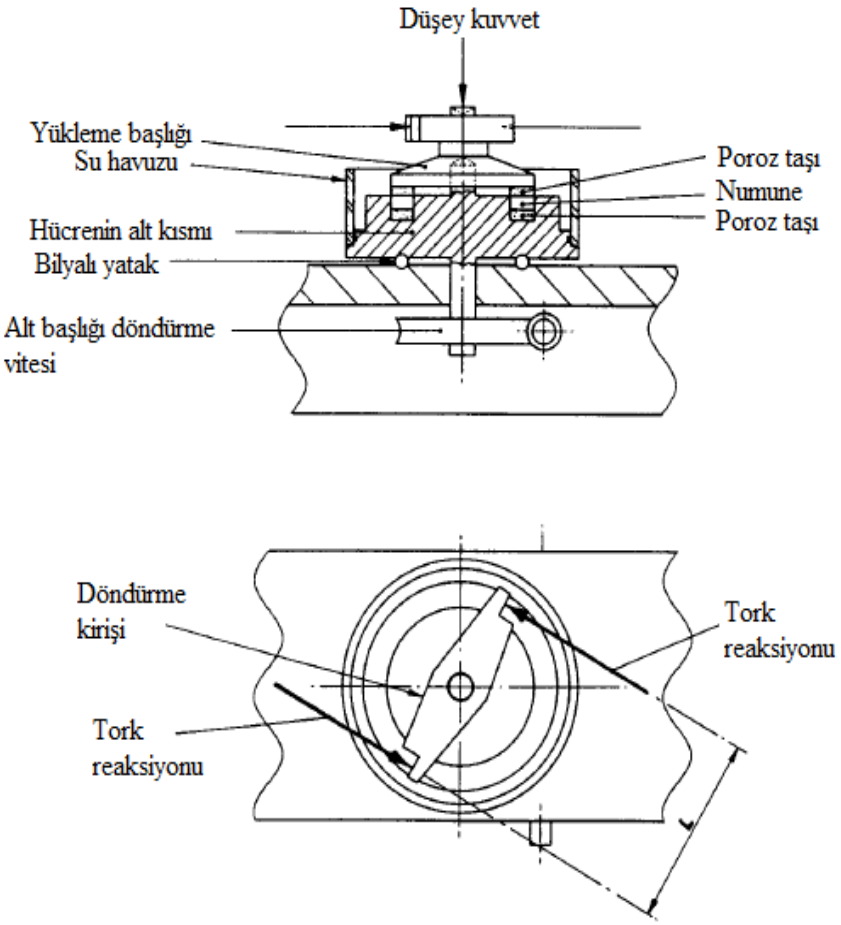
2.3.4 Halka kesme deneyi

Halka kesme deney yöntemi, kohezyonlu zeminlerde küçük boyutlarda örselenmiş numuneler kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini elde edebilmek amacıyla tasarlanmıştır. Halka kesme deney yöntemi, kullanılan numuneler üzerinde hemen hemen sınırsız deformasyon seviyelerine ulaşmaya imkan vermekte ve tekrarlı kesme kutusu deney yönteminde olduğu gibi geri sarma aşaması olmadığından kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebilmesinde ciddi avantaj sağlamaktadır. 2.13'de halka kesme deneyine tabi tutulan numunenin kesilme şekli temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.13 : Halka kesme deneyinde kullanılan numune ve kesme yüzeyi (Hatipoğlu, 2009)

Bu deney yönteminde örselenmiş ve örselenmemiş numuneler kesme düzeneğine yerleştirilir. Üst plaka konulduktan sonra yükleme aşamasına geçilir. Deneyde mutlak suretle tamamıyla drenajlı koşullar sağlanmaktadır. Deneyde kullanılan numune şekil olarak içi boş halka şeklinde, dış çapı 100mm, boşluk çapı 70mm ve 5mm kalınlığındadır. Kayma düzlemi üzerinde oluşan normal gerilme ve kayma gerilmesinin, kalıcı kayma mukavemeti koşullarına ulaşıldığında, rölatif dönme düzlemi üzerinde üniform olarak yayıldığı kabul edilir (Head, 1994). Şekil 2.14'de halka kesme deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.14 : Halka kesme deney düzeneği (Head, 1994)

Şekil 2.14'de görüldüğü üzere yerleştirilen halka şeklinde numune, döndürülerek kesme işlemine tabi tutulur. Bu yolla sınırsız deformasyon seviyesi imkanı sağlandığından, ileri deformasyon seviyelerinde değişmeyen sabit bir değer alan kalıcı kayma mukavemetini elde etmeye olanak sağlar. Şekil 2.15'de 'Bromhead' tipi halka kesme deney aleti görülmektedir.



Şekil 2.15 : Bromhead tipi halka kesme deney aleti (Bromhead, 1986)

2.3.5 Veyn deneyi

Bu deney yöntemi arazi ve laboratuvar olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Suya doygun killi zemilerde drenajsız kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek için uygun bir yöntemdir. Özellikle yumuşak killerde doğru sonuçlar vermekte olan bu deney yöntemi, kum veya silt içeren killerde güvenilir sonuçlar vermemektedir (Craig, 2004).

2.4 Kalıcı Kayma Mukavemeti

Kohezyonlu zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti geoteknik mühendisliğinde oldukça önem arz etmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti, uzun süreli stabilite analizlerinde, önceden göçmüş ve küçük çatlaklara sahip kohezif zeminlerin stabilite analizlerinde rol oynamaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti üzerinde kapsamlı labaratuvar çalışmaları yapılmakta, farklı deney teknikleri ile zeminlerin endeks özellikleri ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri arasında korelasyonlar kurulmaya çalışılmaktadır (Lupini ve diğ., 1981).

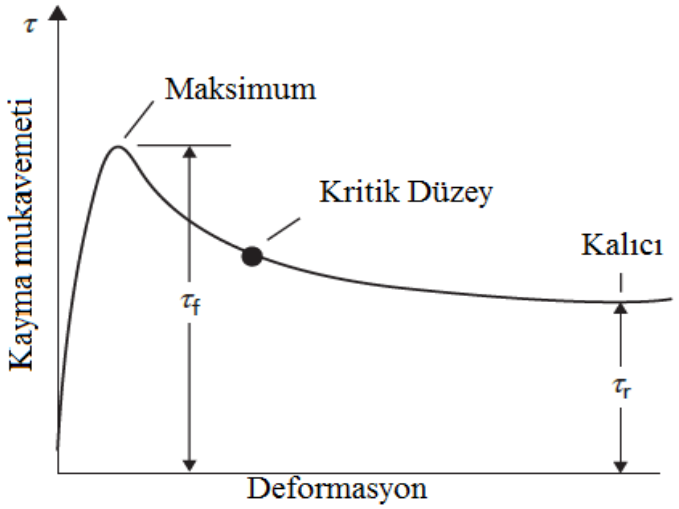
Geçmişte yapılan çalışmalarda maksimum kayma mukavemeti parametrelerine göre yapılan ve güvenli olarak görülen uzun süreli stabilite analizlerinde, şevlerin zaman geçtikten sonra göçtüğü görülmüştür. Göçmenin meydana geldiği şevler üzerinde ortalama bir kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir ve bu ortalama değerin tasarımda kullanılan maksimum kayma mukavemeti değerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri maksimum kayma mukavemetinin elde edilmesinden sonra sonlandırılmamış, ileri deformasyon seviyelerine kadar devam edilmiştir. Bu işlemin neticesinde kayma gerilmesinin artan deformasyon seviyesi ile bir maksimum değere ulaştığı, sonrasında bu değerin azalarak sabit hale gelen ve artan deformasyonla değişmeyen bir hal aldığı tespit edilmiştir. Bu değer kalıcı kayma mukavemeti olarak ifade edilmektedir (Skempton, 1964).

2.4.1 Kalıcı kayma mukavemetinin tanımı ve mekanizması

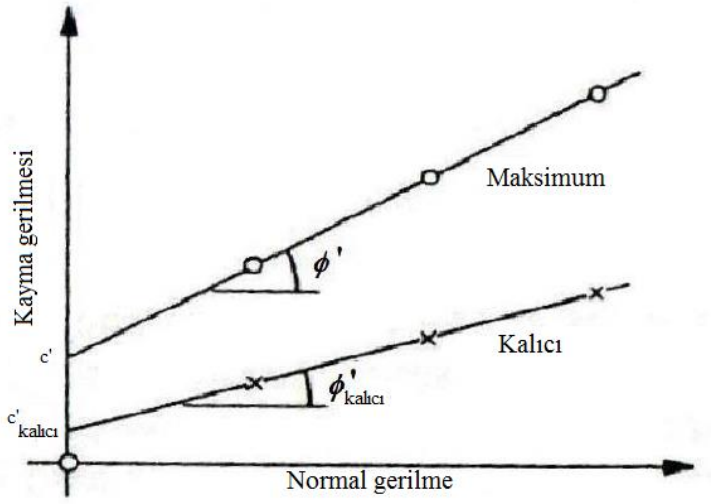
Kalıcı kayma mukavemeti, düşük kesme hızlarında ileri deformasyon seviyelerinde ulaşılan minimum sabit kayma mukavemeti değeri olarak tanımlanır. Aşırı konsolide killerde drenajlı koşullarda kayma mukavemeti değişimi kil yüzdesine bağlı olarak, iki aşama olarak tanımlanabilir (Skempton, 1985).

Birinci aşama, maksimum kayma mukavemetine ulaşıldıktan sonra küçük deformasyon seviyelerinde kritik düzeye ulaşıncaya kadar kayma mukavemetinde meydana gelen düşüş olarak ifade edilir (Skempton, 1985).

İkinci aşama ise, ileri deformasyon seviyelerinde danelerin kesme yüzeyine paralel olarak yönelimi ve kesme yüzeyine giren su nedeniyle oluşan cilalanma etkisi sebebiyle kayma mukavemetinin artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen sabit bir değere ulaştığı kalıcı kayma mukavemeti değeri olarak ifade edilir (Skempton, 1985). Şekil 2.16'da maksimum, kritik seviye ve kalıcı kayma mukavemeti gösterilmiştir. Şekil 2.17'de ise maksimum ve kalıcı kayma mukavemetine ait kırılma zarfları görülmektedir.

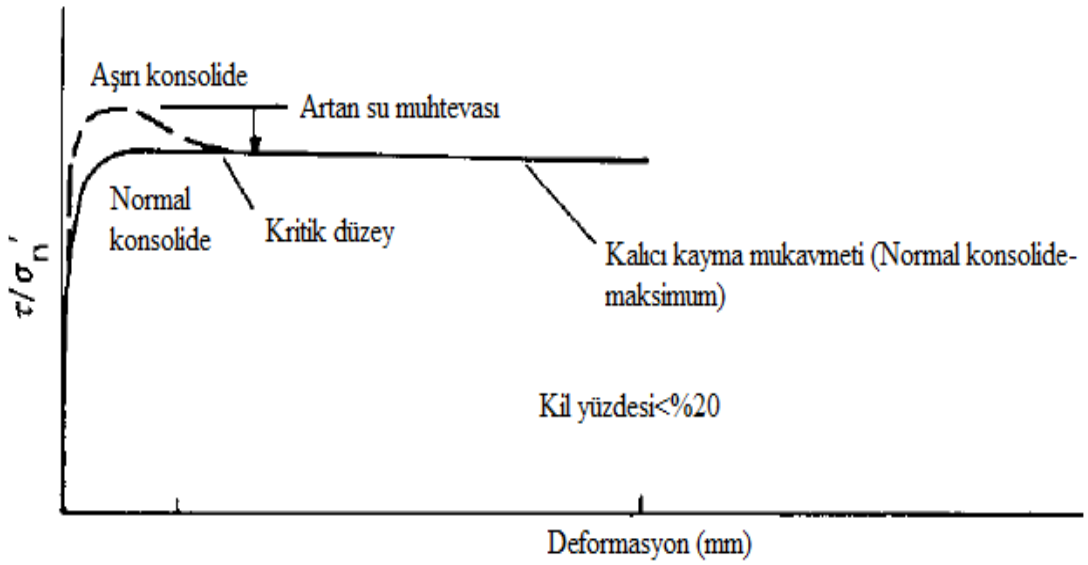


Şekil 2.16 : Kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi (Craig, 2012)

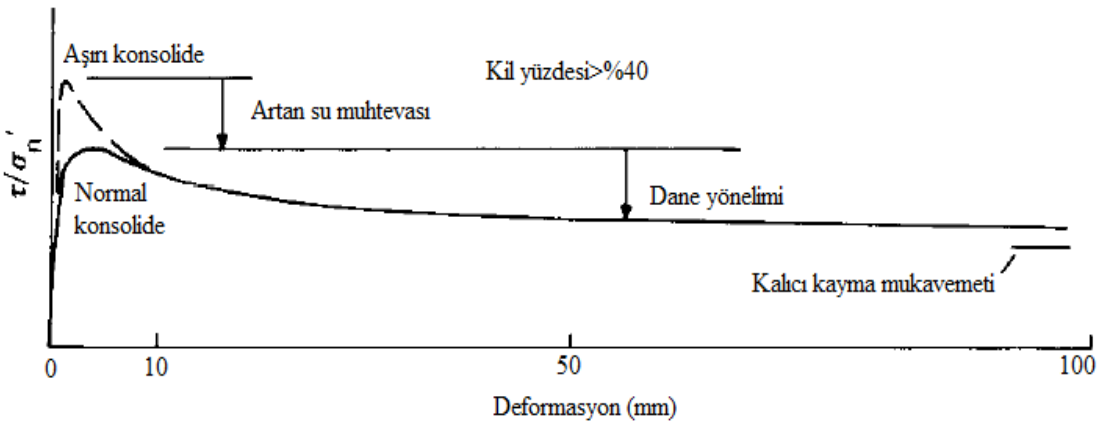


Şekil 2.17 : Maksimum ve kalıcı kayma mukavemetine ait kırılma zarfları (Head, 2006)

Normal konsolide killerde maksimum (pik) mukavemet aşıldıktan sonra kayma mukavemetinde meydana gelen düşüş sadece danelerin kesme yüzeyine paralel yönelimi sonucunda gerçekleşir. Normal konsolide killerde kayma mukavemetindeki düşüş, aşırı konsolide killerde olduğu gibi iki aşamada gerçekleşmez. Şekil 2.18 ve şekil 2.19'da farklı kil yüzdelerinde, normal ve aşırı konsolide killerin kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi görülmektedir.



Şekil 2.18 : Normal ve aşırı konsolide killerin kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi (Kil yüzdesi<%20) (Skempton, 1985)



Şekil 2.19 : Normal ve aşırı konsolide killerin kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi (Kil yüzdesi>%40) (Skempton, 1985)

Maksimum kayma mukavemetinin elde edilmesi için;

$$\tau_{maks} = c_{maks} + \sigma * \tan\phi_{maks} \quad \textbf{(2.7)}$$

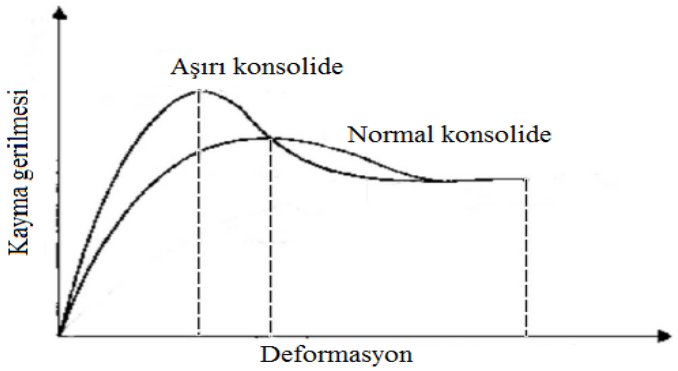
bağıntısı kullanılır. Kalıcı kayma mukavemeti için ise;

$$\tau_{kalıcı} = c_{kalıcı} + \sigma * \tan\phi_{kalıcı} \quad \textbf{(2.8)}$$

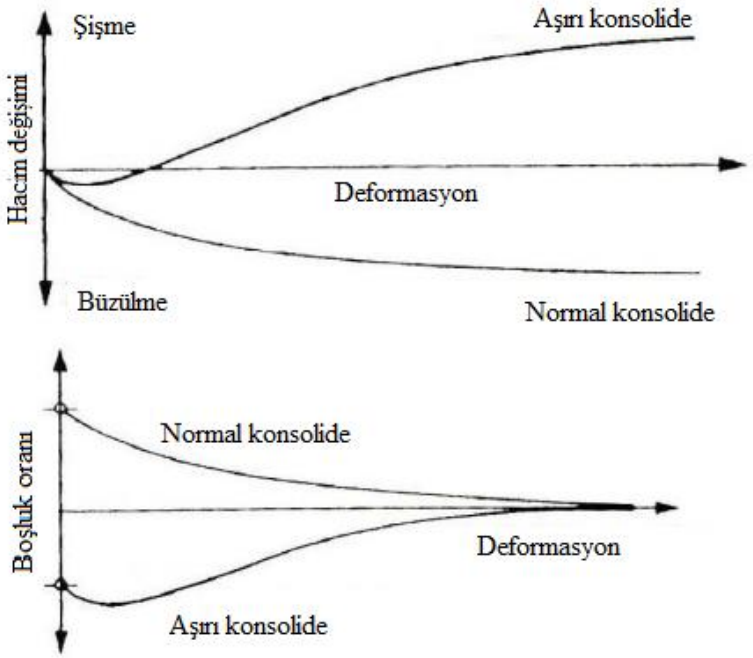
bağıntısı kullanılır.

Bağıntılarda kullanılan parametreler, drenajlı durumda elde edilen parametrelerdir. 'c_{maks}' maksimum durumdaki kohezyon terimini, 'ϕ_{maks}' maksimum durumdaki kayma mukavemeti açısını, '$c_{kalıcı}$' kalıcı kayma mukavemetine ait kohezyon terimini ve '$\phi_{kalıcı}$' kalıcı kayma mukavemeti açısını göstermektedir (Head, 2006).

Aşırı konsolide haldeki zeminlerde maksimum kayma mukavemeti-kalıcı kayma mukavemeti değerleri arasındaki fark normal konsolide zeminlere göre daha fazladır. Aşırı konsolide zeminler normal konsolide zeminlere göre daha düşük deformasyon seviyelerinde daha yüksek bir maksimum kayma dayanımına ulaşmakta ve ileri deformasyon seviyelerinde kayma mukavemeti değerleri daha büyük bir düşüş göstermektedir. Aşırı konsolide zeminlerde deformasyonun artmasına bağlı olarak hacim değişimi küçük bir aralıkta azalmakta (büzülme), sonrasında artış göstermektedir (şişme). Normal konsolide zeminlerde ise hacim değişimi artan deformasyonla azalış göstermektedir. Aşırı konsolide zeminler gerilme geçmişinde daha büyük bir gerilmeye maruz kaldığından, bu gerilme değerinin altındaki seviyede hacimlerinde artış meydana gelmektedir (Head, 2006). Belirtilen şişme ve büzülme durumları göz önüne alındığında, aşırı konsolide zeminlerde artan deformasyonla birlikte boşluk oranı artmakta, normal konsolide zeminlerde ise azalmaktadır. Şekil 2.20'de kayma mukavemeti üzerinde aşırı konsolidasyonun etkisi, şekil 2.21'de aşırı konsolidasyonun hacim değişimi ve boşluk oranı üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.20 : Kayma mukavemeti-deformasyon ilişkisi üzerinde aşırı konsolidasyonun etkisi (Head, 2006)



Şekil 2.21 : Aşırı konsolideasyonun hacim değişimi ve boşluk oranı üzerindeki etkisi (Head, 2006)

İleri deformasyon seviyelerinde ortaya çıkan kalıcı kayma mukavemeti ile ilgili ilk çalışmalar 1930'lu yıllarda Hvorslev (1936, 1937, 1939), Tiedeman (1937) ve Haefeli (1938) tarafından yapılmıştır. Tiedman, ileri deformasyon seviyelerinde sabit bir değer alan kayma mukavemetini saf kayma mukavemeti (pure sliding resistance) olarak tanımlamıştır. Haefeli ise bu nihai kayma dayanımını sabit kalan kayma mukavemeti (remaining shear strength) olarak ifade etmiştir. Hvorslev kırılma sonrası artan deformasyonla sabit bir değer alan kalıcı kayma mukavemetini elde etmek için en iyi yöntemin halka kesme deneyi olduğunu belirtmiştir. Haefeli maksimum kayma mukavemetinden kalıcı kayma mukavemeti değerine olan düşüş büyüklüğünün likit limitin artmasıyla arttığını keşfetmiştir. 1960'lı yıllarda kalıcı kayma mukavemetinin arazideki önemi Skempton tarafından ortaya konmuş ve kalıcı kayma mukavemetinin uzun süreli şev stabilitesindeki önemi belirtilmiştir. Skempton, kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti arasında göreceli muntazam bir geçiş olarak genel bir korelasyon önermiştir. Borowicka (1965) farklı kil numuneleri üzerinde yaptığı tekrarlı kesme kutusu deneylerine göre kil yüzdesinin artmasına bağlı olarak kalıcı kayma mukavemeti açısının düştüğünü gözlemlemiştir. Herrmann ve Wolfskill (1966) kalıcı kayma mukavemeti için halka kesme deneyleri, tekrarlı kesme kutusu deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir.

Üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerinin diğer iki deney yöntemine göre daha yüksek sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Chandler (1966, 1969) kalıcı kayma mukavemeti üzerine çalışmalar yapmış, düşük plastisiteli siltli kil numuneleri üzerinde önceden kesilmiş halde (pre-cut plane) tekrarlı kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Skempton'ın önerdiği kil yüzdesi-kalıcı kayma mukavemeti açısı korelasyonu ile örtüşen sonuçlar elde etmiştir. La Gatta (1970) örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yaptığı çalışmalar sonucunda numune hazırlama koşullarının ve gerilme geçmişinin kalıcı kayma mukavemetini etkilmediği sonucuna ulaşmıştır. Ramiah, Dayalu ve Prushothamaraj (1970) yaptıkları çalışmalar sonucu kesme hızının kalıcı kayma mukavemeti üzerinde ihmal edilebilir düzeyde etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Bishop ve Vaughan (1971) kumlu killer üzerinde yaptıkları çalışmalarda halka kesme deneyi ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının üç eksenli basınç deneyi ile %25 deformasyon sınırına kadar elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarından az miktarda düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Mitchell (1976) mineralojinin ve dane şeklinin kalıcı kayma mukavemetine etkisini incelemiştir. Keskin dane şekline sahip zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti açısının daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır. Fleischer ve Scheffler (1979) yaptıkları çalışmalarda kalıcı kayma mukavemeti açısı ve plastisite indisi arasında bağlantı olduğunu ifade etmişlerdir (Lupini, 1981). Timothy ve Stark (1994) kalıcı kayma mukavemeti değerini kil mineralojisi ve dane şeklinin kontrol ettiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca likit limit değerinin kalıcı kayma mukavemeti açısını etkilediğini belirtmişlerdir. Picarelli (1997) zemin danelerinin kümelenmesi ve uzun süreli konsolide olmasının maksimum kayma mukavemeti üzerinde önemli bir etken olduğu; fakat kalıcı kayma mukavemeti üzerinde bu seviyede bir etkisinin olmadığını ifade etmiştir. Tiwari (2005) kalıcı kayma mukavemeti ve zeminin mineralojik bileşenleri ile korelasyon oluşturup, kalıcı kayma mukavemetinin hesaplanabilmesi için bağıntılar önermiştir. Yang ve diğ. (2009) şişen zeminlerin kalıcı kayma mukavemetleri üzerine yaptıkları çalışmalarda kalıcı kayma mukavemetinin şişen zeminler için önemli bir karakteristik olduğunu belirtmiştlerdir. Şişen zeminlerde göçmenin ana sebebinin kayma mukavemetinde meydana gelen düşüş olması sebebiyle stabilite analizlerinde kalıcı kayma mukavemetinin öncemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Mesri (2012) kalıcı kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleri elde edilmesi ve araziye uygulanması üzerine çalışmalar yapmıştır. Kalıcı kayma mukavemeti ile ilgili ülkemizde İyisan ve diğ. tarafından (2006) yapılan 'Sıkıştırılmış zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi', Yılmaz (2006) tarafından yapılan 'Zeminlerin endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi', Ürkmez (2009) tarafından yapılan 'Kalıcı kayma mukavemetinin tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile belirlenmesi', Ataç (2009) tarafından yapılan 'Plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisi', Bayın (2011) tarafından yapılan 'Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemi ile kalıcı kayma direncinin belirlenmesi', Hatipoğlu (2012) tarafından yapılan 'Kalıcı kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi', Binarbaşı (2014) tarafından yapılan 'Killi zeminlerde deformasyona bağlı kayma mukavemetinin deneysel olarak incelenmesi' gibi çalışmalar mevcuttur.

Yapılan tüm çalışmalar doğrultusunda aşırı konsolide veya çatlaklı (fisürlü) kil şevlerin stabilite analizlerinde kayma mukavemeti değerinin zamanla azalarak kalıcı kayma mukavemet değerine inmesinin ani göçmelere neden olabileceği bilinmelidir. Göçme yüzeylerindeki kayma mukavemeti değerinin, kalıcı kayma mukavemetinin büyük deformasyonlar sonucu oluşmasından dolayı, kalıcı kayma mukavemetinin tüm stabilite analizlerinde ve tasarımlarda dikkate alınması gereklidir (Mitchell, 1993).

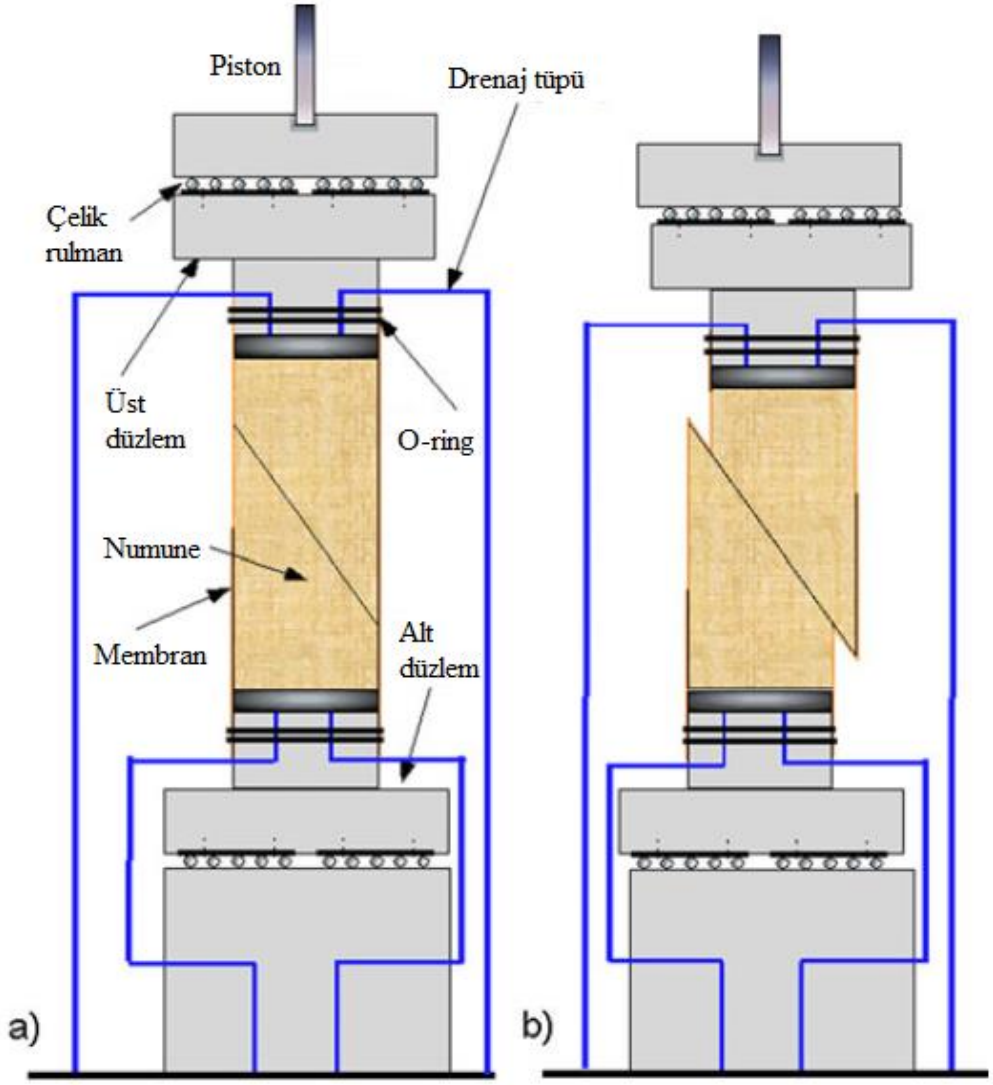
2.4.2 Kalıcı kayma mukavemetinin deneysel yöntemlerle elde edilmesi

Zeminler arazide birçok farklı şartlara maruz kaldığından, deney koşulları da bu farklılığa bağlı değişmektedir. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini tayin etmek amacıyla kullanılan başlıca laboratuvar deney yöntemleri; tekrarlı kesme kutusu deneyleri, halka kesme deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleridir (Bromhead, 1986). Deney yöntemlerinin mukayese edildiğinde bazı avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Üç eksenli basınç deneyleri arazideki gerilme ve drenaj koşullarının laboratuvarda gerçeğe en uygun şekilde sağlanması bakımından diğer deney yöntemlerine göre avantaja sahiptir. Drenajlı üç eksenli basınç deneyine tabi tutulan killerin kayma mukavemeti, maksimum değerine ulaştıktan sonra artan deformasyonla birlikte bir düşüş gösterir. Üç eksenli basınç deneylerinde ulaşılacak deformasyonun bir limit değeri vardır, bu kalıcı kayma mukavemetinin elde edilmesinde üç eksenli basınç deney yönteminin dezavantajı olarak nitelendirilebilir.

Kalıcı kayma mukavemeti ise ileri deformasyon seviyelerinde görüldüğünden, kalıcı kayma mukavemetini elde edebilmek için en tatmin edici yöntemler halka kesme deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneyleridir. Halka kesme deneyinde kullanılan içi boş halka biçimindeki numune belirlenen normal gerilme değerinde kesilir. Numunenin yarısı yatay düzlemde sabit kalırken diğer yarısı hareket ettirilirek kesme işlemine tabi tutulur. Bu yöntem sayesinde deney esnasında deformasyon açısından herhangi bir kısıtlama olmamaktadır. Kesme hızı ise drenajlı koşulların sağlanabilmesi için yeterince yavaş olmak zorundadır. Burada zeminin gösterdiği kayma mukavemeti, danelerin dönme sonucu oluşan torka karşı gösterdiği mukavemet olarak tanımlanabilir. Kayma mukavemeti değeri, maksimum değerden düşmeye başladıktan sonra düşük bir deformasyon aralığında kesilme düzleminde yumuşama meydana gelir ve kayma mukavemeti değeri kritik seviyeye gelir. Kesme işlemine devam edildikçte artan deformasyonla kayma mukavemeti düşmeye devam eder ve nihai olarak deformasyonla değişmeyen sabit bir değer olan kalıcı kayma mukavemeti değerine ulaşır. Eğer zemin yüksek oranda düzlemsel biçimli parçacıklardan meydana geliyorsa, bu danelerin kesme düzlemine paralel şekilde yönelimi sonucu kalıcı kayma mukavemeti değeri elde edilir. Daneler arasında çok yüksek seviyede bir sürtünme oluşursa danelerin kesme yüzeyine paralel yönelimi gerçekleşmeyebilir. Danelerin kesme yüzeyine paralel yönelimi sonucu zeminin orijinal yapısı bozulmuş olacağından, örselenmiş numune kullanmak kalıcı kayma mukavemetini elde etmek için önemli olmayacaktır (Craig, 2012).

Tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi kalıcı kayma mukavemetinin elde edilmesi için yapılışı kolay ve ucuz bir deney yöntemi olması yönüyle avantaj sağlamaktadır. Tekrarlı kesme kutusu deneyine tabi tutulan numune, maksimumm kayma mukavemeti değerine ulaştıktan sonra deney sonlandırılmaz. Deformasyonla değişmeyen sabit bir değere ulaşılıncaya kadar kesme işlemine devam edilir. Kesilen numune geri sarılarak tekrar konsolide olması sağlandıktan sonra tekrar kesme işlemine tabi tutulur. Bu döngüye kalıcı kayma mukavemetine ulaşıncaya kadar devam edilir. Tekrarlı kesme kutusu deneyinde oluşan boşluk suyu basıncı değişiminin ölçülmesinin mümkün olmayışı ve deneyde numunenin kesilme düzleminin numunenin en zayıf olduğu düzlemle çakışmama olasılığı bu deney yönteminin dezavantajları olarak nitelendirilebilir. Ayrıca döngüler esnasında kayma düzleminin bozulma olasılığı da deney yönteminin zaaflarındandır.

Meehan ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada kalıcı kayma mukavemetini konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemini amaca uygun biçimde geliştirerek gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.22'de deney düzeneği görülmektedir.

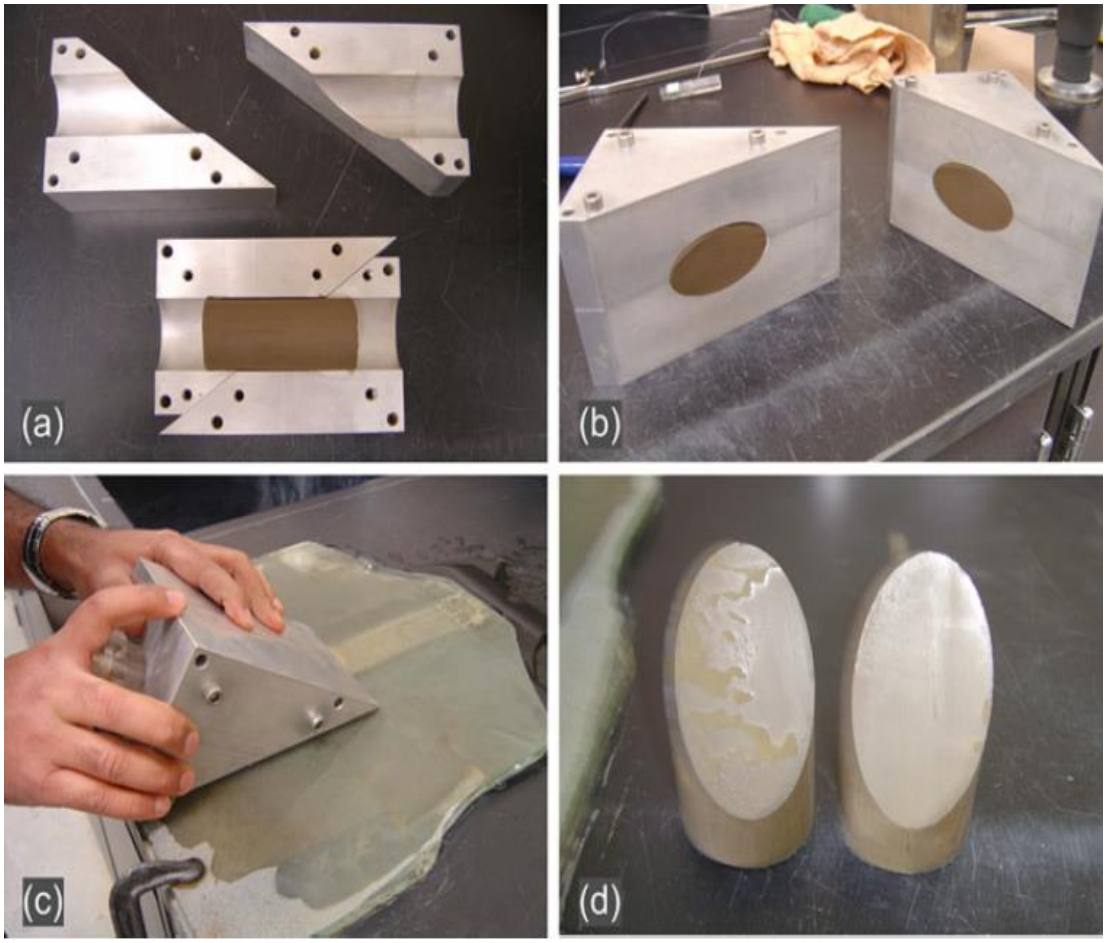


Şekil 2.22 : Geliştirilmiş üç eksenli basınç deneyi sistemi (Meehan ve diğ., 2011)

Şekil 2.22'de önceden kesilip, kesme yüzeyi cilalı yüzey haline getirilmiş numunenin deney başlangıcında (a) ve deney esnasında (b) alacağı durumlar gösterilmiştir. Alt düzleme ve üst düzleme yerleştirilen çelik rulmanlar yardımıyla deformasyon sınırı arttırılmıştır.

Üç eksenli basınç deney sistemindeki deformasyon sınırını (%25) arttırabilmek amacıyla üç eksenli basınç deneyi için 'serbest düzlem' tasarlayıp, kullanılacak numuneyi özel kalıplarda keserek cam yüzeye sürtme yoluyla cilalı yüzeyi deney öncesinde sağlamışlardır.

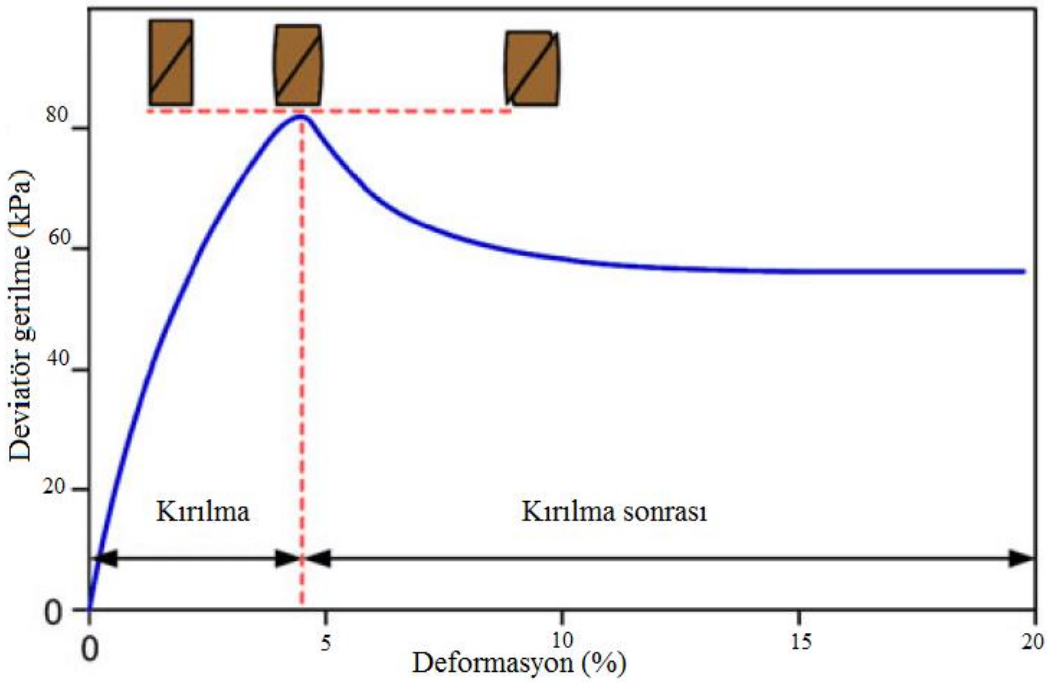
Önceden kesilmiş ve cilalanma etkisi yaratılan yüzey ile numuneyi deneye tabi tutup, bir nevi göçmeden sonraki durumu incelemişlerdir. Şekil 2.23'de numune hazırlama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.23 : Özel numune hazırlama yöntemi (Meehan ve diğ., 2011)

Şekil 2.23'de görüldüğü üzere üç eksenli basınç deneyine tabi tutulacak silindirik numune özel bir kalıpta birbirini tamamlayan iki parça olacak şekilde çelik tel yardımıyla kesilmiştir (a), kesilen parçalar iki kalıpta sabitlenerek (b) kesme yüzeyleri cam tabaka üzerine gelecek şekilde tabaka üzerinde belirli bir süre sürtme yardımıyla cilalı kesme yüzeyi (d) oluşturulmuştur.

Buradaki amaçlanan asıl avantaj ise, zeminlerin kırılmadan önce gösterdikleri en yüksek mukavemet olarak kabul edilen maksimum kayma mukavemeti değerine ulaşıp kırılma gerçekleşene kadar olan deformasyon seviyesi doğrudan atlanarak, deneye kırılma sonrası halden başlanmıştır. Bu yöntemle deformasyon sınırı kalıcı kayma mukavemetini elde edebilmek amacıyla daha verimli şekilde kullanılmıştır. Şekil 2.24'de bu durum gösterilmiştir.



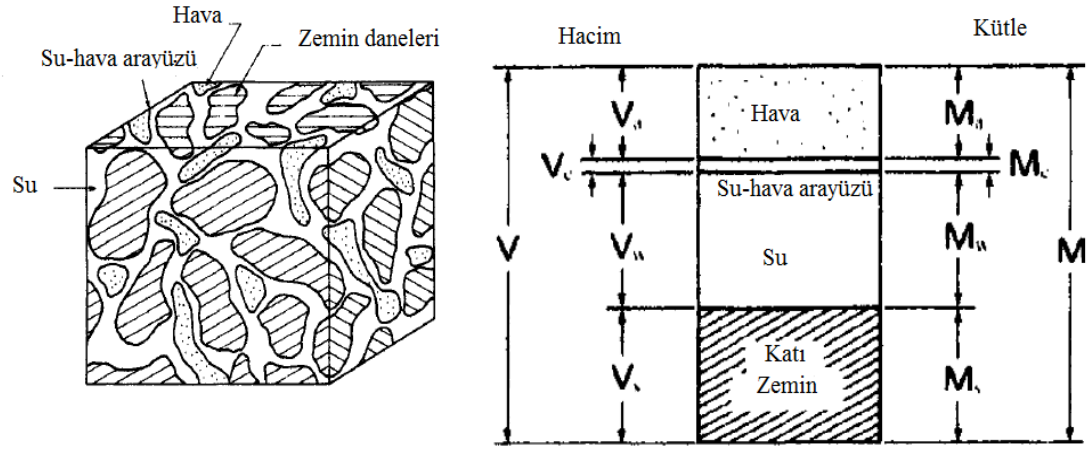
Şekil 2.24 : Üç eksenli basınç deneyi kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi (Meehan ve diğ., 2011)

Şekil 2.24'de görüldüğü üzere bu yöntemle deneye kırılma evresi atlanıp, kırılma sonrası evreden başlanılmıştır. Yatay düzlem ile 55^{o} açı (45+ϕ/2) yapacak şekilde (önceden kesilerek) hazırlanmış iki adet kil numunesi ile yapılan çalışmaların sonucunda serbest düzlem geliştirmesi ile yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerlerinin aynı numuneler üzerinde gerçekleştirilen halka kesme deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerlerinden yüksek olduğu, tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerlerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Geliştirilmiş üç eksenli basınç deney yönteminin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini elde etmede klasik üç eksenli basınç deney yöntemine göre daha kullanışlı olduğu tespit edilmiştir (Meehan ve diğ., 2011).

2.5 Doygun Olmayan Zeminlerde Kayma Mukavemeti

Zeminlerin kayma mukavemeti davranışlarının anlaşılması geoteknik mühendislerinin ilgi alanlarındaki önemli konulardan biridir. Temel tasarımı, şev stabilitesi, istinat yapıları, yol yapıları gibi inşaat mühendisliğinin önemli tasarımlarının uygulanabilmesinde kayma mukavemetine ihtiyaç duyulmaktadır (Freudlund ve Vanapalli, 2000).

Zeminler su, hava ve danelerden oluşan üç fazlı yapıdan oluşmaktadır. Su ve hava zemin bünyesinde bulunan boşluklarda yer almaktadırlar. Bu boşluklar tamamen su ile dolu ise doygun zemin olarak, boşlukların tamamı su ile dolu olmayıp bir kısmında hava bulunuyorsa doygun olmayan zemin olarak isimlendirilir. Çöl gibi ortamlarda üst kısımlarda yer alan zeminlerde ise boşlukların tümünün hava ile dolu olduğu kabul edilir. Klasik zemin mekaniğinin temel varsayımlarından biri ortamın %100 doygun olmasıdır. Doygun terimi ile zemin boşluklarının %98'inden fazlasının su ile dolu olması kastedilmektedir. Geri kalan boşluklardaki kalabilen %2 veya daha az hacimde hava ise birbiri ile doğrudan bağlantılı olmayan ayrık konumdadır. Boşluk hacminin %95'inden daha azının su ile dolu olması durumunda ise ortamdaki hava kabarcıkları arasında bağlantı oluştuğundan hava sürekli hale gelmekte ve zemin doygun olma özelliklerini yitirmektedir. Bu tür ortamlara doymamış, doygun olmayan yada yarı doygun zemin denir (Önalp, 2013). Şekil 2.25'de doygun zemin olmayan zeminlerin yapısı ve zemin prizması gösterilmiştir.



Şekil 2.25 : Doygun olmayan zeminlerin yapısı (Freudlund ve Vanapalli, 2002)

Doygun zeminlerin kayma davranışı toplam gerilme ile boşluk suyu basıncı arasındaki farka eşit olan efektif gerilme ile doğrudan ilişkilidir. Boşluk suyu basıncı, doygun olan zeminlerde sıfır veya sıfırdan büyük değerler almaktadır.

Kayma mukavemeti ile ilgili zemin mekaniği laboratuvarlarında gerçekleştirilebilen pek çok deney yöntemi mevcuttur. Klasik zemin mekaniğinde doygun durumda gerçekleştirilen deneyler için standartlar mevcuttur. Doygun olmayan zeminlerde, boşluk suyu basıncı negatif değerler almaktadır. Boşluk hava basıncı ile boşluk suyu

basıncı arasındaki fark matrik emme olarak tanımlanmaktadır. Doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışları doygun zeminlerden farklı olarak net normal gerilme ve matrik emme olmak üzere iki değişkene bağlıdır (Freudlund ve Vanapalli, 2000).

2.5.1 Emme gerilmesi

Zeminlerde emme gerilmesi doygun olmayan zeminlerde, zeminin mühendislik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. 1900'lü yılların başlarında boşluk suyu basınçlarının sebep olduğu zemin emme gerilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Edlefsen ve Anderson (1943) bu kavramı zemin suyunun serbest enerjisi olarak tanımlamışlardır (Frendlund ve Rahardjo, 1993). Zemin emme gerilmesi, doygun olmayan zeminlerde mukavemet, deformasyon ve geçirgenlik gibi özellikleri etkilemektedir. Bu kavram en anlaşılır şekliyle zeminde tutulan suyun çıkabilmesi için uygulanması gereken enerji olarak ifade edilebilir (Richards, 1965). Zemin emme gerilmesi matrik emme ve ozmatik emme olarak isimlendirilen iki parametrenin toplamı olarak hesaplanır. Matrik emme ise boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanır. Matrik emme suyun kapiler hareketine bağlı olduğundan çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Yeraltı su seviyesindeki değişimler emme gerilmesini etkilemektedir. Toplam emme gerilmesini oluşturan bir diğer parametre ise ozmatik emmedir. Ozmatik emme, boşluk suyu içersinde bulunan eriyik tuzların saf su ile olan basınç farklı olarak açıklanır (Önalp, 2013). Pan ve arkadaşları (2010), zemin emmesinin su seviyesi üzerinde bulunan tüm zeminlerde bulunabileceğini söyleyerek emme gerilmesinin doymamış zeminlerin nem-gerilme durumunu açıklayan en önemli parametrelerden biri olduğunu belirtmişler ve numunelerin kalitesini değerlendirebilmek, doymamış zemin mekaniği uygulamalarının efektif ve gerçek gerilme değerlerini tahmin edebilmek için emmenin laboratuar ölçümlerinin çok faydalı olabileceğini söylemişlerdir. Çalışmalarında zemin emmesi ölçümlerinin direk veya dolaylı yollardan ölçümleri metotlarını araştırmışlardır. Direk emme ölçümleri tekniklerinin esaslarını eksen kaydırma tekniği, tansiyometre ve emme araştırmaları olduğunu dolaylı ölçümlerin ise 3 kategoriye bölündüğünü ve bunların matrik emme ölçüm teknikleri, geçişli emme ve toplam emme olduğunu belirtmişlerdir. Zemin emme ölçümü ekipmanlarının her birinin kendilerine ait avantajları ve sınırlamaları olduğunu söylemişlerdir (Öntürk, 2010).

Doymamış zemin deneylerinde matrik emme basıncının, ya doğrudan ölçüldüğünü ya da çeşitli yöntemlerle kontrol edilebildiğini söyleyen Kayadelen ve diğ. (2006), Matrik emmenin Eksen kaydırma yöntemi, osmotik yöntem ve bağıl nem yöntemi gibi farklı ölçüm yöntemleri bulunabildiğini söylemişlerdir. Eksen kaydırma tekniğini matrik emmeyi kontrol etmek veya ölçmek için ödometre deneylerinde, üç eksenli hücre kesme deneylerinde ve direk kesme deneylerinde kullanan Marinho ve arkadaşları (2008), eksen kaydırma tekniğinin numuneye giren ve çıkan su miktarını belirlerken kullanılabilmesi için bir prosedüre ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir (Öntürk, 2010). Çizelge 2.4'da matrik emme ve osmatik emmenin toplamı olarak ifade edilen emme gerilmesinin ölçüm yöntemleri özetlenmiştir.

Çizelge 2.4 : Emme gerilmesi ölçüm yöntemleri.

Ad		Yöntem
Direk emme ölçümü	Matrik emme	Eksen kaydırma Tansiyometre Emme sondası
	Matrik emme	Zamanlı etki alanı ölçümü Isı iletkenlik algılayıcı Filtre kağıdı bağlantılı Elektriksel iletkenlik algılayıcı
Dolaylı emme ölçümü	Osmatik emme	Sıkma tekniği
	Toplam emme	Psikometre Bağıl nem algılayıcı Soğutulmuş nem ölçer Filtre kağıdı bağlantısız

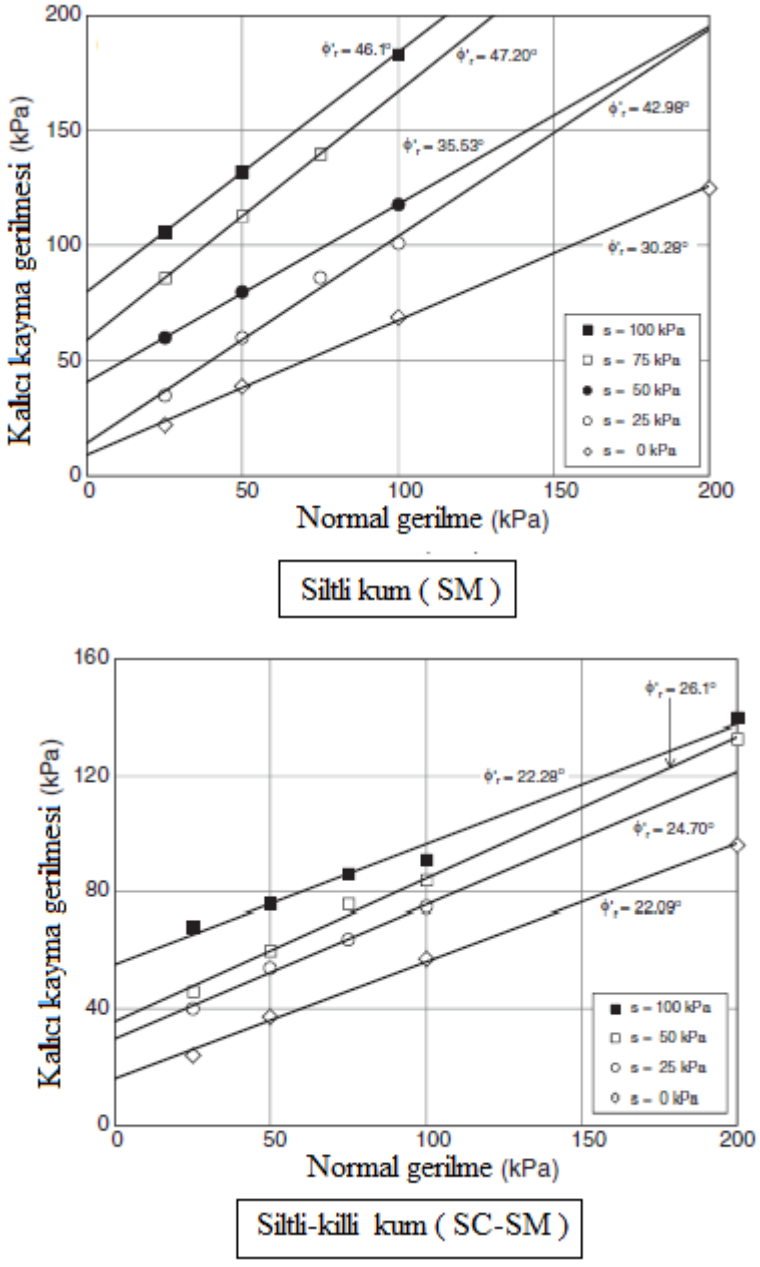
Bu çalışma kapsamında emme gerilmesi ölçümü yapılmadan doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişiminin incelenmesi amaçlandığından, emme gerilmesi ölçüm yöntemleri çizelge 2.4'de gösterilmiş, ölçüm yöntemlerinin detaylı olarak açıklanmasına gerek duyulmamıştır.

Yapılan çalışmada emme gerilmesi ölçülmediğinden, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılırken deney esnasındaki doygunluk oranı değişimi bilinemeyeceğinden dolayı numunelerin hazırlandıkları andaki koşulların korunmasına yönelik bir yöntem uygulanmıştır. Üç sıkıştırma enerjisinde hazırlanan numuneler, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basıncı altında yüklemeye maruz bırakılarak hazırlandığı koşullardaki doygunluk oranının korunması sağlanmıştır. Her enerji seviyesine ait optimum su muhtevasındaki doygunluk oranı bilinen numuneler bu yöntemle başlangıç koşullarındaki doygunluk oranları değiştirilmeden konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemi ve tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi kullanılarak, drenajlı koşullarda kesme işlemine tabi tutulmuştur.

Doygun olmayan zeminlerde emme gerilmesi olarak tanımlanan kavramdan dolayı, kayma mukavemeti doygun zeminlere göre daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bunun sebebi olarak doygun olmayan zeminlerde daneler arasındaki havanın bir vakum etkisi yaratmasına bağlı olarak zeminin mukavemetini arttırması gösterilebilir. Başka bir ifadeyle zeminin su muhtevasının azalmasına bağlı olarak (tamamen kurumama şartıyla) kayma mukavemeti değeri artış göstermektedir. Arazide doygun olmayan halde bulunun zeminlerin laboratuvarda doygun koşulda kayma mukavemetinin elde edilmesinin kolay olması yönüyle laboratuvarda deneyleri doygun durumda gerçekleştirmek arazideki koşullardan uzaklaşmaya sebep olmaktadır. Diğer taraftan arazideki doygunluğun dış etkenler aracılığı ile artış göstermesi, doygun olmayan duruma göre yapılan tasarımların güvenilirliğini azaltmaktadır.

Zeminlerde doygun olmayan durumda kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Fredlund, Rahardjo ve diğ. (1988) doygun olmayan durumda kalıcı kayma mukavemetini elde edebilmek amacıyla tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucun doygun durumda kesme yüzeyinin lineer olduğu, doygun olmayan durumda lineer olmayan kesme yüzeyi oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Her numune için doygun olmayan durumda istenilen kesme yüzeyinin sağlanamamasından dolayı, kalıcı kayma mukavemetini elde etmek için tekarlı kesme kutusu deneylerinden her numune için anlamlı sonuçlar elde edilemeyeceğini belirtmişlerdir.

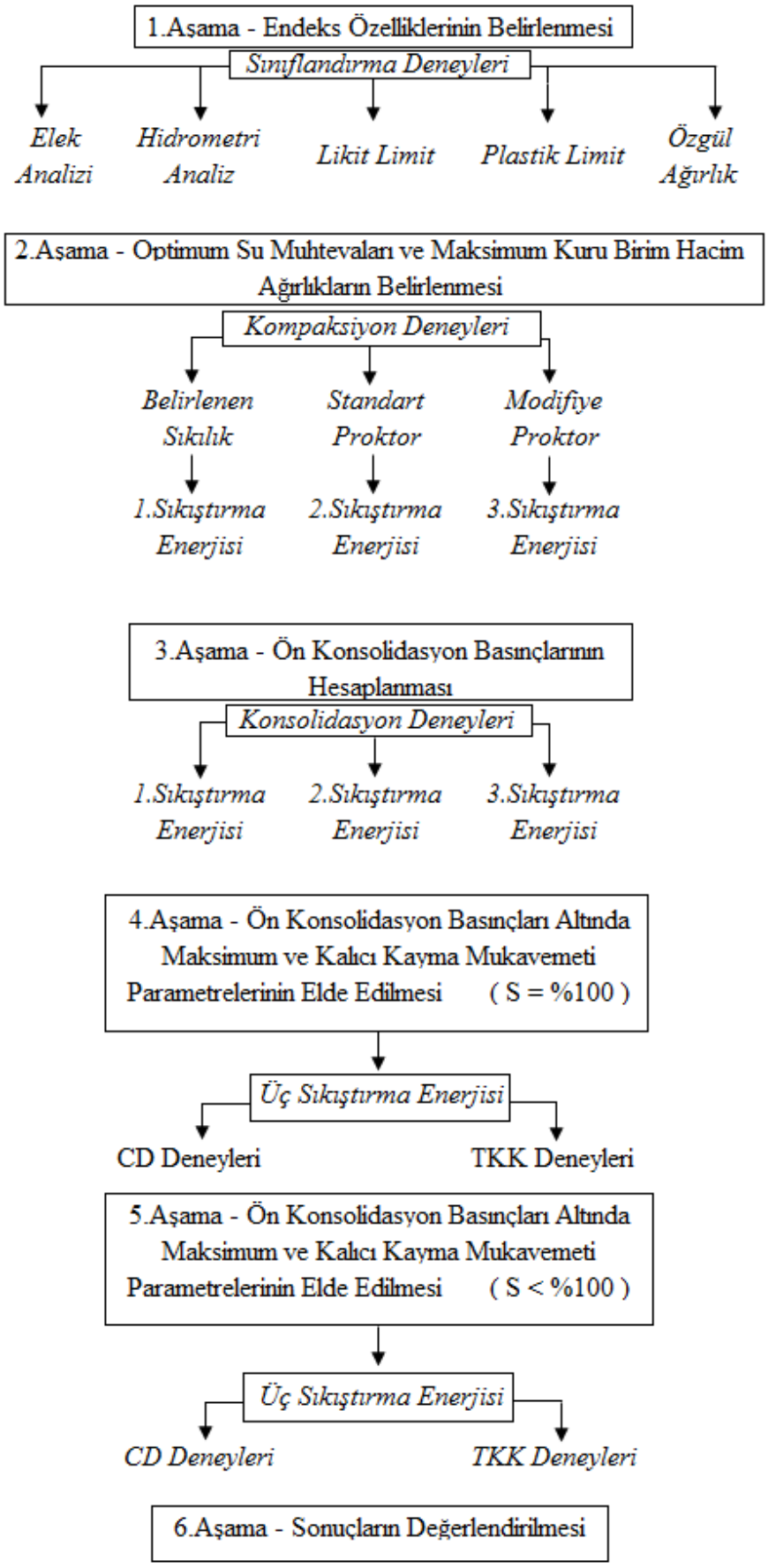
Hoyos, Velusa ve diğ. (2014) doygun olmayan zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin emme gerilmesi kontrollü halka kesme deney yöntemi ile elde edilmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda siltli kum (SM) numuneleri üzerinde emme kontrollü halka kesme deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açısının emme gerilmesine bağlı olarak artış gösterdiği, siltli-killi kum (SC-SM) numuneleri için kalıcı kayma mukavemeti açısının doygunluk değişiminden bağımsız olduğu sonucuna varmışlardır. Şekil 2.26'da iki numune için belirtilen durum gösterilmiştir.



Şekil 2.26 : SM ve SC-SM numuneleri için kalıcı kayma mukavemeti açısı-emme gerilmesi ilişkisi (Hoyos, Velusa ve diğ., 2014)

3. MALZEME VE YÖNTEM

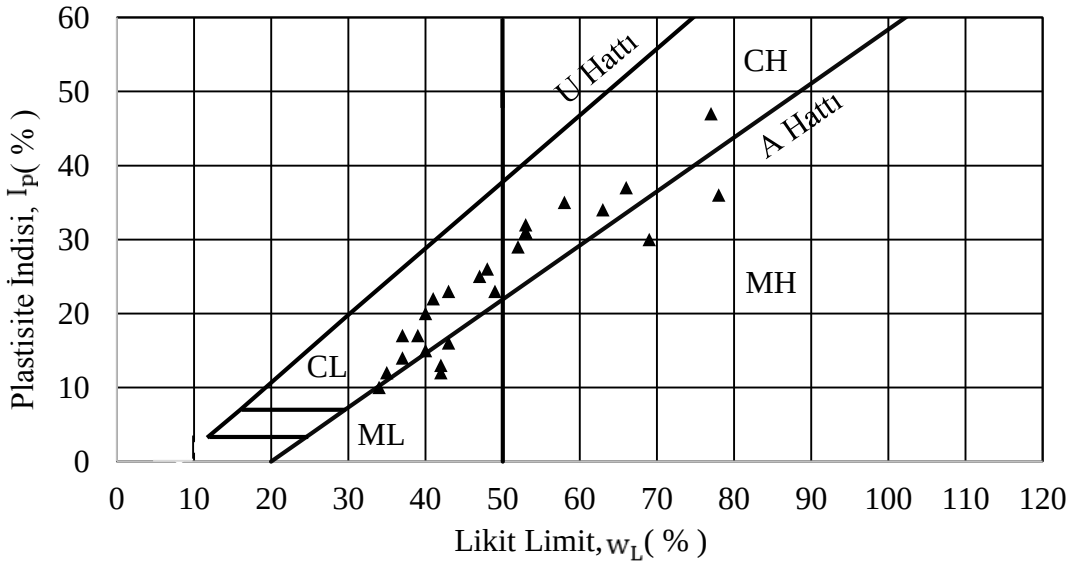
Bu çalışma kapsamında sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin suya doygun ve suya doygun olmayan durumda drenajlı koşullarda kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Her iki durum için zeminlerin kalıcı ve maksimum kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemi ve tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak suya doygun durum ve suya doygun olmayan durumda kayma mukavemeti parametrelerindeki değişim gözlenmiştir. Kullanılan numunelerin geoteknik özellikleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmiştir. 25 adet numune içerisinden istenilen özelliklere sahip numuneler seçilmiş, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numuneler laboratuvarda üç farklı sıkıştırma enerjisinde hazırlanmış, her enerji düzeyindeki ön konsolidasyon basınçları elde edilerek, bu basınçlar altında CD deneyleri gerçekleştirilmişir. Her numune için üç gerilme zarfı olması ile maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin daha hatasız tayin edilmesi amaçlanmıştır. Suya doygun durumda 4 numune için üç sıkıştırma enerjisinde gerçekleştirilen CD deneylerinden sonra, bu numuneler üzerinde aynı işlem bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sisteminde suya doyurma aşaması atlanarak gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç, numunelerin hazırlandıkları koşulların korunup, deney esnasında büzülme veya şişmeye izin vermeden, numunelerin hazırlandıkları koşullardaki doygunluk dereceleri değişmeden CD deneylerini gerçekleştirebilmektir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan numuneler suya doygun ve suya doygun olmayan durumlarda tekrarlı kesme kutusu deneyine (TKK) tabi tutulmuştur. Bu yolla iki deney yöntemi ile elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. 4 adet numune üzerinde üç sıkıştırma enerjisinde suya doygun durumda ve suya doygun olmayan durumda ortalama 5 çevrim olacak şekilde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. İki deney yöntemi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1'de deneysel çalışma akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Deneysel çalışma akış şeması

3.1 Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri

Üç eksenli basınç deneylerinde ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılmak üzere 25 adet numunenin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre analizi, likit limit deneyi, plastik limit deneyi ve piknometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre numunelerin dane çapı dağılımları, ince dane oranları, kil yüzdeleri, kıvam limitleri ve özgül ağırlıkları elde edilmiştir. Numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması Sisteminde (USCS) yer aldığı gruplar ve Casagrande plastisite tablosundaki yerleri belirlenmiştir. Kullanılan 25 adet numune içerisinden istenilen özelliklere sahip 4 adet numune YS1, YS2, YS3 ve YS4 kısaltmaları ile, diğer numuneler NO1, NO2, … , NO21 kısaltmaları ile gösterilmiştir. Şekil 3.2'de tüm numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleri, çizelge 3.1'de ise kıvam limitleri ve zemin sınıfları yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Tüm numunelerin Casagrande kartındaki yerleri

Şekil 3.1'de 25 adet numunenin plastisite kartındaki yerleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere bu numuneler 8 adet yüksek plastisiteli kil (CH), 11 adet düşük plastisiteli kil (CL), 2 adet yüksek plastisiteli silt (MH) ve 4 adet düşük plastisiteli siltten (ML) meydana gelmektedir. Bu numuneler içerisinden konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyine tabi tutulmak üzere seçilen YS1, YS2, YS3 ve YS4 olmak üzere 4 adet numune, 2 adet yüksek plastisiteli kil, 1 adet düşük plastisiteli kil ve 1 adet düşük plastisiteli silt olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1 : Tüm numunelerin kıvam limitleri ve zemin sınıfları.

Numune No	w_L (%)	I_p (%)	Zemin Sınıfı
NO1	52	29	CH
NO2	53	32	CH
NO3	47	25	CL
NO4	40	20	CL
NO5	58	35	CH
NO6	53	31	CH
NO7	53	31	CH
NO8	43	23	CL
YS1	77	47	CH
NO9	40	15	CL
NO10	48	26	CL
NO11	78	36	MH
YS2	42	12	ML
NO12	42	16	ML
NO13	42	13	ML
NO14	37	14	CL
NO15	49	23	CL
NO16	37	17	CL
NO17	39	17	CL
YS3	35	12	CL
NO18	34	10	ML
NO19	69	30	MH
NO20	41	22	CL
NO21	63	34	CH
YS4	66	37	CH

Çizelge 3.2'de YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin likit limit, plastisite indisi, ince dane oranı (İDO), kil yüzdesi (KY), özgül ağırlık ve zemin sınıfları gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin geoteknik özellikleri.

Numune No	w_L (%)	I_p (%)	İDO (%)	KY (%)	G_s	Zemin Sınıfı
YS1	77	47	100	8	2.68	CH
YS2	42	12	90	37	2.57	ML
YS3	35	12	86	7	2.59	CL
YS4	66	37	100	40	2.65	CH

Belirtildiği üzere 25 adet numune içerisinden istenilen özelliklere sahip 2 adet yüksek plastisiteli kil, 1 adet düşük plastisiteli kil ve 1 adet düşük plastisiteli silt olmak üzere 4 adet numune belirlenmiştir. Burada 4 adet numune seçilmesindeki etkenler; birçok numune benzer özellik gösterdiğinden dolayı benzer numuneler üzerinde yapılan deneylerle çeşitliliğin sağlanamaması, numuneler ön konsolidasyon basınçlarında yüklemeye maruz kalacağından dolayı ön konsolidasyon basıncı çok yüksek olan numunelerle üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinin yapılmasının mümkün olmaması, numunelerin bir kısmının hazırlanan koşullardaki suya doygunluk oranlarının %95'e çok yakın olması sebebiyle doygun olmayan durum ve doygun olan durum arasındaki farkın net olarak gözlenememesi olarak sıralanabilir. Bununla birlikte seçilen her numune için suya doygun durumda üç sıkıştırma enerjisinde ve suya doygun olmayan durumda üç sıkıştırma enerjisinde olmak üzere 6 adet konsolidasyonlu-drenajlı basınç deneyinin yapılmasının oldukça uzun sürmesi ve yapılan deneylerin bir kısmının bazı arıza ve teknik sebeplerden dolayı tekrarlanması belirtilen sayıda numune kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

3.2 Numune Hazırlama Yöntemi

Bu çalışma kapsamında kullanılan YS1, YS2, YS3 ve YS4 olmak üzere 4 adet numunenin endeks özellikleri belirlenmiştir. ASTM 40 nolu elekten elenmiş ve elek altında kalan kısımlar belirlenen bir sıkılıkta, standart proktor sıkılığında ve modifiye proktor sıkılığında kompaksiyon deneylerine tabi tutulup, her numunenin bu sıkılıklardaki optimum su muhtevası değerleri ve bu değere karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

Birinci aşamada, kullanılan numuneler standart proktor sıkıştırma enerjisinin yaklaşık 1/3'ü değerinde özel bir sıkılıkta deneye tabi tutulup, numunelerin bu özel sıkılıktaki optimum su muhtevası değeri ve bu değere karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. Bu işlemden sonra her numune belirlenen bu özel sıkılıkta optimum su muhtevası değerinde 152mm-116mm boyutlarında proktor kalıbında tekrar hazırlanıp, kalıptan çıkarılan numuneden 2 adet 50mm-100mm boyutlarında olacak şekilde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için numune alınmıştır. Bu sıkıştırma düzeyi, her numune için 1.sıkıştırma enerjisi olarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada, kullanılan numuneler standart proktor sıkılığında deneye tabi tutulup, numunelerin bu sıkılıktaki optimum su muhtevası değeri ve bu değere karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. Bu işlemden sonra her numune standart proktor sıkılığındaki optimum su muhtevası değerinde 152mm-116mm boyutlarında proktor kalıbında tekrar hazırlanıp, kalıptan çıkarılan numuneden 2 adet 50mm-100mm boyutlarında olacak şekilde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için numune alınmıştır. Standart proktor sıkılığı, her numune için 2.sıkıştırma enerjisi olarak belirlenmiştir.

Üçüncü aşamada, kullanılan numuneler modifiye proktor sıkılığında deneye tabi tutulup, numunelerin bu sıkılıktaki optimum su muhtevası değeri ve bu değere karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. Bu işlemden sonra her numune modifiye proktor sıkılığındaki optimum su muhtevası değerinde 152mm-116mm boyutlarında proktor kalıbında tekrar hazırlanıp, kalıptan çıkarılan numuneden 2 adet 50mm-100mm boyutlarında olacak şekilde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için numune alınmıştır. Modifiye proktor sıkılığı, her numune için 3.sıkıştırma enerjisi olarak belirlenmiştir.

Üç farklı sıkıştırma enerjisinde hazırlanan numuneler, her enerji seviyesi için konsolidasyon deneyine tabi tutulmuştur. Casagrande (1936) ve Da Silva (1970) yöntemleri yardımıyla numunelerin her enerji seviyesi için ön konsolidasyon basınçları hesaplanmıştır.

YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri üç sıkıştırma enerjisi için, hesaplanan ön konsolidasyon basınçları altında yüklenerek konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine tabi tutulup, %25 düşey deformasyon sınırına kadar kesme işlemi devam ettirilmiştir. Bu işlemin sonucunda üç sıkıştırma enerjisi için her numunenin suya doygun durumda, maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Seçilen 4 adet numune suya doygun durumda konsolidasonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine tabi tutulduktan sonra iki aşama olarak aynı şartlarda doygunluk aşaması atlanarak CD deneyine tabi tutulmuştur. Suya doygun durum için manuel üç eksenli basınç deney aleti kullanılıp, suya doygun olmayan durum için bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti kullanılmıştır. Ayrıca bu işlemler için laboratuvarda bulunan bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti ilk defa kullanılıp, kalibrasyonu yapılıp, düzenli deney yapılabilir hale getirilmiştir.

Bu yöntemin uygulanmasındaki temel amaç, numuneler CD deneyine tabi tutulurken numunelerin üç sıkıştırma enerjisinde hazırlandıkları andaki koşulların korunması sağlanarak deney boyunca doygunluk oranının değişmemesinin gerçekleştirilmesidir.

Bu çalışmanın amacı, sıkıştırılmış ince daneli zeminlerde maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin suya doygun ve suya doygun olmayan durumda nasıl değiştiğinin incelenmesi olduğundan izlenen yöntem bu amacın gerçekleştirilmesine yöneliktir. Numunelerin üç farklı enerji seviyesinde hazırlanma sebebi, Mohr dairelerinin üç gerilme zarfı olacak şekilde çizilmesiyle elde edilen sonuçların hata payını azaltmaktır.

Burada çalışmanın en önemli noktası, numunelerin suya doygun olmayan durumda kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilebilmesi için deney esnasında numunelerin doygunluk oranlarının değişmemesi olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada her numune üç sıkıştırma enerjisinde her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basıncı altında yüklemeye maruz bırakılarak, numunelerin yük altında artı veya eksi yönde deformasyona uğramasına izin verilmeyerek doygunluk oranlarının değişmemesi sağlanmıştır. Numuneler her enerji seviyesi için ön konsolidasyon basıncının üzerinde bir değerde yüklemeye maruz bırakılsaydı, numune deney esnasında büzülmeye uğrayacağından boşluk oranı ve buna bağlı olarak doygunluk oranı değişmiş olacaktı. Tersi durumda ise, numuneler her enerji seviyesi için ön konsolidasyon basıncının altında bir değerde yükleme maruz bırakılsaydı, numune deney esnasında şişmeye uğrayacağından yine boşluk oranı ve doygunluk oranı sabit kalmayacaktı. Ayrıca numunelerin istenilen doygunluk oranlarında veya istenilen ön konsolidasyon basınçlarında hazırlanması çok olası değildir. Örnek olarak bir numuneyi 100kPa ön konsolidasyon basıncında ve %80 doygunluk oranında hazırlamak olası değildir. Burada sıkıştırma enerjisi sabit tutulup, o enerji seviyesindeki doygunluk oranının ve ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi ve bu şartlarda deneye tabi tutulması mantıklı olmaktadır.

Numunelerin suya doygun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilebilmesi için üç farklı sıkıştırma enerjisinde, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basıncı altında bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti ile doygunluk aşaması atlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Buradaki temel amaç, numunelerin hazırlandıkları andaki koşullar korunması olup, numunelerin hazırlandıkları andaki doygunluk oranları değişmeden deneye tutulmasıdır. Böylelikle suya doygun ve suya doygun olmayan durumlar arasındaki farkın incelenme imkanı sağlanmıştır.

Üç sıkıştırma enerjisinde hazırlanan ve her enerji seviyesi için ön konsolidasyon basınçları ve bu enerji seviyelerindeki tabi haldeki doygunluk oranları elde edilen 4 adet numune, suya doygun durumda tekrarlı kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Böylelikle aynı numuneler için aynı şartlarda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları arasındaki fark incelenmiştir. 4 adet numune için suya doygun olmayan durumda da tekrarlı kesme kutusu deneyi denenmiş, elde edilen sonuçların mühendislik açıdan anlam ifade etmemesi nedeniyle deneyler sonlandırılmıştır. Bu durum 'Deneysel Sonuçlar' bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır. Suya doygun olmayan durumda tekrarlı kesme kutusu deney sonuçların anlamlı olmamasının temel sebebi istenilen kesme yüzeyinin sağlanamamış olmasıdır.

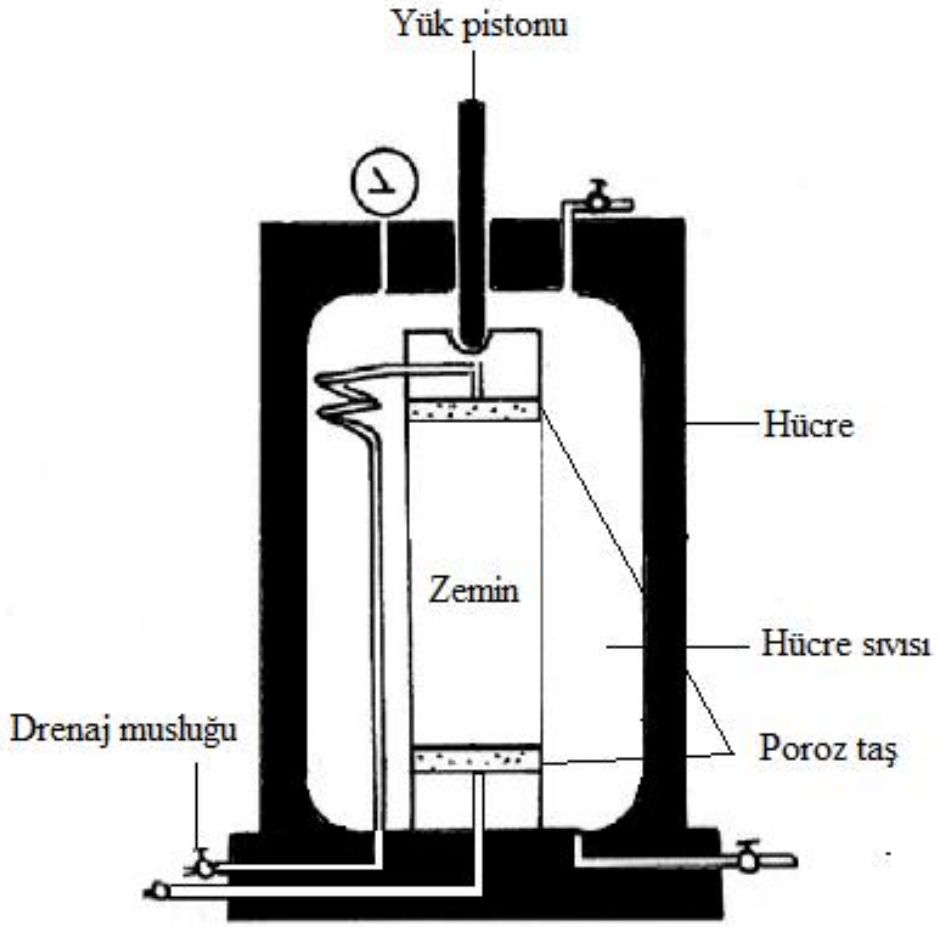
3.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi

1930'larda Casagrande direkt kesme deneyinde karşı karşıya kalınan dezavantajları ortadan kaldırma amacıyla silindirik numuneler üzerinde basınç deneyleri konusunda araştırmalara başlamıştır. Bu deney metodu, kesme kutusu deney yöntemine göre çok daha karmaşık olmasına rağmen, laboratuvarda kayma mukavemetinin tayin edilmesinde kullanılan en gelişmiş deney metodu olarak bilinmektedir.

Üç eksenli deneyde arazideki yükleme ve drenaj koşullarının laboratuvarda gerçeğe en yakın şekilde modellenebilmesi bunun en önemli sebebidir. Böylelikle kayma mukavemeti parametreleri gerçeğe yakın olarak belirlenebilir. Üç eksenli basınç deneyi, yükseklik/çap oranı 2 olan, yaygın olarak 38.1mm, araştırma veya özel amaçla 50 veya 100mm, çaplı numuneler üzerinde yapılır. Yükseklik/çap oranı 2'den büyük numunelerde burkulma, 2'den küçük numunelerde ise kesme yüzeyinin başlıkla sınırlandırılması sorunu ortaya çıkar (Tan, 2013).

Zemin numunesi geçirimsiz lastik kılıf/membran içindedir. Membran, hücre sıvısı (su) ile boşluk suyunu ayırır. Numunenin alt ve üstünde poroz taş, filtre bulunur. Numune basınca dayanıklı bir şeffaf hücre içerisine yerleştirilir, hücre sıvısı olarak

damıtık su kullanılır. Su, numuneye her yönden hücre basıncını (σ_3) uygular. Hücre tabanında dışarıdan sabit hücre basıncı bağlantısı, numune tabanına ve üst başlığına isteğe göre drenaj yada boşluk suyu basıncı ölçme bağlantısı vardır. Konsolidasyonlu deney yapılmak istendiğinde drenaj musluğu açılır, buraya bir hacim ölçer bağlanarak drene olan boşluk suyu hacmi ölçülür. Konsolidasyonun tamamlandığı çıkan su hacminin sabit kalmasından anlaşılır. Musluk kapatılır, istenirse aynı kanaldan deney sırasında boşluk suyu basıncı ölçülebilir. Drenajlı deney yapılıyorsa drenaj çıkışı deney boyunca açık bırakılır. Önceden belirlenen hücre basıncı altında, hücre tabanı veya başlığının düşey yönde, sabit hızda hareket ettirilmesi ile numune kırılıncaya kadar yükleme yapılır. Deney boyunca zemin numunesinin gösterdiği direnç bir yük halkası vasıtası ile deviatör gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) olarak, numunenin boy değişimi ise bir düşey deplasman saati ile ölçülür ve kaydedilir (Tan, 2013). Şekil 3.3'de üç eksenli basınç deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Üç eksenli basınç deney düzeneği

Deney sonunda deviatör gerilme-deformasyon eğrisi çizilir, maksimum değer kırılma gerilmesini verir. Teorik olarak kırılmanın meydana geldiği düzlemin normalinin, σ_1 asal gerilme düzleminin normali ile $\alpha = 45 + \phi/2$ açısı yapması beklenir.

Konsolidasyonlu-drenajlı (CD) basınç deneyinde zemin numunesi ilk olarak hücre içinde bulunan etrafındaki sıvının uyguladığı basınca (σ_3) maruz kalır. Bu basınç uygulandığı anda numunenin boşluk suyu basıncı (u) artar. Boşluk suyu basıncındaki artış boyutsuz parametre formunda tanımlanabilir. Skempton (1954) tarafından boşluk basıncı parametresi "B" olarak tanımlanır ve doygun zeminler için 1'dir (Das, 2002).

CD deneyinde numune öngörülen basınçta konsolide edilmekte ve sonra da drenaj koşulları tümüyle sağlanarak uygulanan kesme gerilmelerinin boşluk suyu basıncını arttırmaması için numune yeterince düşük hızda kesilmektedir. Böylece elde edilecek parametreler sadece efektif gerilme türünden olacaktır. Tabakalar halinde yavaş yükselen dolgu altında yumuşak kilin kayma mukavemetinin belirlenmesi, sürekli sızıntı kuvvetleri etkisindeki barajların kil çekirdeğinin kayma mukavemetinin elde edilmesi ve kilde kazı veya doğal yamaçta drenajlı kayma mukavemetinin bulunması gibi problemlerde kullanılabilmektedir (Önalp, 2013). Şekil 3.4'de üç eksenli basınç deney aleti görülmektedir.



Şekil 3.4 : Üç eksenli basınç deney aleti (İTÜ)

3.3.1 CD deneyleri için numune hazırlanması ve deneylerin yapılışı

Belirlenen bir sıkılıkta (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor sıkılığında (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor sıkılığında (3.sıkıştırma enerjisi) olmak üzere üç enerji seviyesinde 152mm-116mm boyutlarındaki proktor kalıbında hazırlanan YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri, her numuneden 2 adet 50mm-100mm silindirik numune olacak şekilde üç eksenli basınç deneyi için hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler su muhtevasında bir değişiklik olmaması amacıyla streç filmle kaplanıp, nem odasında muhafaza edilmiştir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile öncelikle suya doygun durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek amacıyla numuneler her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basınçları altında konsolidasyon aşamasına bırakılmıştır. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra doygunluk aşamasına geçilmiş, %95 ve üzeri doygunluk seviyesine ulaşıldıktan sonra numuneler suya doygun hale gelmiş, kesme aşamasına geçilmiştir. 0.005mm/dk sabit hızla %25 düşey deformasyon sınırına kadar kesme işlemi devam ettirilmiş, her enerji seviyesi için elde edilen deviatör gerilme-deformasyon eğrileri yardımıyla maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti değerleri için Mohr daireleri çizilip, suya doygun durumdaki kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir.

Deney esnasında deney düzeneğindeki az miktarda bir sızıntının dahi sonuçları olumsuz etkileyeceği göz önüne alınarak, bağlantı yerleri ve boşluk suyu basıncı kontrol edilmiştir. Ayrıca üç eksenli basınç deneylerinde karşılaşılan problemlerin önemli bir kısmı membrandaki deliklerden kaynaklı sızıntılardan meydana geldiğinden, membranlarda delik olup olmadığı kontrol edilmiştir. Hücre alt başlığında zamana bağlı tıkanıklıkların deney öncesinde uygulanan basınçla temizlenmesi, hücre alt başlığından numune üst başlığına bağlanan ters basınç hattının tıkanıklığının varsa giderilmesi sağlanmıştır.

Hazırlanan 50mm-100mm boyutlarındaki silindirik numuneler poroz kağıtları ile üç kanat olacak şekilde sarılmıştır. Numunelerin üst ve alt kısımlarına poroz kağıdı yerleştirildikten sonra sıcak su içerisinde bekletilmiş ve gözeneklerindeki tıkanıklıklar giderilmiş poroz taşları üst ve alt kısıma yerleştirilmiştir.

Numunenin üst kısmına üst başlık yerleştirildikten sonra numune esnek membran kılıf içerisine yerleştirilmiştir. Numune bu haliyle deney düzeneğine konmadan önce

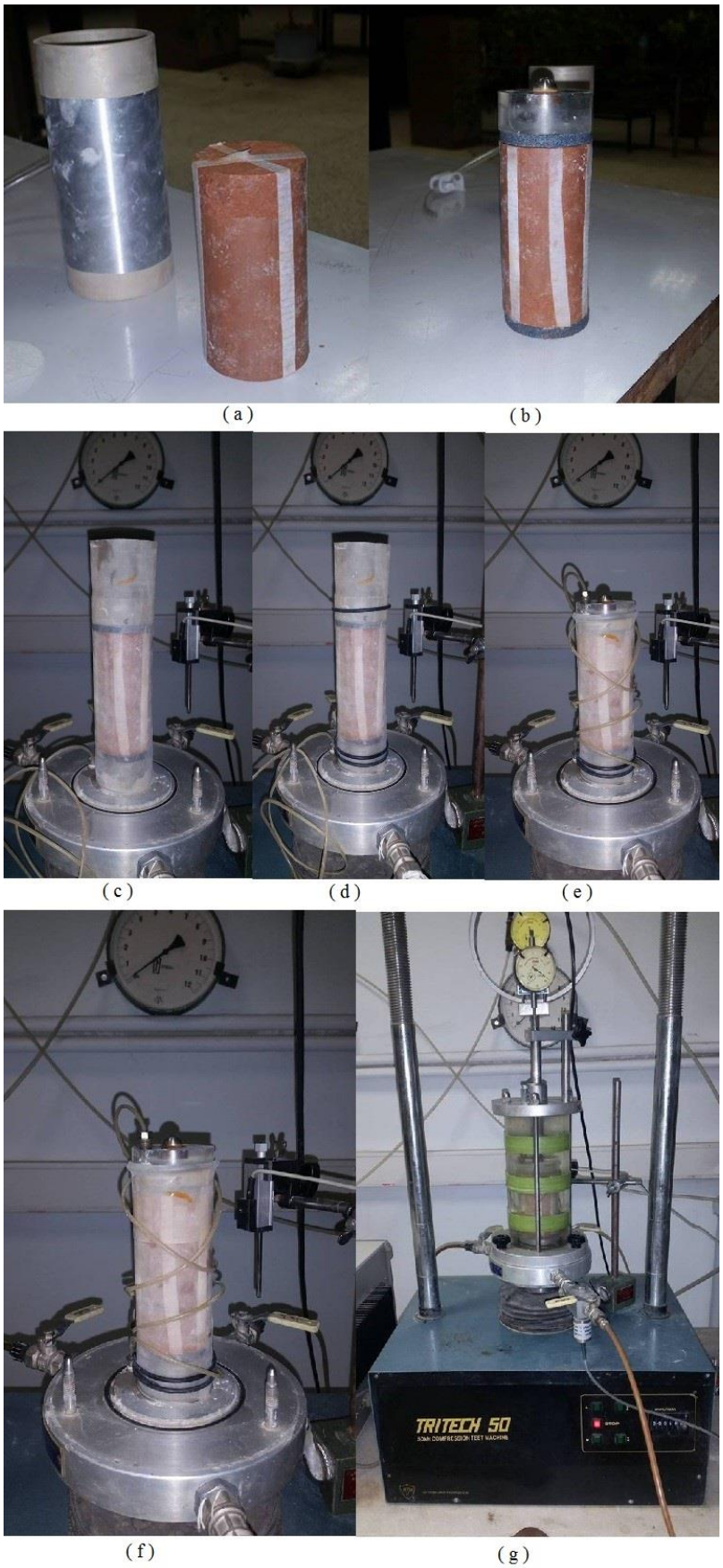
hava boşluğu kalmasına engel olmak amacıyla ters basınç hatları suya doygun hale getirilip, numune yerleştirilmiştir. İki adet alt kısma, iki veya bir adet üst kısma gelecek şekilde o ringler yerleştirilerek geçirimsizlik sağlanmıştır. Sonraki aşamada hücre suyla doldurulup ters basınç uygulanmıştır. Hücre basıncı ile ters basınç arasındaki fark numunelerin kesileceği ön konsolidasyon basıncı kadar olacak şekilde ayarlanmıştır. Konsolidasyonun tamamlandığını ve boşluk suyu basıncının sönümlendiğini anlamak için drenaj vanaları açık ve kapalı duruma getirildiğinde, numune hücresinin alt başlığına bağlanan boşluk suyu basıncı ölçme aletindeki (transdüser) değerin değişmemesi gerekmektedir. Numunelerin ortalama konsolidasyon süreleri iki gün, ortalama suya doygun hale gelme süreleri ortalama dört gün olarak gözlenmiştir. Doygunluk kontrolü için drenajlar kapalı iken çevre basıncında yapılan artıma karşılık boşluk suyu basıncında da eşdeğer artım gözlemlenmelidir.

$$B = \frac{\Delta_u}{\Delta_{\sigma_3}} = \frac{u_1 - u_0}{\Delta_{\sigma_3}} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Bağıntısı yardımıyla Skempton'un 'B' parametresi hesaplanmıştır. Doygunluk oranı %95 (0.95) ve üstü durum suya doygun hal olarak kabul edilmiştir.

Bu işlemden sonra kesme aşamasına geçilmiş, 0.005mm/dk sabit hızla %25 düşey deformasyon sınırına kadar kesme işlemi devam ettirilmiştir. Kesme süresi belirtilen hızla yaklaşık olarak dört gün sürmüştür. Ortalama olarak bir konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinin süresi on gün sürmektedir. Her numune için suya doygun durumda üç deney yapılması için gereken süre toplamda otuz gün olmaktadır.

İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Labaratuvarı'nda bulunan manuel üç eksenli basınç deney aletinde 750kPa ve üstü değerlerde deney yapma imkanı olmadığından, hazırlanan enerji seviyelerinde ön konsolidasyon basıncı 750kPa üzerinde olan numuneler konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine tabi tutulamamıştır. Belirtildiği üzere 4 adet numune seçilmesindeki etkenler bir tanesini bu durum oluşturmaktadır. Deney sürelerinin uzun olması, deney esnasında karşılaşılan beklenmedik teknik aksaklıklar sebebiyle çok sayıda numune ile çalışma imkanı bulunamadığından numune sayısının seçilmesindeki en önemli sebeplerden biri olarak bu durum gösterilebilir. Şekil 3.5'de üç eksenli basınç deneyi numune kurulum aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.5 : Üç eksenli basınç deneyi kurulum aşamaları

Şekil 3.4'de hazırlanan numuneye poroz kağıtlarının sarılması (a) , filtre kağıtları, poroz taşları ve üst başlığın yerleştirilmesi (b), membran içine yerleştirilmesi (c), 'O' ringlerin konulması (d), ters basınç hortumunun üst başlığa bağlanması (e) ve (f), hücrenin suyla doldurulması (g) görülmektedir. Bu işlemlerden sonra hücre basıncı ve ters basınç uygulanarak deneye başlanır. Konsolidasyon ve doygunluk işlemi tamamlandıktan sonra kesme aşamasına geçilir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde, belirli bir düşey deformasyona karşılık gelen yük saatinden düşey yük değerleri (P) ve boşluk suyu basıncı transdüserinden boşluk suyu basıncı değerleri okunmuştur (u). Düşey yük ve deformasyon saatleri 1/100 hassasiyetindedir. Düşey yük saatinden okunan değerler ring katsayısı ile çarpılıp kuvvet birimine çevrildikten sonra düşey yük artışı elde edilmiş olur. Boşluk suyu basıncı transdüserinden elde edilen değerler ile boşluk suyu basıncı çarpanı çarpılıp boşluk suyu basıncı elde edilir. Drenajlı deney yapıldığından boşluk suyu basıncında değişim oluşmamaktadır.

Deviatör gerilme ve düzeltilmiş alan;

$$\Delta\sigma = \frac{P}{A_i} \quad \text{ve} \quad A_i = A_0 * \frac{\left(1-\frac{\Delta V}{V_0}\right)}{\left(1-\frac{\varepsilon}{100}\right)} \qquad \textbf{(3.2)}$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanır. Burada 'Δσ' deviatör gerilme değeri, 'P' düşey deplasmana denk gelen düşey kuvvet, 'Ai' düzeltilmiş alan, 'A_0' numunenin başlangıç kesit alanı, 'ε' eksenel birim boy değişimi ve 'ΔV' hacmi değişimi, 'V_0' numunenin ilk hacmidir. Çalışmada kullanılan üç eksenli deney aletlerinde hacim değişimi ölçülemediği için alan düzeltmesinde yalnızca eksenel birim boy değişimi dikkate alınmıştır.

Numune üzerine uygulanan asal düşey gerilmeyi ise;

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma \qquad \textbf{(3.3)}$$

bağıntısında görüldüğü üzere deviatör gerilme ve hücre basıncının toplanmasıyla bulunur.

Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerde ilave boşluk suyu basıncı oluşmayacak kadar düşük bir hızda kesme gerçekleştiğinden deney sonucunda elde edilen gerilmeler efektif gerilme cinsinden olup, toplam gerilme ve efektif gerilmeler birbirine eşittir.

3.3.2 Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi

Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi, üç eksenli basınç deney aşamalarının bilgisayarda hazırlanmış bir yazılım sayesinde gerçekleştirilmesi ve sonuçların otomatik olarak kaydedilmesi şeklinde oluşan bir sistemdir. Bu deney sisteminde hazırlanan numuneler manuel üç eksenli basınç deney sistemine benzer şekilde deney başlangıcına hazır hale getirildikten sonra deney aşamaları ile ilgili gerekli bilgiler bilgisayar yazılımına tanımlanarak istenilen koşullarda deneyin gerçekleştirilmesi sağlanır. Deney süresi boyunca dışarıdan müdahale gerektirmeyen bu sistem, deney sonlandıktan sonra otomatik olarak verileri kaydedip sonuçları vermektedir. Şekil 3.6'da bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti görülmektedir.

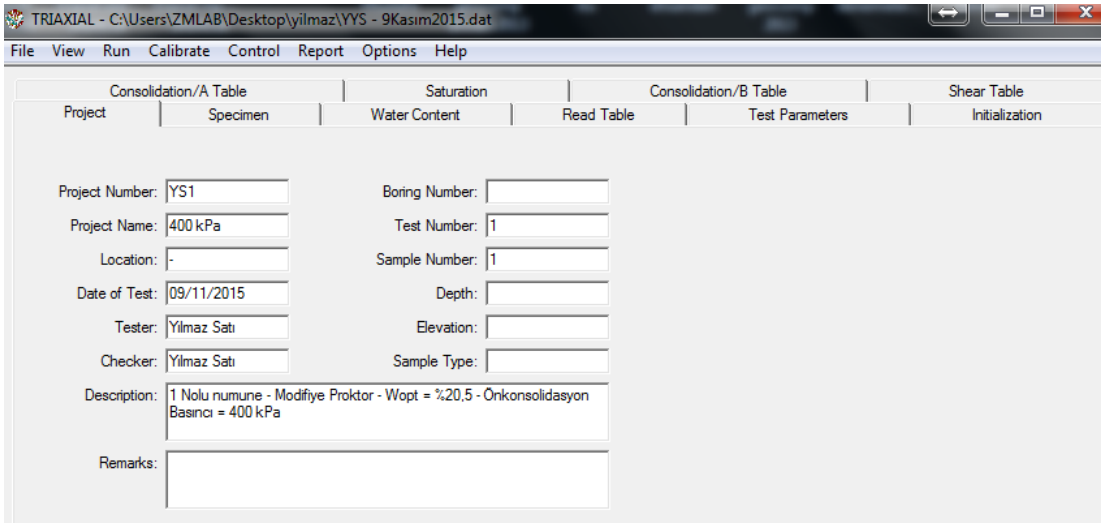


Şekil 3.6 : Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi (İTÜ)

Şekil 3.5'de görüldüğü üzere bu deney aletinde hücre basıncı ve ters basıncı uygulayabilmek amaçlı 2 adet 'Flow Track' ünitesi ve kesme işleminin gerçekleştirildiği 'Load Track' ünitesi mevcuttur. Bu üniteler bilgisayara bağlı olup, bilgisayar yazılımı ile kontrol edilmektedir.

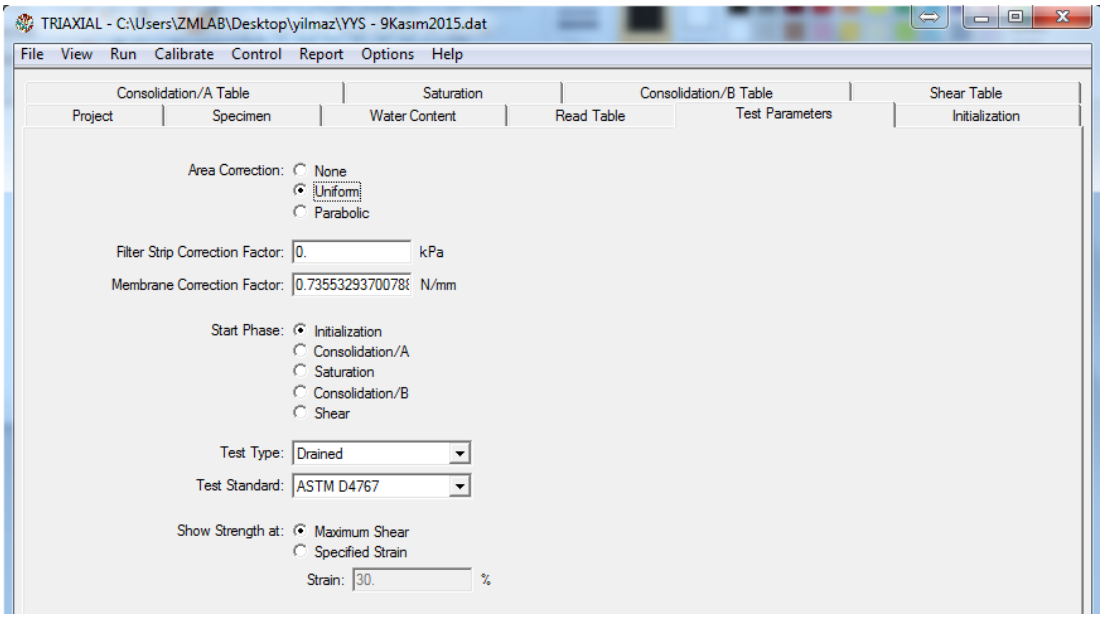
İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Labaratuvarı'nda bulunan bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi ilk defa bu çalışma kapsamında kullanılmış olup, deney aletinin kullanımına ilişkin bir talimatname hazırlanmıştır (Ek A).

İlk aşamada kalibrasyon kontrolü için farklı numunelerle deneme amaçlı CD ve CU deneyleri gerçekleştirilmiş, deney aletinden sağlıklı sonuçlar elde edildiğine kanaat getirildikten sonra bu çalışma kapsamında kullanılan 4 adet numune üç sıkıştırma enerjisinde, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basınçlarında, suya doygun olmayan durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney sisteminin bilgisayar yazılımının amaca uygun şekilde kullanımı ile ilgili bir klavuz hazırlanmıştır. YS1 numunesi üzerinde manuel üç eksenli basınç deney aleti ve bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti ile tamamen aynı şartlarda CD deneyleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçların aynı olduğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar 'Deneysel Çalışma ve Sonuçlar' bölümünde irdelenmiştir. Temelde bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi bilgisayar yazılımı ile beş aşamaya ayrılmıştır. Şekil 3.7'de deney sisteminin yazılımına deneye ait bilgilerin tanımlanması gösterilmiştir.



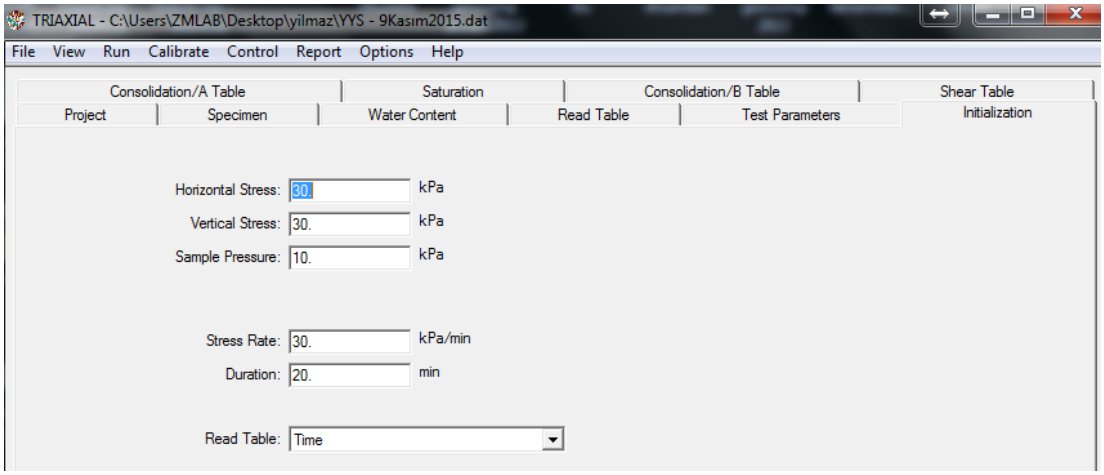
Şekil 3.7 : Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deneyi için numuneye ait bilgilerin girilmesi

Şekil 3.7'de görüldüğü üzere numune adının, deney tarihinin, deneyi yapanın bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. 'Description' (açıklama) kısmına yapılacak deneye ait bilgiler daha detaylı olarak girilebilir.. Birinci aşama başlangıç aşaması olup, bu aşamada deney sisteminde herhangi bir sızıntı olup olmadığının deneye başlamadan farkedilebilmesi amacıyla önceden belirlenen küçük hücre basıncı ve ters basınçlarla yaklaşık bir saat gibi bir süre zarfında sızıntı kontrolünün yapılamasını amaçlamaktadır. Şekil 3.8'de deney parametrelerinin yazılıma girilmesi, şekil 3.9'da başlangıç aşaması gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : Deneye ait parametrelerinin girilmesi

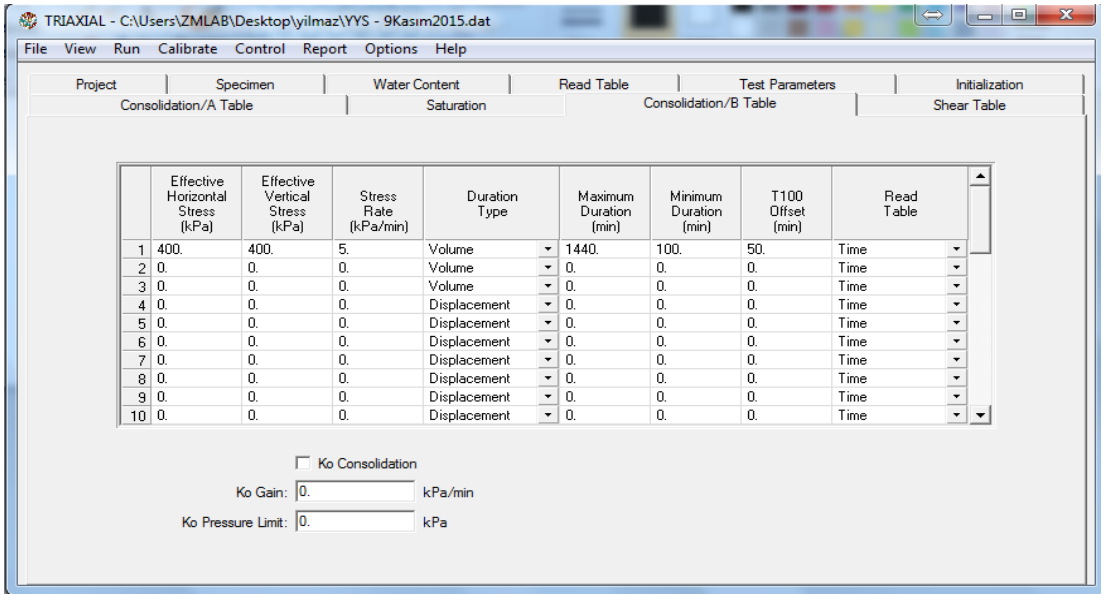
Şekil 3.8'de görüldüğü gibi alan düzeltmesi ve membran düzeltme faktörü gibi kısımlar yazılıma tanıtılır. Deneyin drenajlı veya drenajsız koşullardan hangisinde gerçekleştirileceği belirtilir ve kullanılacak deney standardı seçilir.



Şekil 3.9 : Başlangıç aşaması

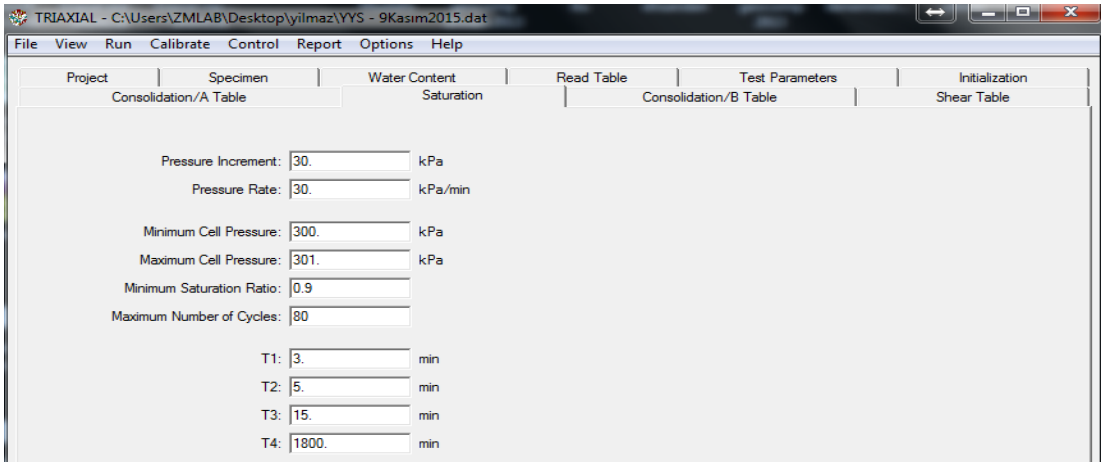
Şekil 3.9'da görüldüğü üzere başlangıç aşamasında temel amaç, deneyde herhangi bir sızıntının olup olmadığının tespit edilmesidir. Bu amaçla 30 kPa gibi bir hücre basıncı ve 10 kPa gibi bir ters basınç değeri belirlenen süre boyunca (duration kısmına girilecek süre) numune üzerine uygulanır ve basınçların sabit kalması durumunda sistemde sızıntı olmadığı sonucuna varılır. Bu aşamadan sonra iki aşama olarak doygunluk öncesi konsolidasyon aşaması (Consolidation A Table) mevcuttur. Doygunluk öncesinde konsolidasyonun tamamlanması istenirse bu aşamaya ait

bilgilerin girilmesi gerekmektedir. Konsolidasyon aşamasına doygunluk tamamlandıktan sonra geçilmesi isteniyorsa bu kısım boş bırakılır, 'Consolidation B Table' kısmı doldurulur. Şekil 3.10'da konsolidasyon aşaması görülmektedir.



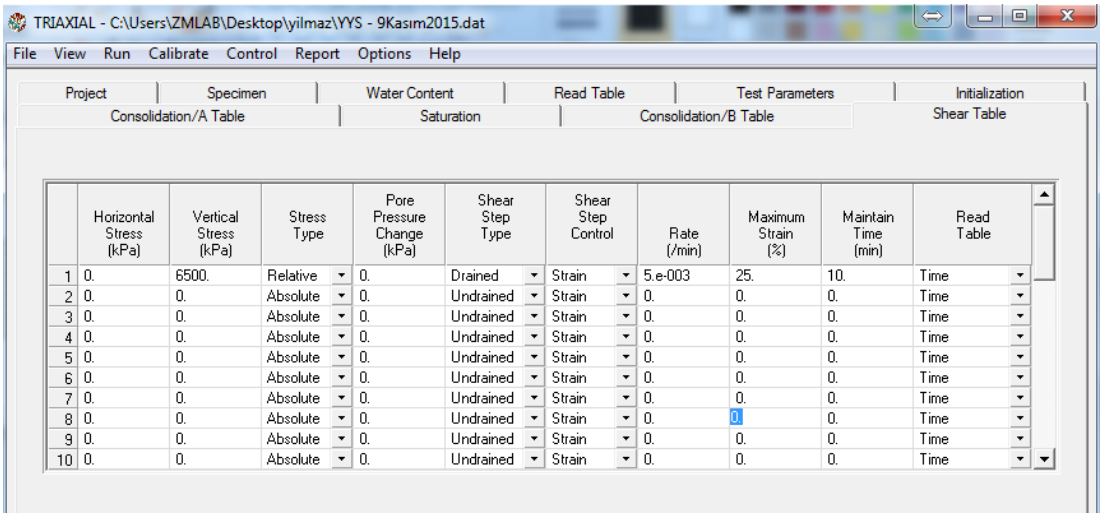
Şekil 3.10 : Konsolidasyon aşaması

Şekil 3.10'da 'Effective horizontal stress' ve 'Effective vertical stress' kısımlarına konsolide edilmek istenen basınç değeri kPa cinsinden girilir. 'Minimum duration' kısmında belirtilen minimum süreden önce konsolidasyon aşaması tamamlansa dahi süre tamamlanmadan diğer aşamaya geçilmemektedir. 'Maximum duration' kısmında belirtilen sürede zarfında konsolidasyon tamamlanmamışsa aşama sonlandırılacaktır. Üçüncü olarak doygunluk aşamasında numunenin başlangıç doygunluk oranı ve zamana bağlı doygunluk değişimi gösterilmektedir. Şekil 3.11'de doygunluk aşaması görülmektedir.



Şekil 3.11 : Doygunluk aşaması

Şekil 3.11'de doygunluk aşamasına ait bilgilerin girilmesi görülmektedir. 'Minimum saturation ratio' kısmına girilen doygunluk oranına ulaşıldıktan sonra aşama otomatik olarak sonlandırılır. Belirtilen basınçlara ulaşıldığında doygunluk tamamlanmamışsa, döngüye girilir. 'T4' kısmında belirtilen süre boyunca doygunluk tamamlanmamışsa diğer aşamaya geçilir. Dördüncü aşama doygunluk sonrası konsolidasyon aşamasıdır. Karekök-zaman yöntemine göre numunenin konsolide olması sonucunda tamamlanır. Son aşama kesme aşaması olup, belirlenen hızda, belirlenen deformasyon seviyesine kadar kesme gerçekleştirilir. Şekil 3.12'de kesme aşaması görülmektedir.



	Horizontal Stress (kPa)	Vertical Stress (kPa)	Stress Type	Pore Pressure Change (kPa)	Shear Step Type	Shear Step Control	Rate (/min)	Maximum Strain (%)	Maintain Time (min)	Read Table
1	0.	6500.	Relative	0.	Drained	Strain	5.e-003	25.	10.	Time
2	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
3	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
4	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
5	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
6	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
7	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
8	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0	0.	Time
9	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
10	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time

Şekil 3.12 : Kesme aşaması

Şekil 3.12'de görüldüğü üzere 'Vertical stress' kısmına yük pistonun kapasitesini aşmayacak bir basınç değeri girilir (6500 kPa). 'Rate' kısmında kesme hızı belirtildikten sonra 'Maximum strain' kısmında deneyin sonlandırılacağı düşey deformasyon sınırı tanımlanır. Bu aşamalar tamamlandıktan sonra deneye başlanır ve yazılım girilen bilgiler doğrultusunda deneyi devam ettirir ve sonlandırır.

Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemine kablosuz internete erişim aparatı eklenmiş, bir bilgisayar programı yardımıyla uzaktan erişime açık hale getirilmiştir. Bu şekilde başka bilgisayarlar üzerinden deneyin hangi aşamada olduğu ve ne şekilde devam ettiği izlenebilmekte, istenildiği takdirde deney sonlandırılabilmektedir. Deney esnasından karşılaşılacak herhangi bir probleme uzaktan müdahale imkanı sağlandığından, deney sistemi daha kullanışlı bir hale getirilmiştir.

Bu deney sistemi yardımıyla üç sıkıştırma enerjisinde hazırlanan 50mm-100mm boyuntlarındaki silindirik üç eksenli basınç deney numuneleri üzerinde, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basınçları altında yüklemeye tabi tutularak, doygunluk aşaması atlanarak (numunelerin hazırlandıkları koşullardaki doğal doygunluk oranları ile) suya doygun olmayan durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, suya doygun durumda diğer üç eksenli basınç deney aleti ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3.4 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi

Bu çalışma kapsamında üç eksenli basınç deney yöntemi ve tekrarlı kesme kutusu deney yöntemlerinin suya doygun ve suya doygun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini nasıl etkilediğini gözlemlemek amacıyla YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır.

Kesme kutusu deneyi, numune hazırlama bakımından kolaylık sağlaması, deneyin üç eksenli basınç deneyine göre kolay olması ve ileri deformasyon seviyelerine gidilebilmesi gibi sebeplerle özellikle kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesinde en çok tercih edilen deney yöntemidir. Bu deney kayma mukavemeti parametrelerinin ölçümünde kullanılmış bir metoddur. Kare veya daire kesitli numune kesme kutusunun içine yerleştirilir ve zeminin arazide almakta olduğu gerilmeler dolayında bir normal gerilme (σ_n) ile başlayarak konsolidasyon yüküne eşdeğer normal yüke tabi tutulur. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra uygulanan kesme kuvveti ile gereken hızda kesilir. Bu sırada alınan ölçümler yatay hareket, düşey hareketler ve kesme kuvvetidir.

Bu deneyin en sakıncalı yanı, zorlanan kayma yüzeyi ile eğer varsa, numunede mevcut en zayıf kayma yüzeyinin çakışmama olasılığının yüksek olmasıdır. Ayrıca kesme hareketi kısıtlı olduğundan zeminin kalıcı direncinin ölçülmesi için kutunun deneyin durdurulmasıyla geriye alınma zorunluluğu soruna sebebiyet verebilmektedir. Bunun dışında numune çapının 500mm'ye kadar büyütülebilmesi bu deneye fisürlü killerin ve iri gereçlerin kayma direnci ölçümünde önemli bir avantaj sağlar. Kesme sırasında beliren fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi kesme hızına bağlıdır.

Bu çalışmada 60mm-60mm kare enkesitli kesme kutusu deney aleti kullanılmıştır. 4 adet numune üç sıkıştırma enerjisinde, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basınçları altında suya doygun durumda, 0.035mm/dk hızla kesme işlemine tabi tutulmuştur.

Kesme hızı ve kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki sıklıkla araştırılan konulardan biridir. Farklı koşullar için farklı kesme hızlarında deneyler gerçekleştirilmektedir. Deprem koşulları göz önüne alındığında 400mm/dk'lık bir hız kullanılırken, killerin kalıcı kayma mukavemetinin elde edilebilmesi için 0.03 mm/dk ve daha düşük hızlar önerilmektedir. Statik sartlarda yeniden harekete geçen bir sev kaymasında, kayma hızının 5 cm/yıl ile 50 cm/gün arasında degistigi bilinmektedir (Skempton, 1985). Depremli kosullarda ise bu kayma hızları deprem sırasında meydana gelen yatay ivmenin de etkisiyle 100 mm/dak- 1000 mm/dak degerlerine ulasabilmektedir (Lemos, 1986). Bir çok araştırmacı kohezyonlu zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin, kesme hızından yavaş hızlarda çok düsük derecede etkilendiğini, 100 mm/dak'dan daha büyük hızlarda ise kayma mukavemetinde önemli degisiklikler olduğunu ifade etmiştir (Skempton, 1985). La Gutta ve diğ. (1970) yaptıkları çalışmalarda 0.1mm/dk – 0.001mm/dk kesme hızı aralığında kalıcı kayma mukavemeti açısındaki değişimin ihmal edilebilir boyutta olduğunu belirtmişlerdir (Hatipoğlu, 2012). Bu çalışma kapsamında CD deneylerinde bilgisayar destekli veri toplama ünitesi bulunduğundan ve buna bağlı olarak sürekli okuma alma gerekliliğinin olmayışından dolayı kesme hızı mümkün olduğunca düşük (0.005mm/dk) olarak seçilmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ise manuel cihazlarda gerçekleştirildiğinden, kesme aşaması sırasında düzenli okuma alma gerekliliğinin olmasından ve deney sürelerinin makul seviyeye indirilme ihtiyacından dolayı kesme hızı drenajlı koşullar korunacak şekilde 0.035mm/dk olarak seçilmiştir. Yapılan literatür çalışmasında 0.1mm/dk – 0.001mm/dk kesme hız aralığında kalıcı kayma mukavemeti parametreleri arasındaki farkın ihmal edilebilir mertebede olması sebebiyle belirtilen hızlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.3'de kesme hızı-kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : Kesme hızı kalıcı-kayma mukavemeti ilişkisi (Skempton, 1985).

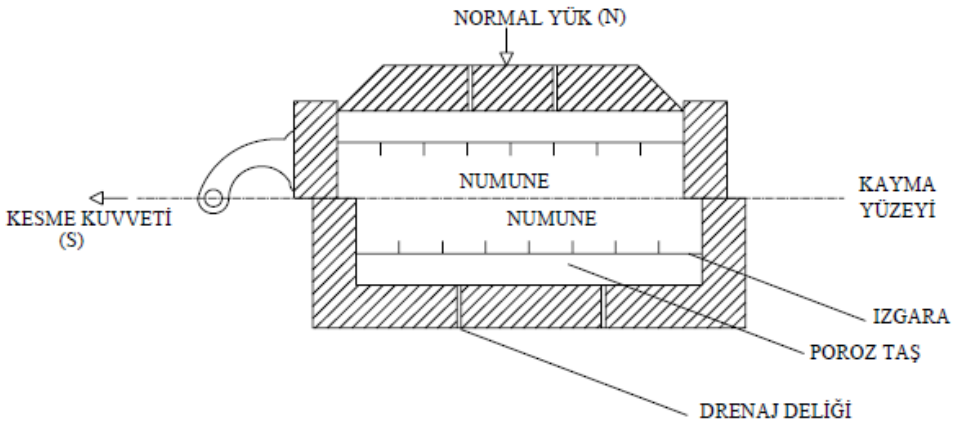
Hız Değişimi	Hız Değeri	Kalıcı Kayma Mukavemeti Oranı
En düşük arazi	5cm/yıl=0.001mm/dk	0.97
Genel laboratuvar	0.005mm/dk	1.00
En yüksek arazi	50cm/gün=0.35mm/dk	1.05

Kesme işlemi 8mm deformasyona kadar devam ettirilmiş, sonrasında kesme kutusu geri çekilerek numunenin yeniden konsolide olması beklendikten sonra tekrar aynı yönde kesilmiştir. Her numune için artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen sabit bir kayma mukavemeti değerine ulaşılıncaya kadar çevrimler devam etmiştir. Her numune için ortalama 5 tekrar yapılmıştır.

Bu işlem suya doygun olmayan durum için de yapılmıştır. Hazırlanan numuneler kesme kutusu haznesine su konmadan konsolide edilerek kesme işlemine tabi tutulmuştur. İstenilen kesme yüzeyi sağlanamadığından dolayı elde edilen sonuçlarla artan deformasyon seviyesine bağlı sabit kalan bir kayma mukavemeti değerine ulaşılamamıştır. Şekil 3.13'de kesme kutusu deney aleti görülmektedir. Şekil 3.14'de kesme kutusu deney aletinin kesiti gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Kesme kutusu deney aleti (İTÜ)



Şekil 3.14 : Kesme kutusu deney aleti enkesiti (Önalp, 2015)

Şekil 3.14'de görüldüğü üzere kesme kutusu deney sisteminde alt kısım yatay düzlemde hareket ederken üst kısım sabit olacak şekilde tasarlanmıştır. Sabit olan üst kısıma bağlı kuvvet halkası ve bu halkaya bağlı deformasyon saatinden kuvvet değerleri elde edilir.

3.4.1 TKK deneyleri için numune hazırlanması ve deneylerin yapılışı

Bu çalışma kapsamında kullanılan 4 adet numune konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için hazırlandıkları şartlarda hazırlanıp, tekrarlı kesme kutusu deneylerine tabi tutulmuştur. Üç sıkıştırma enerjisinde hazırlanan numuneler ring yardımıyla 60mm-60mm enkesitinde çıkarılmış, streç filmle kaplanıp nem odasına muhafazaya alınmıştır. Belirlenen sıkılıkta optimum su muhtevası değerinde hazırlanan (1.sıkıştırma enerjisi) numuneler bu gerilme seviyesindeki ön konsolidasyon basınçları altında, suya doygun halde yüklemeye bırakılıp, konsolidasyon tamamlandıktan sonra kesme işlemine geçilmiştir. Bu işleme standart proktor sıkılığında (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor sıkılığında (3.sıkıştırma enerjisi) tekrar edilmiştir.

Hazırlanan numuneler deney aletine konduktan sonra hazne su ile doldurulmuş, yükleme yapılmış ve 24 saat süreyle konsolidasyon olmaları beklenmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra 0.035mm/dk hızla 8mm deformasyon seviyesine gelinceye kadar kesme işlemi devam ettirilmiş (yaklaşık 6 saat), sonrasında geri sarılarak numunenin tekrar konsolide olması sağlanmıştır. Konsolidasyon sonrası tekrar kesme işlemi başlatılmıştır. Bu işlem (tekrar) artan deformasyonla değişmeyen sabit bir kayma mukavemeti değerine ulaşılıncaya kadar devam ettirilmiş, deney sonlandıktan sonra numune üzerindeki yükleme boşaltılıp haznedeki su tahliye edilmiştir. Bunun sonucunda kullanılan 4 adet numune için üç enerji seviyesinde suya doygun durumda gerçekleştirilen deney sonucuna göre maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, suya doygun durumda ve suya doygun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin nasıl değiştiğinin incelenmesi olduğundan, aynı şartlarda hazırlanan numuneler ilk aşamadan farklı olarak kesme kutusu deney aletinin haznesine su konmadan, su muhtevasının değişmemesi için nemli bezle sarılarak kuru ortamda gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Şekil 3.15'da suya doygun durumda kesme kutusu deney aletinde kesilmiş numune görülmektedir. Kesme yüzeyine giren suyun ve danelerin kesme yüzeyine paralel yönelmesinin etkisiyle oluşan cilalı yüzey görülmektedir.



Şekil 3.15 : Tekrarlı kesme deneyi sonrası numune ve kesme yüzeyi (S=%100)

Tekrarlı kesme kutusu deneyinde yatay deformasyon saatinden yatay (ΔL) ve düşey deformasyon saatinden düşey (ΔH) deplasman değerleri ve kuvvet halkası saatinden yatay yük (T) değeri okunmuş olup, yatay deformasyon saati 1/100 hassasiyettedir. Saatin başlangıç değerinden belirli deformasyon değerlerine karşılık kuvvet halkasından okumalar alınmış, bu okumalar ile ring faktörü çarpılarak kuvvet değeri elde edilmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti değerine ulaşılabilmesi için ortalama 5 tekrar yapılarak numune kesme yüzeyi üzerinde ileri-geri hareket sağlanmıştır. Bu çalışmada kesme kutusu deneyi hesaplamaları düzeltilmemiş alanlara göre hesaplanmıştır. Düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamada numunenin başlangıç alanı olan 60mm*60mm = 3600mm^2 sabit bir değer olarak alınmıştır. Buna göre yapılan hesaplarda kayma gerilmesi;

$$\tau = \frac{\text{Yatay Kuvvet}}{\text{Düzeltilmemiş Alan}} \qquad \textbf{(3.4)}$$

bağıntısı yardımıyla elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin maksimum ve kalıcı kayma mukavemetinin drenajlı koşullarda incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deney programı çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : Tez çalışmasına ait deney programı.

Numune No	Elek Analizleri	Hidrometri Analizleri	Kıvam Limitleri		Piknometre Deneyleri	Kompaksiyon Deneyleri			Ödometre Deneyleri			Üç Eksenli Basınç Deneyleri		Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri	
			w_L	I_p		SP	MP	BS	1.SE	2.SE	3.SE	S=%100	S<%100	S=%100	S<%100
NO1	1	1	1	1		1	1		1	1					
NO2	1	1	1	1		1	1								
NO3	1	1	1	1		1	1								
NO4	1	1	1	1		1	1								
NO5	1	1	1	1		1	1								
NO6	1	1	1	1		1	1								
NO7	1	1	1	1		1	1								
NO8	1	1	1	1		1	1		1	1					
YS1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	3	3	1
NO9	1	1	1	1		1	1		1	1					
NO10	1	1	1	1		1	1		1	1					
NO11	1	1	1	1		1	1								
YS2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1
NO12	1	1	1	1		1	1								
NO13	1	1	1	1		1	1								
NO14	1	1	1	1		1	1								
NO15	1	1	1	1		1	1								
NO16	1	1	1	1		1	1								
NO17	1	1	1	1		1	1								
YS3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	
NO18	1	1	1	1		1	1								
NO19	1	1	1	1		1	1								
NO20	1	1	1	1		1	1								
NO21	1	1	1	1		1	1								
YS4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	
Toplam	25	25	50		4	54			18			27		14	

SP:Standart proktor, MP:Modifiye proktor, BS:Belirlenen sıkılık, SE:Sıkıştırma enerjisi olarak kullanılan kısaltmalardır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Labaratuvarı'nda bulunan çok sayıda zemin numunesi öncelikle sınıflandırma deneylerine tabi tutulup endeks özellikleri belirlenmiştir. 25 adet ince daneli zemin numunesi üzerinde elek analizi, hidrometre analizi, likit limit, plastik limit, piknometre, standart proktor, modifiye proktor ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Tüm deney sonuçları bu bölümde mevcuttur.

Yapılan deneyler sonucunda istenilen özelliklere sahip 2 adet yüksek plastisiteli kil, 1 adet düşük plastisiteli kil ve 1 adet düşük plastisiteli silt olmak üzere 4 adet numune belirlenmiştir. Çalışma süresi boyunca toplam olarak 25 numune için sınıflandırma deneyleri, bu 25 numune içerisinden seçilen 4 numune için tekrarlanan deneyler haricinde 12 adet konsolidasyon deneyi, 27 adet CD deneyi, ortalama 5 tekrar olacak şekilde 12 adet tekrarlı kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

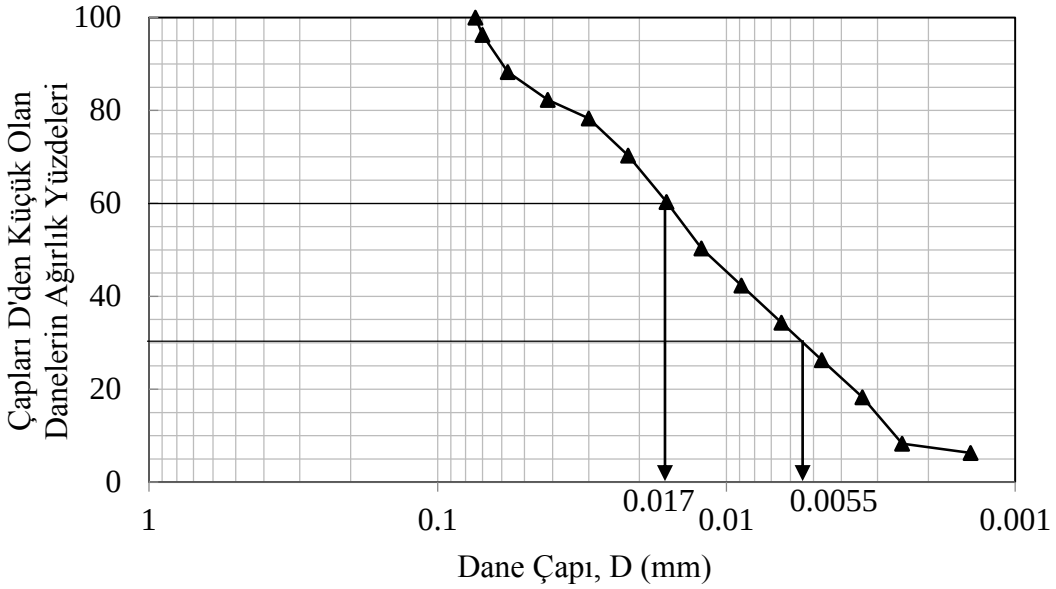
4.1 Sınıflandırma Deneyleri

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve tasarım parametrelerinin saptanması amacıyla zeminleri gruplara ayırdıktan sonra daha detaylı incelemek gerekmektedir. Buna zeminlerin sınıflandırılması denir. Ortak bir dil kullanabilmek amacıyla belli bir standart dahilinde yapılan bu sınıflandırma işlemi ile zeminlerin davranışı hakkında ön bilgi sahibi olmak mümkün olmaktadır.

4.1.1 Elek ve hidrometre analizleri

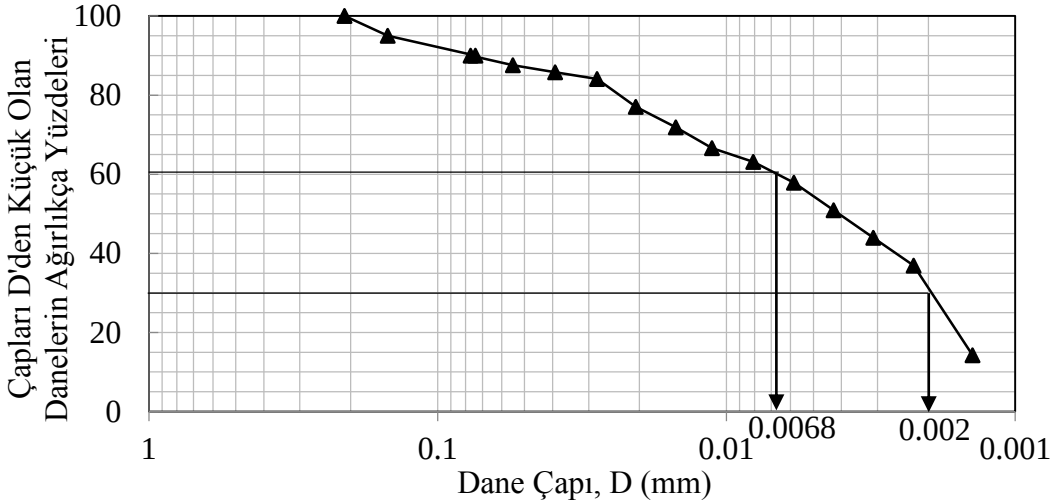
Bu çalışma kapsamında kullanılan numuneler üzerinde zemin sınıflandırma deneylerinin ilk aşaması olarak elek analizi ve hidrometre analizi yapılmıştır. Bu yolla numunelerin dane çapı dağılımları elde edilmiştir. Bu işlem için 200 nolu elek kullanılarak yapılan ıslak analiz sonrasında sırayla 40, 70 ve 100 nolu elekler kullanılarak elek analizi tamamlanmıştır.

Çalışılan numuneler çok büyük oranda 200 nolu elek altı malzeme olup, ince daneli zemin olarak sınıflandırılmıştır. 200 nolu elek altında kalan kısmın danelerin çökelme hızından yararlanılarak dane çapı dağılımının elde edilmesi amacıyla hidrometre analizleri yapılmış ve elek analizi sonuçları ile birlikte dane çapı dağılım grafiğinde gösterilmiştir. 25 adet numune içerisinden istenilen özellikte olan 4 adet numune YS1, YS2, YS3 ve YS4 olarak isimlendirilip, dane çapı dağılım grafikleri şekil 4.1, şekil 4.2, şekil 4.3 ve şekil 4.4'te gösterilmiştir.



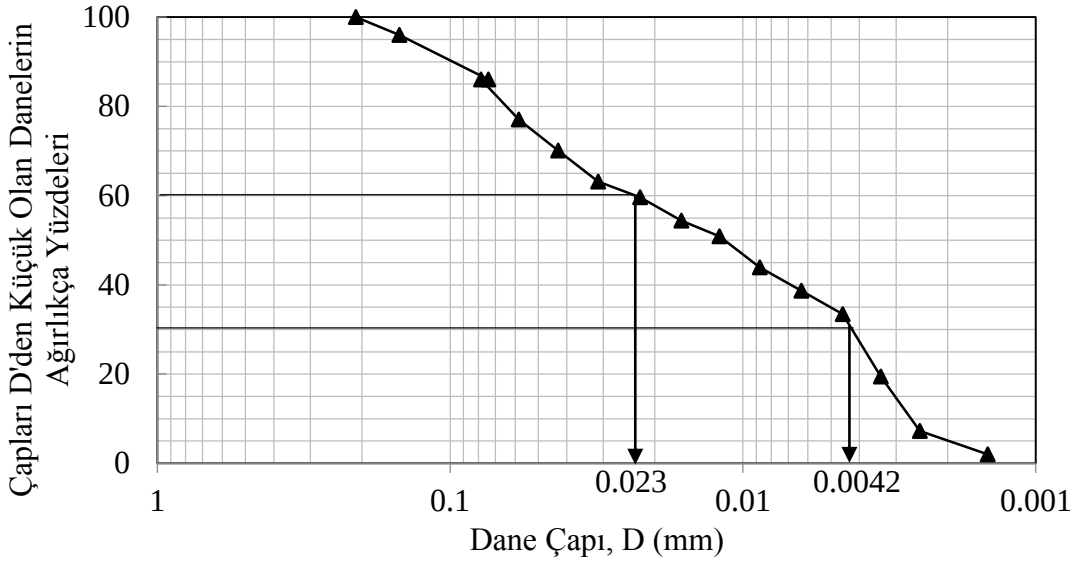
Şekil 4.1 : YS1 numunesi dane çapı dağılımı

Şekil 4.1'de dane çapı dağılımı gösterilen YS1 numunesinin tamamının 200 nolu elek altı malzeme olduğu görülmektedir.



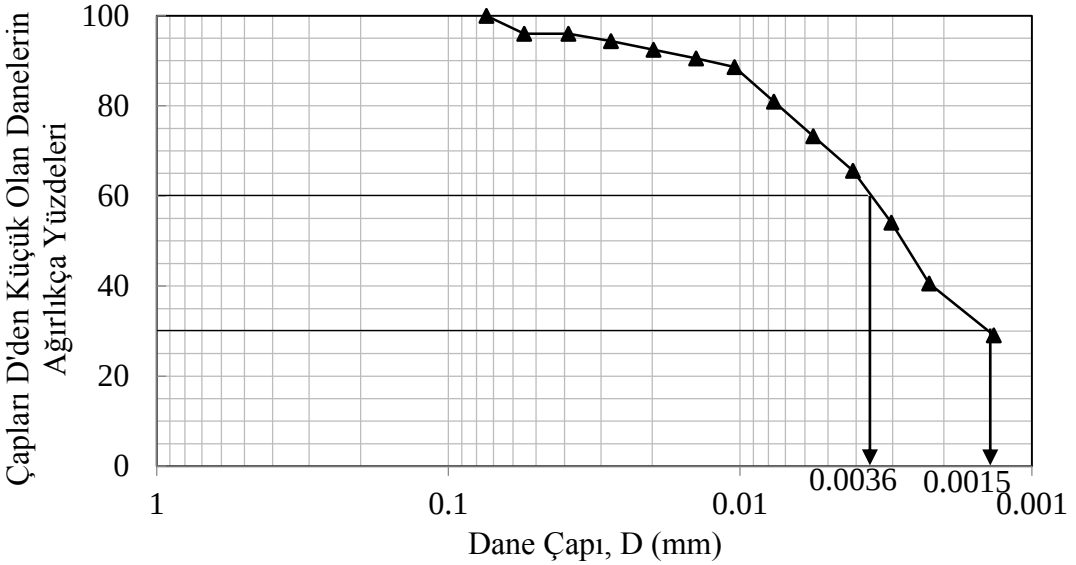
Şekil 4.2 : YS2 numunesi dane çapı dağılımı

Şekil 4.2'de dane çapı dağılımı gösterilen YS2 numunesinin %90 oranında 200 nolu elek altı malzeme olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 : YS3 numunesi dane çapı dağılımı

Şekil 4.3'de dane çapı dağılımı gösterilen YS3 numunesinin %86 oranında 200 nolu elek altı malzeme olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 : YS4 numunesi dane çapı dağılımı

Şekil 4.4'de dane çapı dağılımı gösterilen YS4 numunesinin tamamının 200 nolu elek altı malzeme olduğu görülmektedir.

4.1.2 Kıvam limitleri

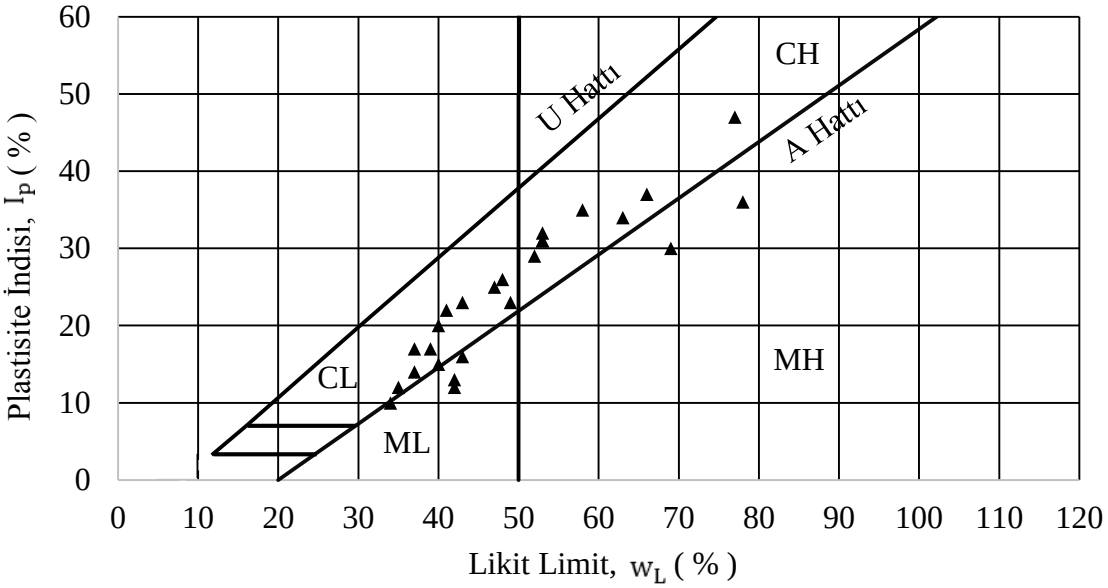
İnce daneli zeminlerin sınıflandırılmasında dane çapı dağılımından ziyade kıvam limitleri etkili olmaktadır. İnce daneli zeminlerde zeminin kıvamını belirleyen su muhtevası sınırları kıvam limitleri olarak adlandırılmaktadır. Zeminin katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su muhtevası değeri plastik limit, plastik kıvamdan akışkan kıvama geçtiği andaki su muhtevası değeri likit limit olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin likit limit, plastik limit değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4.1'de bu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Kullanılan numunelerin kıvam limitleri ve zemin sınıfları.

Numune No	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	Zemin Sınıfı
YS1	77	30	47	CH
YS2	42	30	12	ML
YS3	35	23	12	CL
YS4	66	29	37	CH

Şekil 4.5'de kıvam limitleri ve zemin sınıfları verilen numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Kullanılan numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleri

Likit limit deneyleri yapılırken daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesi amacıyla tek nokta yerine üç nokta kullanılıp 25 vuruşa denk gelen su muhtevası elde edilmiştir.

Plastik limit deney sonuçları ciddi ölçüde operatöre bağlı olduğundan ve özellikle silt tipi zeminlerde plastik limitin tespitinin zor oluması sebebiyle birden fazla sayıda yapılıp ortalama değer alınmıştır.

4.1.3 Piknometre deneyleri

Zeminlerde dane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı özgül ağırlık olarak tanımlanmaktadır. Özgül ağırlığını elde etmek amacıyla piknometre adı verilen cam tüpler yardımıyla taşan suyun hacmi yardımıyla yapılan deneydir.

Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin özgül ağırlıklarının bilinmesi, numunelerin üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri için hazırlanacakları enerji düzeylerindeki optimum su muhtevası değerindeki doygunluk oranlarının tespiti için gereklidir.

Sınıflandırma deney sonuçlarına göre YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin kıvam limitleri, ince dane oranları, kil yüzdeleri, özgül ağırlıkları ve zemin sınıfları çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Kullanılan numunelerin endeks özellikleri.

Numune No	w_L (%)	I_p (%)	İDO (%)	KY (%)	G_s	Zemin Sınıfı
YS1	77	47	100	8	2.68	CH
YS2	42	12	90	37	2.57	ML
YS3	35	12	86	7	2.59	CL
YS4	66	37	100	40	2.65	CH

Çigelge 4.2'de likit limit değerleri 'w_L' olarak kısaltılıp yüzde cinsinden, plastisite indisi değerleri 'I_p' olarak kısaltılıp yüzde cinsinden, ince dane oranları 'İDO' olarak kısaltılıp yüzde cinsinden, kil yüzdeleri 'KY' olarak yüzden cinsinden, özgül ağırlıklar 'Gs' olarak verilmiştir ve zemin sınıfları yüksek plastisiteli kil (CH), düşük plastisiteli silt (ML), düşük plastisiteli kil (CL) olarak belirtilmiştir.

4.2 Sıkıştırma Enerji Seviyeleri

Bu çalışmada konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneylerine tabi tutulmak üzere seçilen 4 adet numune üç farklı sıkıştırma enerjisinde hazırlanmıştır.

Bu kısım bu çalışmanın en önemli kısmı olup, aynı zamanda numune hazırlama yöntemini oluşturmaktadır. Buradaki üç sıkıştırma enerjisi tanımından kasıt, seçilen numunelerin belirlenen sıkılıkta (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor sıkılığında (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor sıkılığında (3.sıkıştırma enerjisi), numunelerin her enerji seviyesindeki optimum su muhtevalarında hazırlanması anlamına gelmektedir.

Bu enerji seviyelerinde hazırlanan numuneler, her seviye için konsolidasyon deneyine tabi tutulup ön konsolidasyon basınçları Casagrande (1936) yöntemi ve Da Silva (1970) yöntemi olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenmiştir. Ön konsolidasyon basınçları belirlendikten sonra numuneler konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneylerine belirlenen ön konsolidasyon basınçları altında tabi tutulmuştur. Buradaki amaç numunelerin doğrudan hazırlandıkları koşullar altında kesme işlemine tabi tutulmasıdır.

Burada ön konsolidasyon basıncı, numunelerin labaratuvardaki hazırlandıkları enerji seviyelerindeki maruz kaldığı gerilme olarak tanımlanır. Ön konsolidasyon basıncı altında üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyine tabi tutulan numunelerde hazırlanma esnasındaki koşullar korunmuş olmaktadır.

Çizelge 4.3'de numune hazırlama koşullarında kullanılan, her enerji seviyesine karşılık gelen enerjii miktarları, ve standartlar gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Numune hazırlama koşullarındaki sıkıştırma enerji seviyeleri.

	1.Sıkıştırma Enerjisi	2.Sıkıştırma Enerjisi	3.Sıkıştırma Enerjisi
D (mm)	152.4	152.4	152.4
H (mm)	117	117	117
V (cm^3)	2125	2125	2125
W (N)	24.5	24.5	44.5
H_d (cm)	30.5	30.5	45.7
E (kN/m^3)	200	600	2700
Yöntem			
Tabaka Sayısı	3	3	5
Vuruş Sayısı	20	56	56

Çizelge 4.3'de verilen 'D' kullanılan kalıbın çapı, 'H' kullanılan kalıbın yüksekliği, 'V' kullanılan kalıbın hacmi, 'W' kullanılan tokmağın ağırlığı, 'H_d' tokmağın düşüş yüksekliği ve 'E' sıkıştırma enerjisi olarak tanımlanmıştır. Tüm sıkıştırma enerji seviyeleri için kullanılan kalıp modifiye proktor kalıbı olup; tabaka sayısı, tokmak ağırlığı, tokmak düşüş yüksekliği ve vuruş sayısı değiştirilerek farklı miktarlarda enerji verilerek farklı sıkıştırma enerji seviyeleri oluşturulmuştur.

3.sıkıştırma enerjisi en yüksek enerji seviyesi olup, modifiye proktor sıkılığına denk etmektedir. Modifiye proktor sıkıştırma enerjisinin üzerindeki seviyelerde ön konsolidasyon basınçlarının çok yüksek çıkabilecek olmasından dolayı daha yüksek bir enerji uygulamak anlamsız olmaktadır.

1.sıkıştırma enerjisi standart proktor enerjisinin üçte birine denk gelmektedir. Bu enerji seviyesinin altında uygulanan enerji seviyelerinde numunenin sıkışmadığı, numune içerisinde büyük boşluklar kaldığı ve kalıptan çıkarılma esnasında numunenin dağıldığı gözlenmiştir. Bu sebeple 3.sıkıştırma enerjisinin altında bir seviyede enerji ile numuneleri sıkıştırmak anlamsız olmaktadır.

Enerji seviyelerindeki sıkıştırma enerji miktarını bulabilmek için kullanılan bağıntı;

$$E = \frac{M*H*L*N}{V} \qquad \textbf{(4.1)}$$

olarak verilmiştir.

Burada 'E' enerji, 'M' tokmak ağırlığı, 'L' tabaka sayısı, 'N' her tabakaya yapılan vuruş sayısı ve 'V' kalıbın hacmi olarak tanımlanır.

4.2.1 Kompaksiyon deneyleri

Zeminlerin taşıma gücünü arttırmak, sabit, hareketli ve dinamik yükler altında meydana gelecek oturmaları azaltmak ve zeminin geçirimliliğini azaltarak zeminlerin daha fazla su alıp hacimsel değişikliklerin oluşmasını önlemek maksadı ile zeminlerin tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtası ile su ve dane hacmi sabit iken havanın dışarı atılıp zemin danelerinin sıkıştırılması olayına kompaksiyon denir. Sıkıştırılmış bir zeminde, kompaksiyon derecesi o zemine ait kuru birim hacim ağırlığıdır. Kuru birim hacim ağırlığı ne kadar büyük ise zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir.

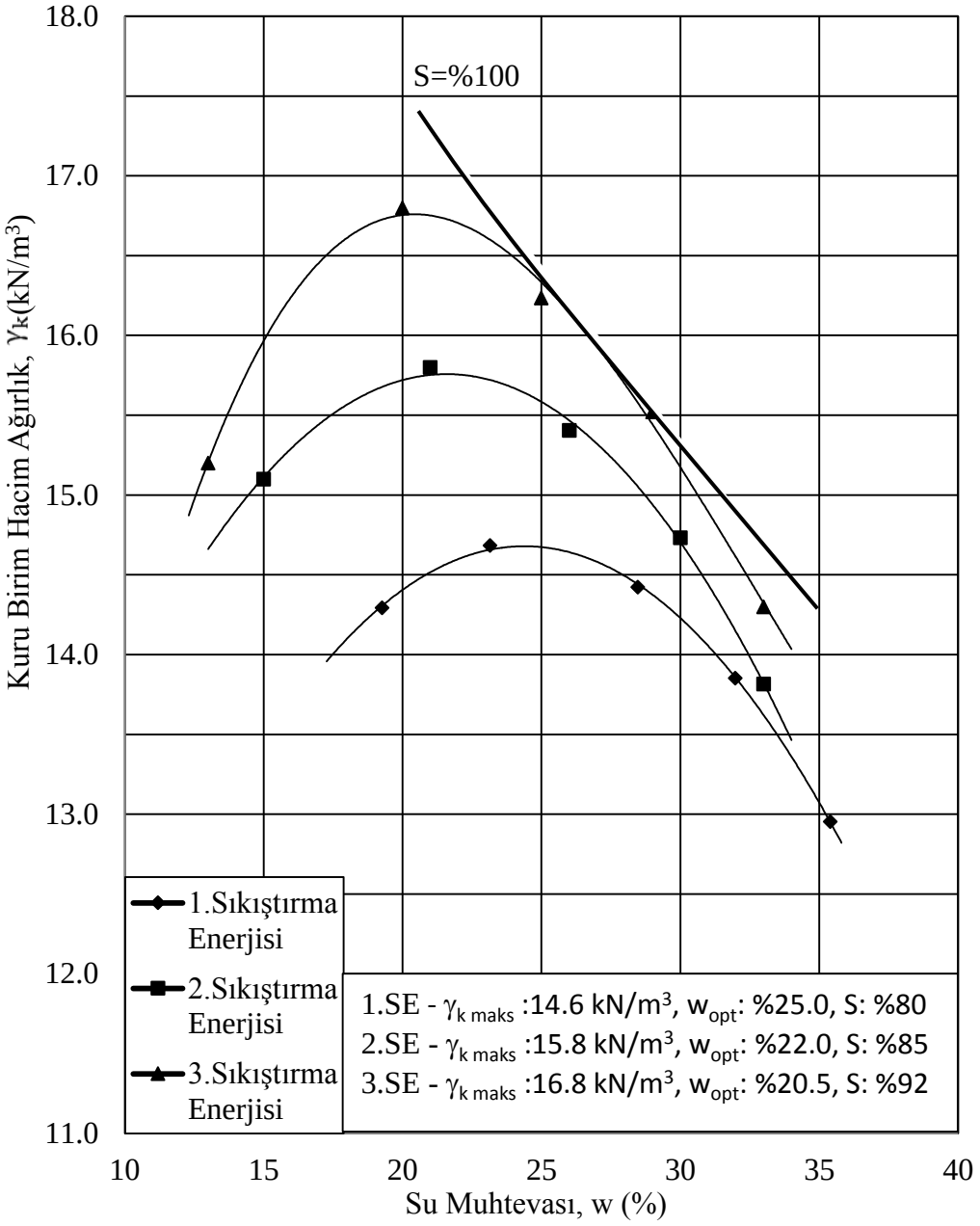
Zeminler sabit bir enerji altında değişik su muhtevalarında sıkıştırıldıklarında artan su muhtevasına bağlı olarak kuru birim hacim ağırlığı artmakta, maksimum bir değere ulaşmakta ve sonrasında azalmaktadır. Bu ilişki şu şekilte açıklanabilir; kuru birim hacim ağırlığın arttığı bölgede zeminde yeterli miktarda su bulunmadığı için, danelerin daha az boşluklu yerleşmek üzere hareket etmeleri, daneler arası sürtünme kuvvetlerinden dolayı zordur. Su daneler arasında bir tür yağlanma etkisi yapmaktadır. Kuru birim hacim ağırlığın pik değerinden sonraki azaldığı bölgede ise zeminde fazla miktarda su bulunduğundan ve suyun pratikte sıkışmaz olduğundan dolayı zeminin boşluk hacmi daha fazla sıkıştırılamamaktadır. Kuru birim hacim ağırlığın maksimum değerine optimum su içeriği denir. En iyi sıkıştırma işlemi optimum su muhtevasında elde edilmektedir. Labaratuvarda yapılan kompaksiyon deneylerinde zeminlerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları elde edilmektedir (Yılmaz ve diğ., 2014).

Bu çalışma kapsamında 25 adet numune üzerinde standart proktor ve modifiye proktor deneyleri yapılıp, optimum su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıklar elde edilmiş, çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : Tüm numuneler üzerinde yapılan standart proktor ve modifiye proktor deney sonuçları.

Numune No	Standart Proktor		Modifiye Proktor		Numune No	Standart Proktor		Modifiye Proktor	
	w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)		w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)
NO1	24.0	15.3	18.5	18.0	YS2	22.0	15.4	20.0	16.5
NO2	22.0	16.9	19.5	18.3	NO12	19.0	14.5	15.7	16.1
NO3	22.0	17.0	18.5	18.6	NO13	29.5	13.0	22.0	14.4
NO4	21.0	16.9	17.0	19.0	NO14	19.5	16.3	15.7	18.2
NO5	25.0	15.0	20.0	17.3	NO15	22.0	16.0	20.0	17.6
NO6	27.0	14.8	23.0	15.8	NO16	18.5	15.6	13.5	17.5
NO7	25.0	15.1	18.5	17.4	NO17	14.5	16.3	12.5	17.6
NO8	22.0	16.9	14.0	18.8	YS3	18.0	17.1	14.0	18.6
YS1	22.0	15.8	20.5	16.8	NO18	15.0	16.5	12.5	17.7
NO9	19.0	15.0	16.0	16.0	NO19	30.0	11.8	25.0	14.1
NO10	20.0	15.4	14.5	17.5	NO20	14.5	15.8	13.0	17.1
NO11	28.0	13.5	21.0	17.2	NO21	19.0	14.7	14.7	15.9
					YS4	16.0	16.8	15.0	18.5

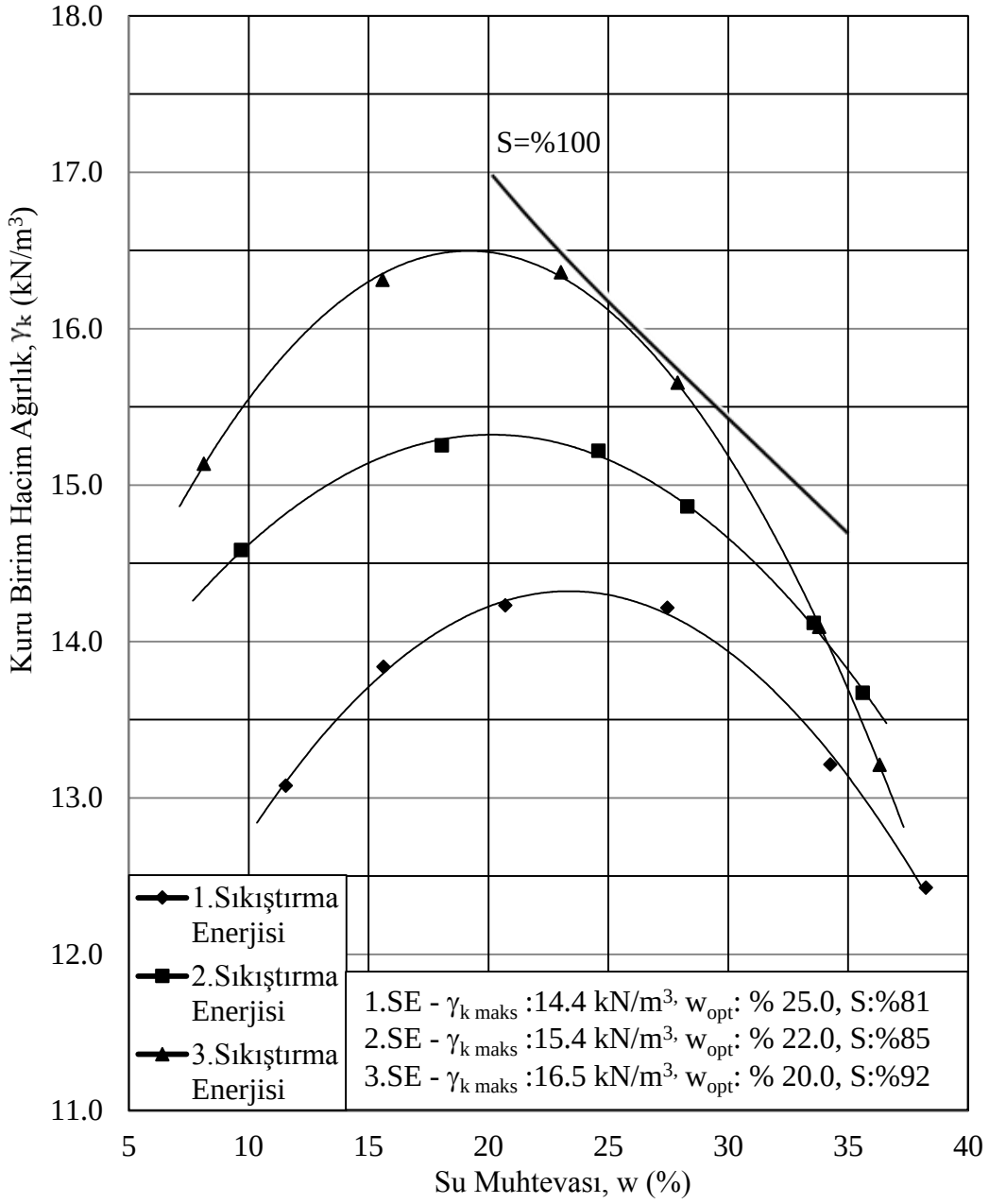
Çalışma kapsamında kullanılan YS1 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçları şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : YS1 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları

Şekil 4.6'da YS1 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçlarına göre elde edilen optimum su muhtevaları, maksimum kurum birim hacim ağırlıkları ve S = %100 eğrisi gösterilmiştir (SE: sıkıştırma enerjisi).

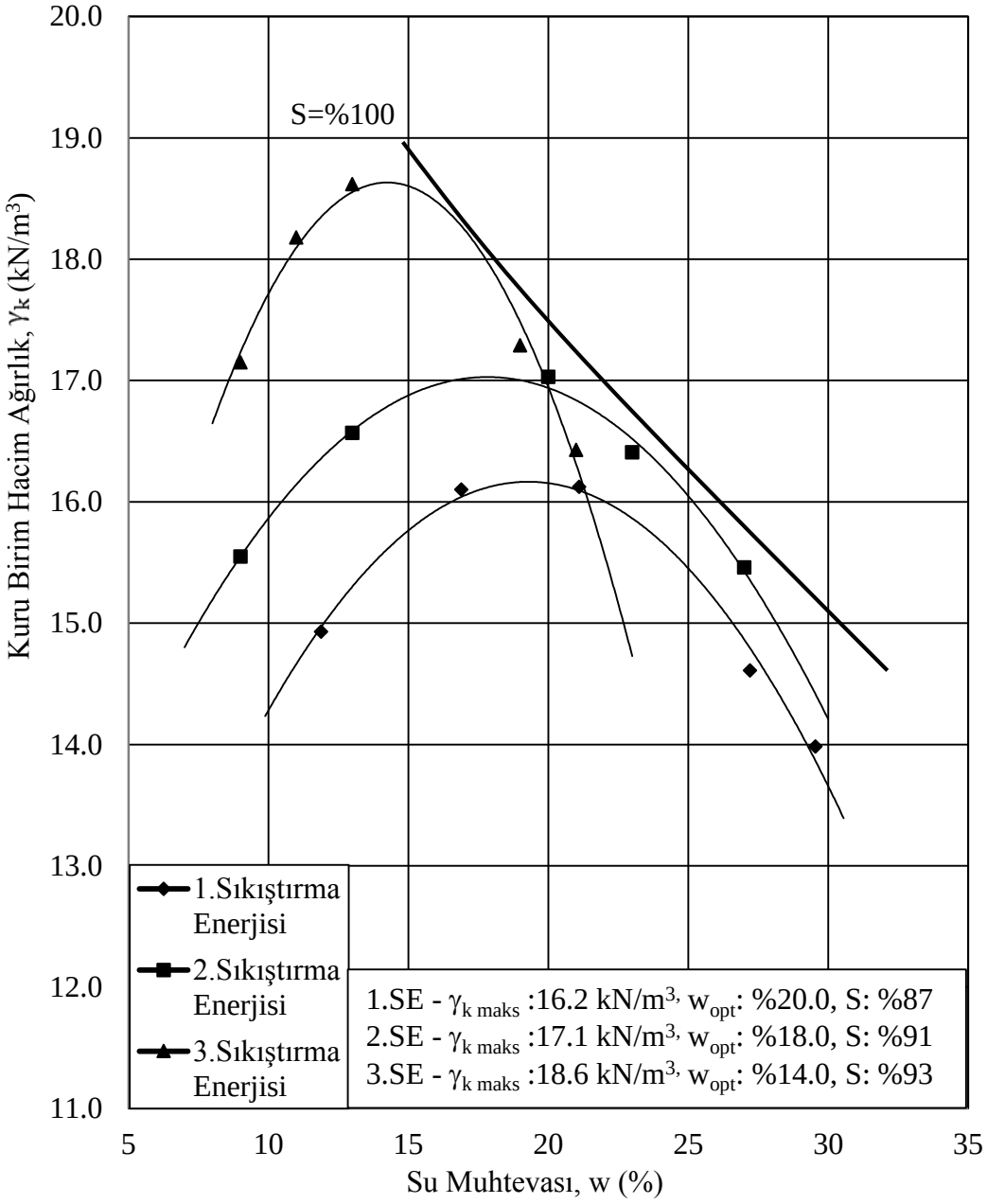
Çalışma kapsamında kullanılan YS2 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçları şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : YS2 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları

Şekil 4.7'de YS2 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçlarına göre elde edilen optimum su muhtevaları, maksimum kurum birim hacim ağırlıkları ve S = %100 eğrisi gösterilmiştir.

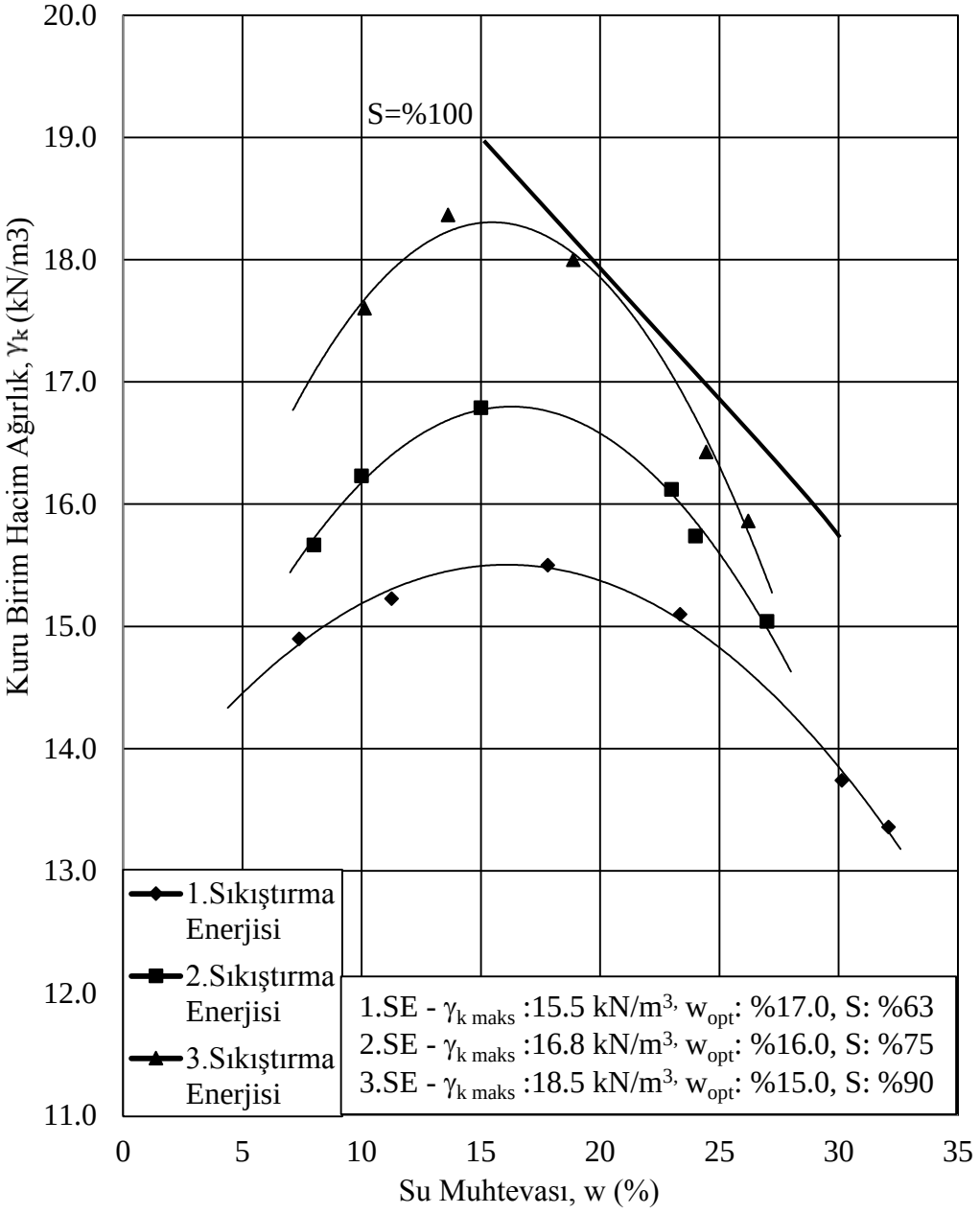
Çalışma kapsamında kullanılan YS3 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçları şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : YS3 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları

Şekil 4.8'de YS3 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçlarına göre elde edilen optimum su muhtevaları, maksimum kurum birim hacim ağırlıkları ve S = %100 eğrisi gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan YS4 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçları şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : YS4 numunesi için kompaksiyon deney sonuçları

Şekil 4.9'de YS4 numunesi için belirlenen sıkılık (1.sıkıştırma enerjisi), standart proktor (2.sıkıştırma enerjisi) ve modifiye proktor (3.sıkıştırma enerjisi) deney sonuçlarına göre elde edilen optimum su muhtevaları, maksimum kurum birim hacim ağırlıkları ve S = %100 eğrisi gösterilmiştir.

YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri için üç sıkıştırma enerjisinde yapılan kompaksiyon deney sonuçları çizelge 4.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.5 : YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri için üç sıkıştırma enerjisindeki kompaksiyon deney sonuçları.

Numune No	1.Sıkıştırma Enerjisi (Belirlenen Sıkılık)		2.Sıkıştırma Enerjisi (Standart Proktor Sıkılığı)		3.Sıkıştırma Enerjisi (Modifiye Proktor Sıkılığı)	
	w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)	w_{opt} (%)	$\gamma_{k\,maks}$ (kN/m^3)
YS1	25.0	14.6	22.0	15.8	20.5	16.8
YS2	25.0	14.4	22.0	15.4	20.0	16.5
YS3	20.0	16.2	18.0	17.1	14.0	18.6
YS4	17.0	15.5	16.0	16.8	15.0	18.5

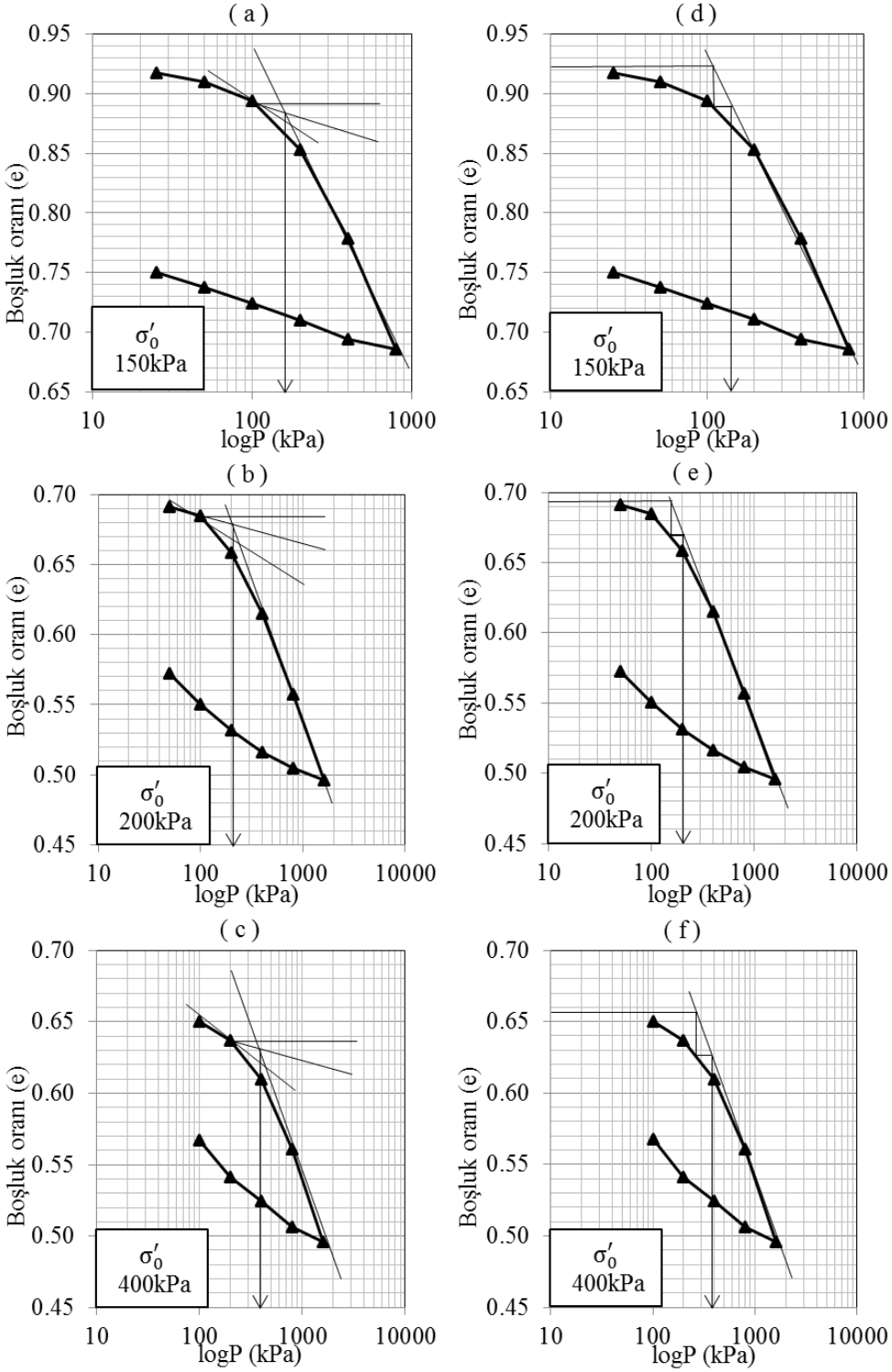
Numunelerin her enerji seviyesi için optimum su muhtevaları ve bu optimum su muhtevalarına karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlıkları görüldüğü gibidir. Bu enerji seviyelerinde hazırlanan numuneler, sonraki aşamada konsolidasyon deneyine tabi tutularak ön konsolidasyon basınçları iki yöntemle elde edilmiştir.

4.2.2 Konsolidasyon deneyleri ve ön konsolidasyon basınçlarının hesaplanması

İnce daneli zeminlerde sabit yük ve gerilmeler altında bünyelerinde muhafaza ettikleri suyun zamana bağlı olarak dışarı atılması sonucu meydana gelen sıkışmaya konsolidasyon adı verilmektedir. İnce daneli zeminlerde efektif gerilmenin yavaş şekilde artışı zeminde oturmaya sebep olmaktadır. Bu süreç toplam gerilmedeki artışın neden olduğu boşluk suyu basıncındaki artışın tamamen dağılmasına kadar devam eder. Konsolidasyonun tersi olan şişme süreci negatif boşluk suyu basıncı altında zemin hacminde meydana gelen artış olarak tanımlanır. Zeminlerin konsolidasyon sırasındaki davranışlarını belirleyen parametreler, laboratuvarda konsolidasyon deneyi ile elde edilir.

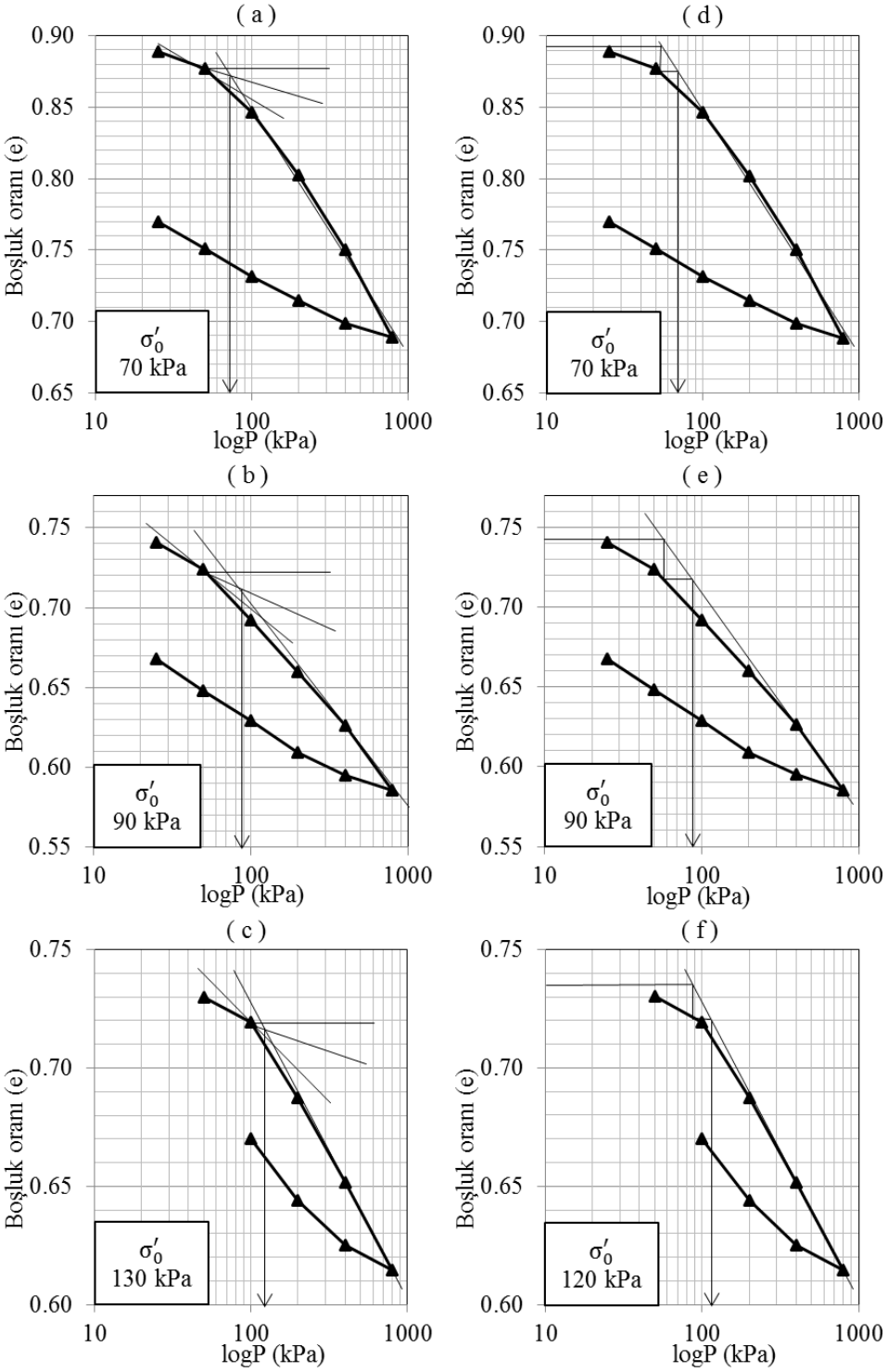
Bu çalışma kapsamında üç sıkıştırma enerjisinde hazırlanan YS1, YS2,YS3 ve YS4 numuneleri her enerji seviyesi için konsolidasyon deneyine tabi tutulup, ön konsolidasyon basınçları elde edilmiştir. Buradaki temel amaç, başlangıçta belirli bir sıkılıkta hazırlanan numuneler için, üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyine tabi tutulmadan önce üzerlerine gelen gerilme kalkmış olacağından dolayı hazırlanma esnasındaki koşulların dışına çıkılmaktadır.

Şekil 4.10'da YS1 numunesinin Casagrande (1936) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (a), 2.sıkıştırma enerjisi (b), 3.sıkıştırma enerjisi (c) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir. Da Silva (1970) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (d), 2.sıkıştırma enerjisi (e), 3.sıkıştırma enerjisi (f) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir.



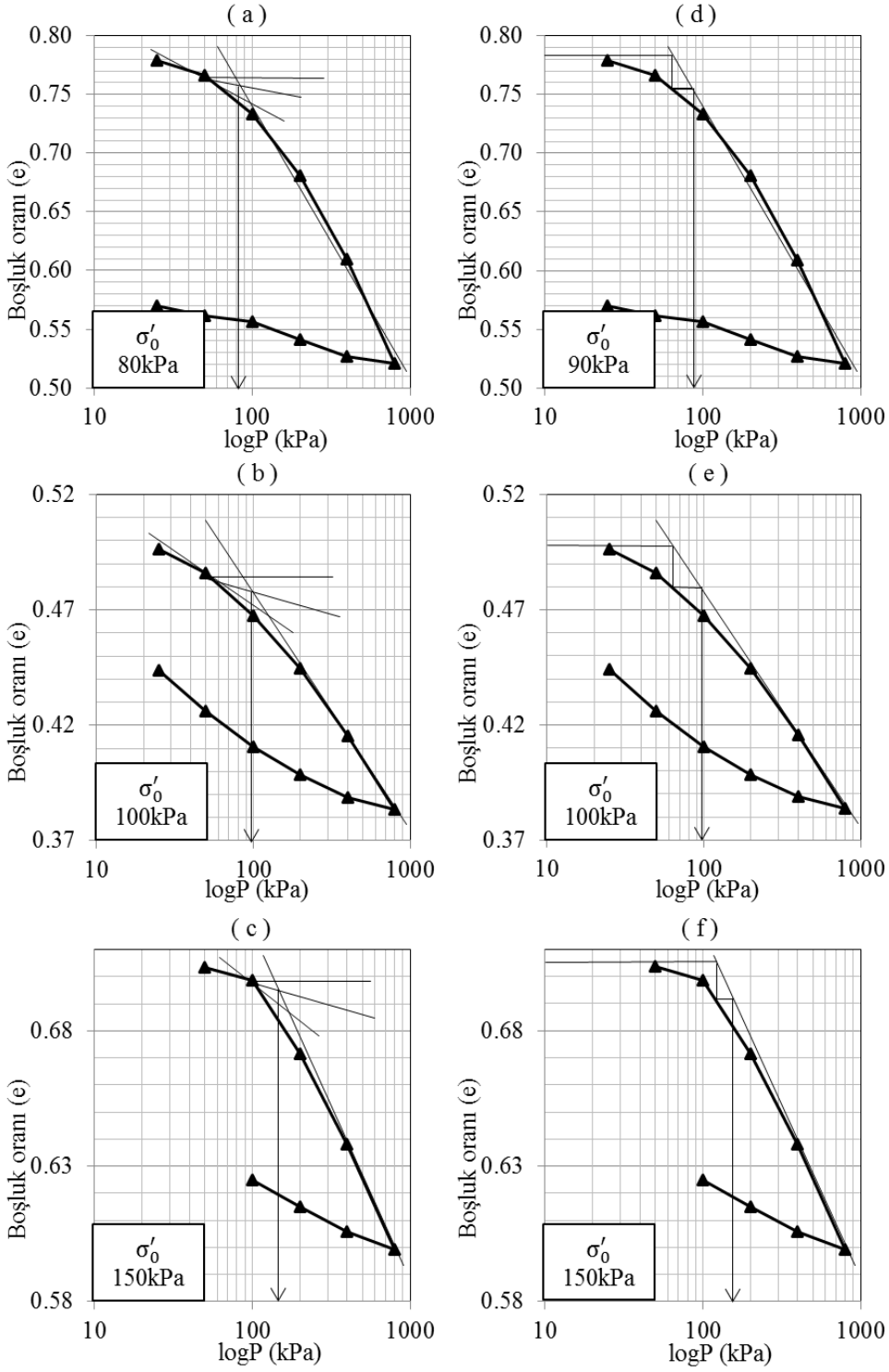
Şekil 4.10 : YS1 numunesi ön konsolidasyon basınçları

Şekil 4.11'de YS2 numunesinin Casagrande (1936) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (a), 2.sıkıştırma enerjisi (b), 3.sıkıştırma enerjisi (c) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir. Da Silva (1970) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (d), 2.sıkıştırma enerjisi (e), 3.sıkıştırma enerjisi (f) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir.



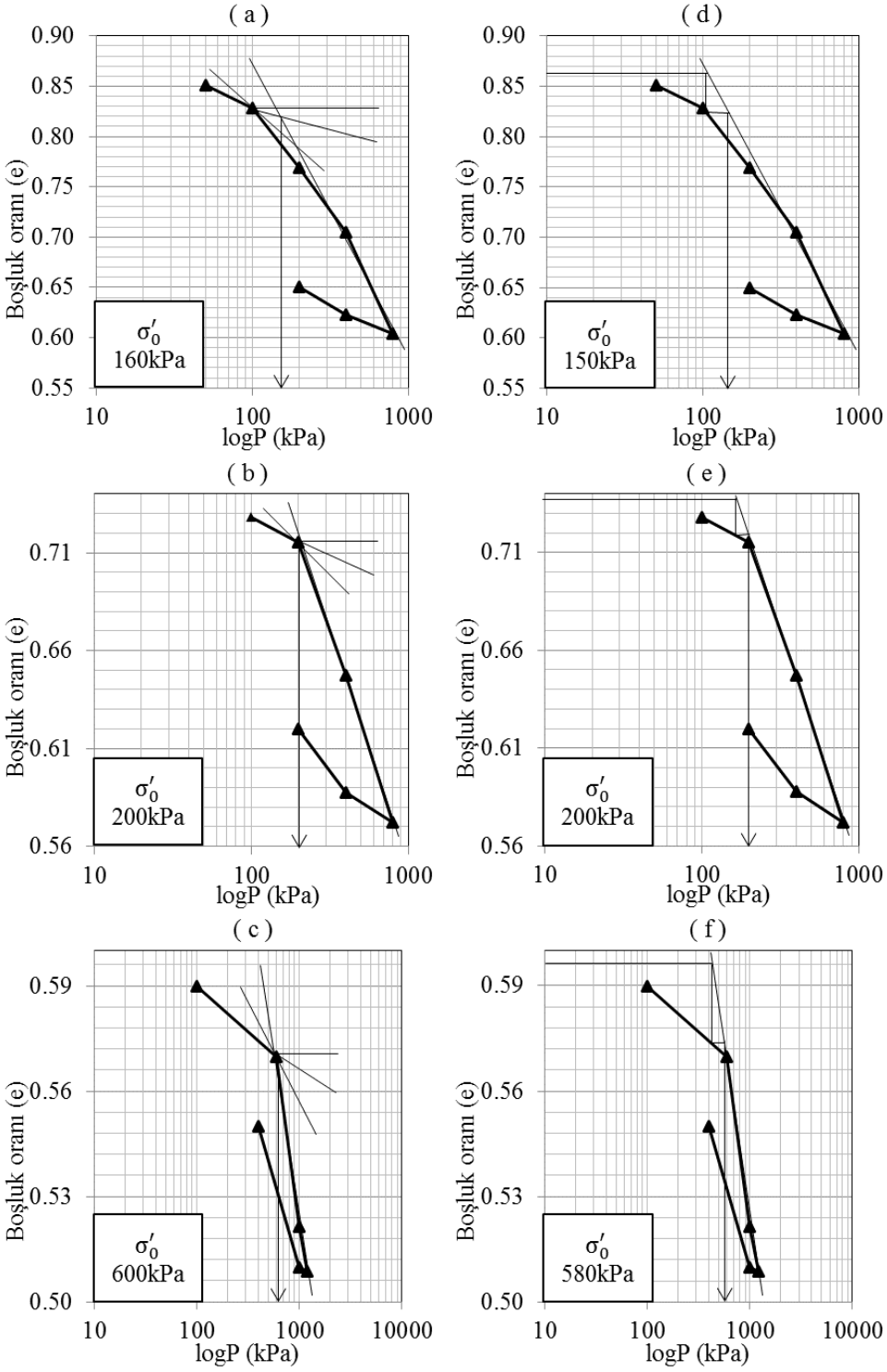
Şekil 4.11 : YS2 numunesi ön konsolidasyon basınçları

Şekil 4.12'de YS3 numunesinin Casagrande (1936) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (a), 2.sıkıştırma enerjisi (b), 3.sıkıştırma enerjisi (c) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir. Da Silva (1970) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (d), 2.sıkıştırma enerjisi (e), 3.sıkıştırma enerjisi (f) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir.



Şekil 4.12 : YS3 numunesi ön konsolidasyon basınçları

Şekil 4.13'de YS4 numunesinin Casagrande (1936) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (a), 2.sıkıştırma enerjisi (b), 3.sıkıştırma enerjisi (c) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir. Da Silva (1970) metoduyla 1.sıkıştırma enerjisi (d), 2.sıkıştırma enerjisi (e), 3.sıkıştırma enerjisi (f) hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir.



Şekil 4.13 : YS4 numunesi ön konsolidasyon basınçları

Hazırlanma esnasındaki koşulların korunabilmesi amacıyla numunelerin hazırlandıkları enerji seviyelerinde oluşan gerilme kadar (o enerji seviyesindeki ön konsolidasyon basıncı) etki ettirilerek basınç altında dengeye ulaşmaları sağlanmıştır. Numuneye etki eden ön konsolidasyon basıncı kadar çevre basıncı altında numunede bir sınır durum oluşturulup, yük altında aşırı konsolide olması veya şişmesi engellenmiştir. Bu şartlarda artı veya eksi yönde deformasyona izin verilmeyip, başlangıç durumundaki doygunluk oranı, boşluk oranı ve su muhtevası korunmuş olmaktadır. İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aletlerinde boşluk hava basıncı değişimi ölçülemediğinden, deney esnasındaki doygunluk oranı değişimini ölçmek mümkün olmamaktadır. Deney başlangıcındaki doygunluk oranının korunması sağlanıp, numunenin hazırlandığı koşullardaki doygunluk oranında kesme aşamasına geçilmiştir.

Konsolidasyon deney sonuçlarına göre her numunenin üç sıkıştırma enerjisi için Casagrande (1936) ve Da Silva (1970) yöntemleri ile ön konsolidasyon basınçları hesaplanmıştır. İki farklı yöntem kullanılarak hata payının azaltılması amaçlanmıştır.

Çizegle 4.6'da YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin üç sıkıştırma enerjisinde hesaplanan ön konsolidasyon basınçları verilmiştir. Ön konsolidasyon basıncı 'σ'_0' kısaltması ile, Casagrande 'CSG' kısaltması ile gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Numunelerin Casagrande (1936) ve Da Silva (1970) yöntemleri ile elde edilen ön konsolidasyon basınçları.

Numune No	Ön Konsolidasyon Basıncı - σ'_0 (kPa)					
	1.Sıkıştırma Enerjisi		2.Sıkıştırma Enerjisi		3.Sıkıştırma Enerjisi	
	CSG	Da Silva	CSG	Da Silva	CSG	Da Silva
YS1	150	150	200	200	400	400
YS2	70	70	90	90	130	120
YS3	80	90	100	100	150	150
YS4	160	150	200	200	600	580

Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere iki yöntemle 1.sıkıştırma enerjisi (belirlenen sıkılık), 2.sıkıştırma enerjisi (standart proktor sıkılığı) ve 3.sıkıştırma enerjisi (modifiye proktor sıkılığı) konsolidasyon deney sonuçları doğrultusunda her numune için hesaplanan ön konsolidasyon basınçların büyük oranda aynı çıktığı gözlenmiştir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde ve tekrarlı kesme kutusu deneyinde numunelere uygulanmak üzere bu iki yöntem ile elde edilen sonuçlar içerisinden seçilmiş ön konsolidasyon basıncı değerleri çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Numunelerin iki yöntem ile elde edilen sonuçlar içerisinden seçilen ön konsolidasyon değerleri.

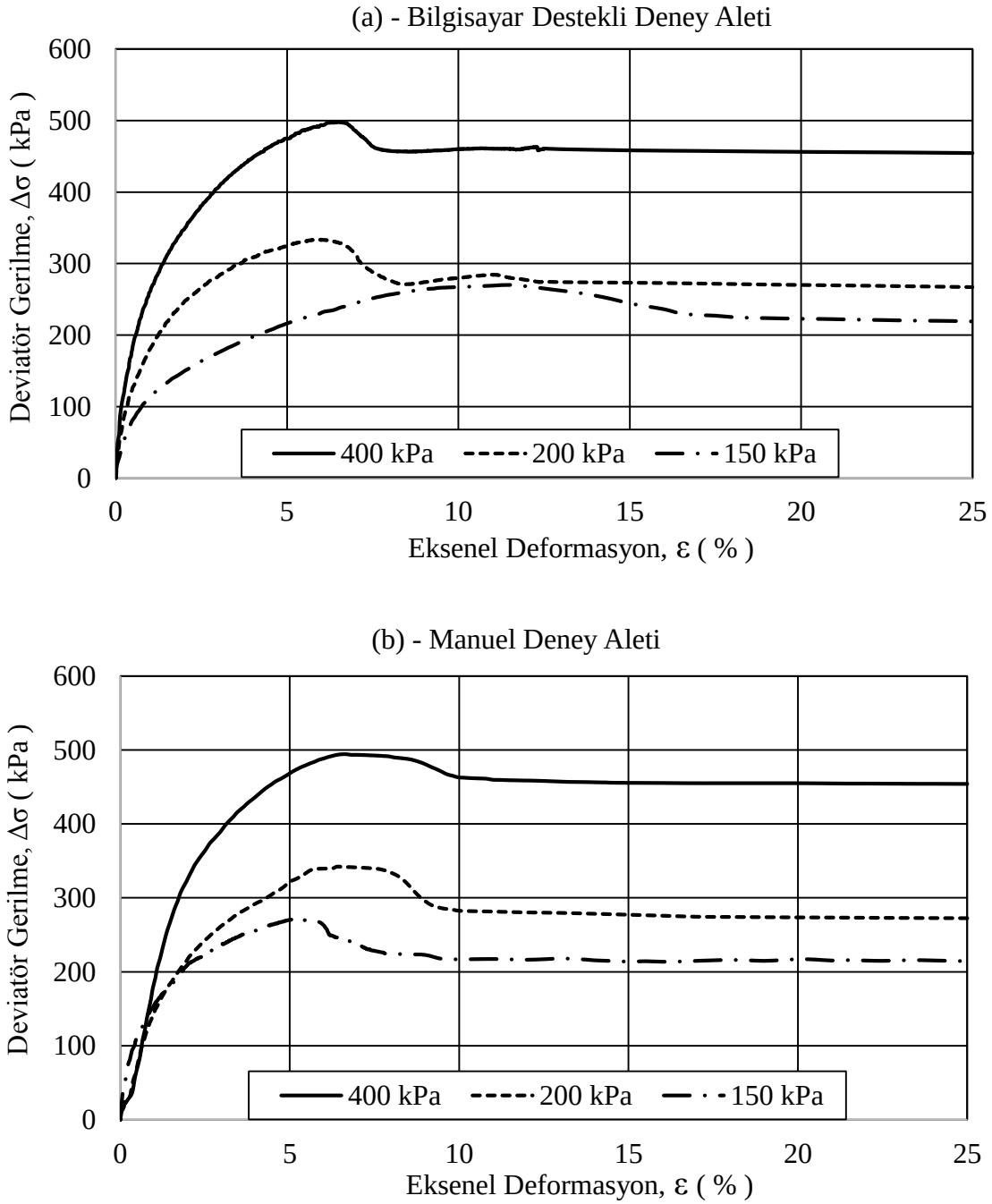
Numune No	Ön Konsolidasyon Basıncı - σ'_0 (kPa)		
	1.Sıkıştırma Enerjisi	2.Sıkıştırma Enerjisi	3.Sıkıştırma Enerjisi
YS1	150	200	400
YS2	70	90	130
YS3	80	100	150
YS4	150	200	600

Çizelge 4.7'de belirtilen ön konsolidasyon basıncı değerleri, numunelerin konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinde üzerlerine uygulanacak çevre basıncı değerlerini oluşturmaktadır.

4.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri üç sıkıştırma enerjisinde suya doygun halde ve suya doygun olmayan tabi halde maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerindeki değişimin incelenmesi amacıyla konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Burada suya doygun olmayan durumda numunelerin belirlenen ön konsolidasyon basınçları altında konsolide olmasına izin verilmiş; fakat bilgisayar destekli deney aygıtı yardımıyla doygunluk aşaması atlanmıştır. Burada numunelerin ön konsolidasyon basınçları altında konsolide olmasına izin verilerek hazırlandıkları andaki koşullar korunmuş olup aynı zamanda kayma mukavemeti parametrelerine suya doygunluğun etkisinin incelenmesine olanak sağlamıştır. Her numune için üç gerilme zarfı ile gerçekleştirilen deneyler ile hata payını azaltmak amaçlanmıştır. Çalışmada bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti ilk defa kullanıldığından, edilen sonuçların diğer üç eksenli basınç deney aletleri ile elde edilen sonuçlarla örtüşüp örtüşmediğini görebilmek amacıyla YS1 numunesi aynı şartlarda üç enerji seviyesinde hazırlanıp, aynı basınçlar altında iki farklı deney aletinde CD deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçların büyük oranda benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

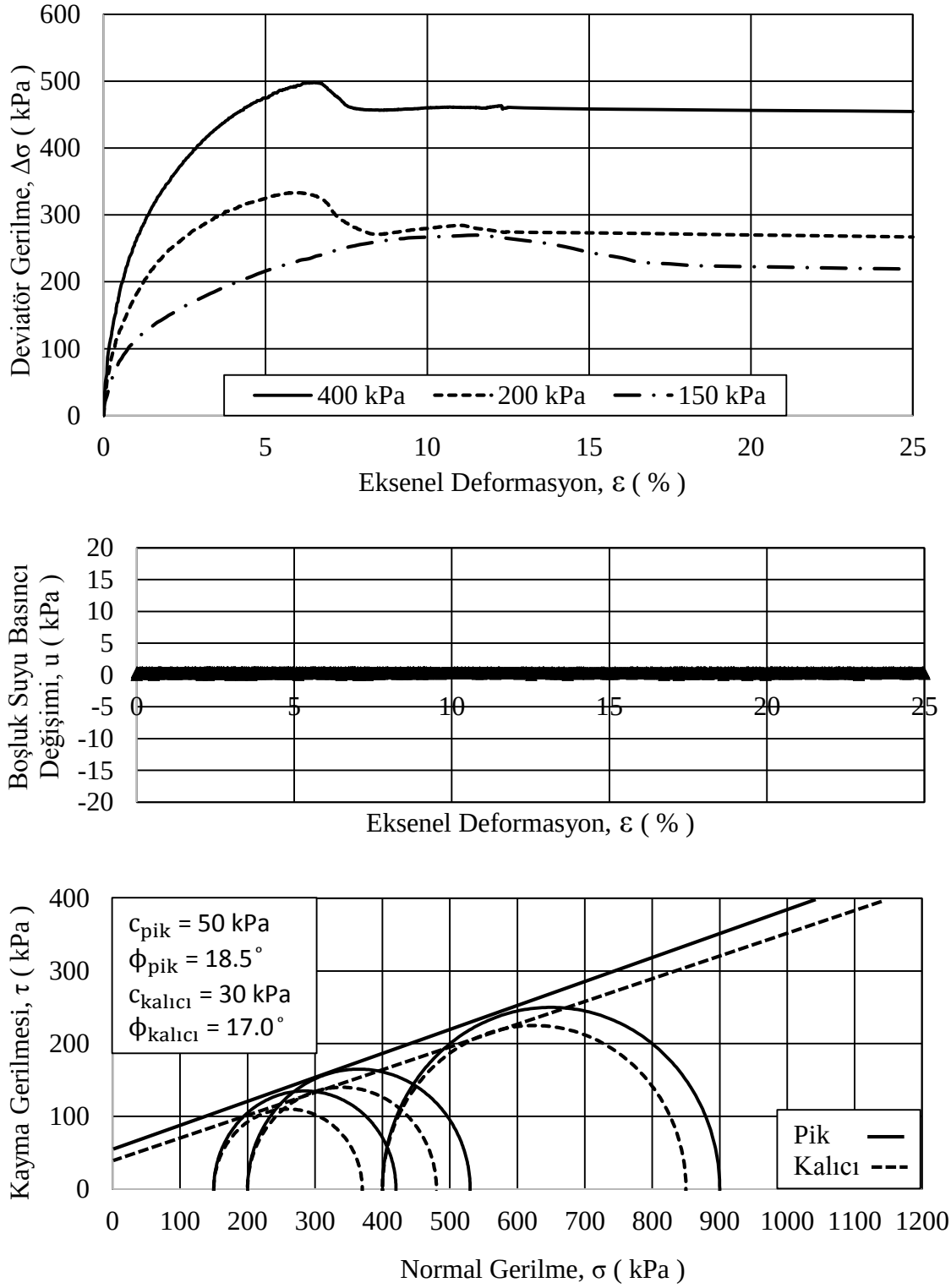
Şekil 4.14'de YS1 numunesinin üç gerilme, bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aleti ve manuel üç eksenli basınç deney aletinde aynı şartlarda yapılmış CD deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.14 : YS1 numunesi iki deney aleti sonuçlarının kıyaslanması

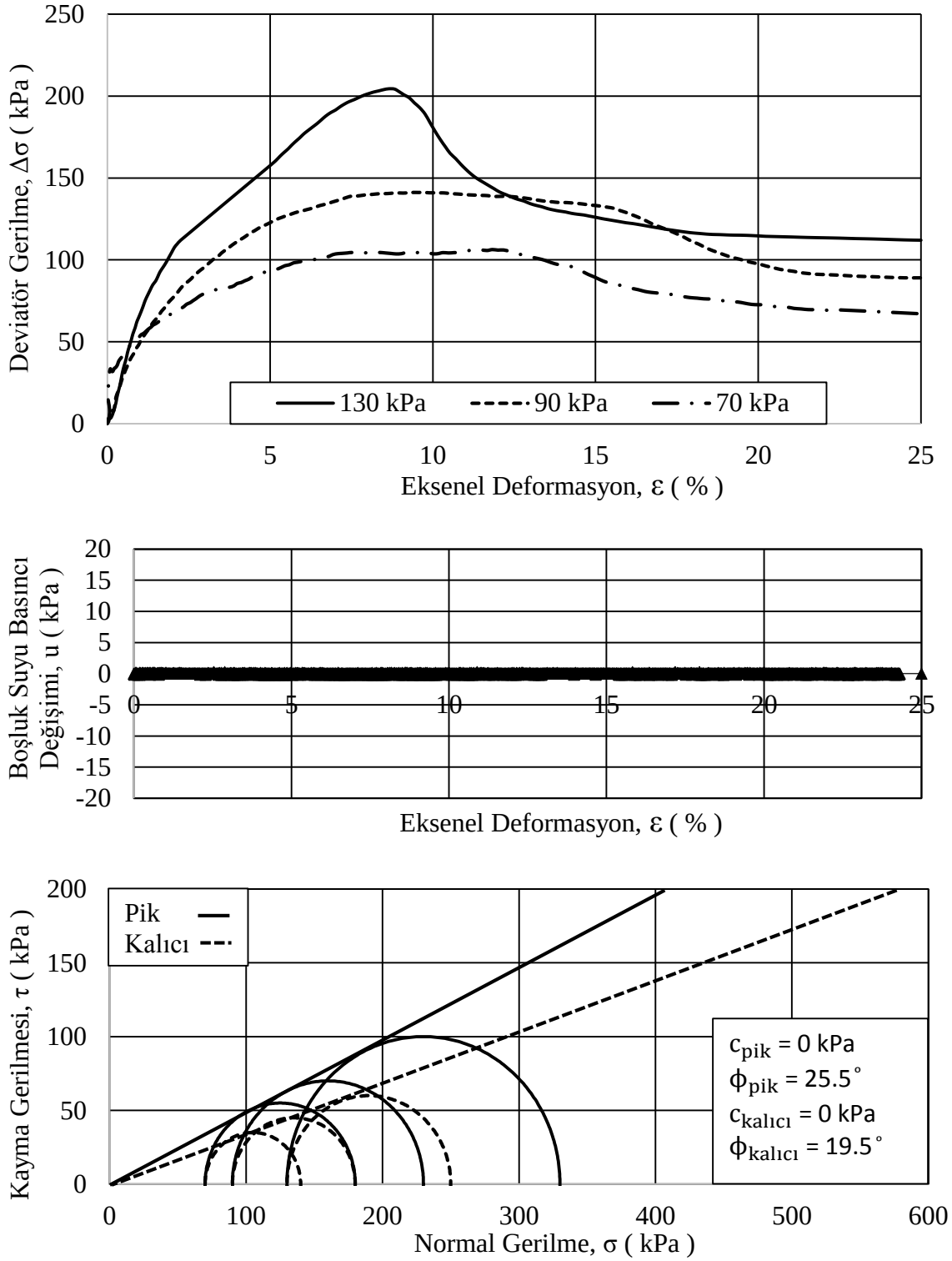
Şekil 4.14'de görüldüğü üzere iki farklı deney aletinde (a ve b) aynı numune üzerinde aynı şartlarda gerçekleştirilen deney sonuçlarının oldukça yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda deney aletlerinin farklılığından meydana gelebilecek hata payının kabul edilebilir oranda olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 4.15'de YS1 numunesinin üç sıkıştırma enerjisi için 150kPa, 200kPa ve 400kPa ön konsolidasyon basınçları altında yükleme yapılarak, suya doygun halde (S=%100) gerçekleştirilmiş konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçları görülmektedir.



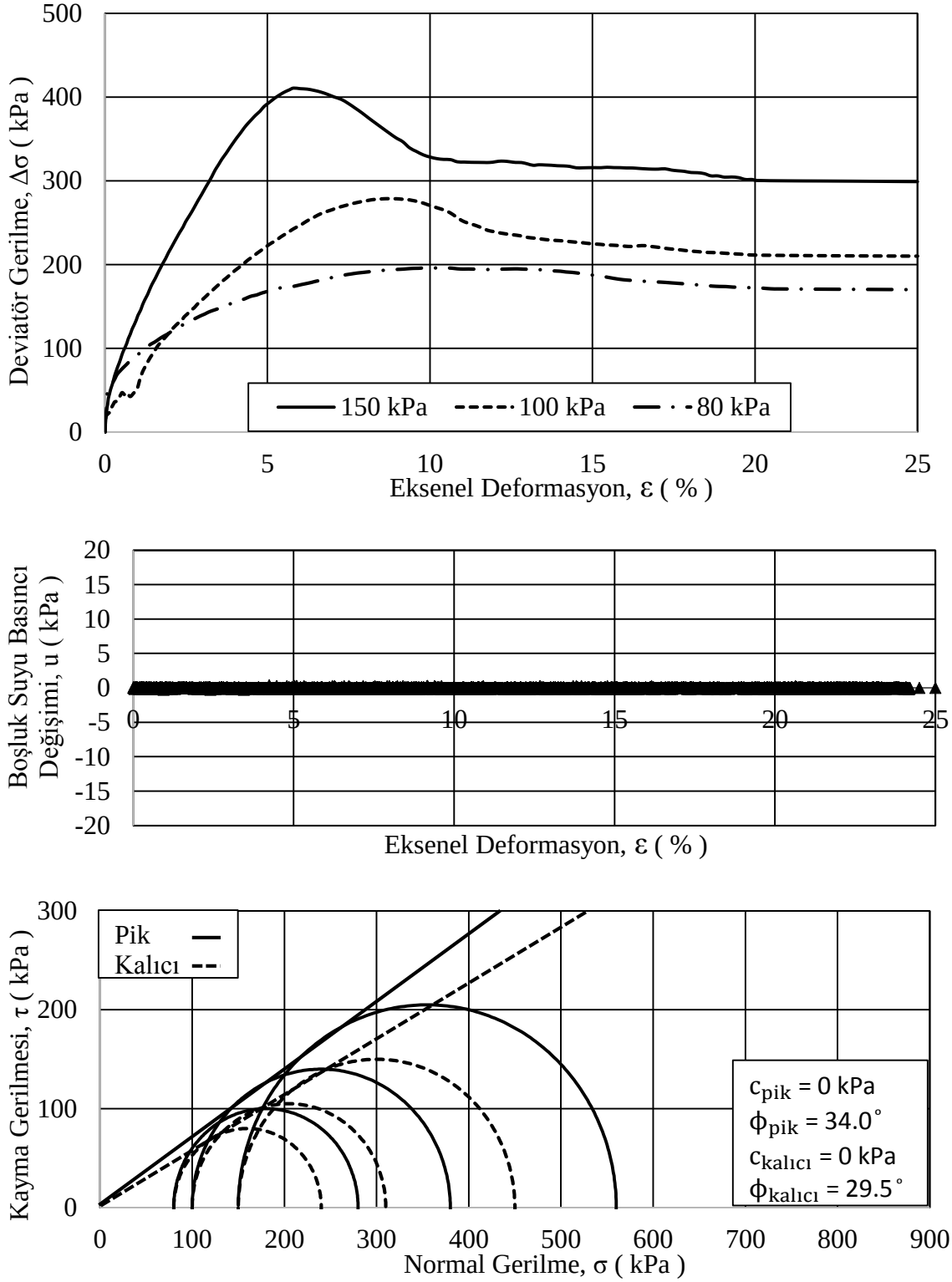
Şekil 4.15 : YS1 numunesi CD deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.16'da YS2 numunesinin üç sıkıştırma enerjisi için 70kPa, 90kPa ve 130kPa ön konsolidasyon basınçları altında yükleme yapılarak, suya doygun halde (S>=100) gerçekleştirilmiş konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçları görülmektedir.



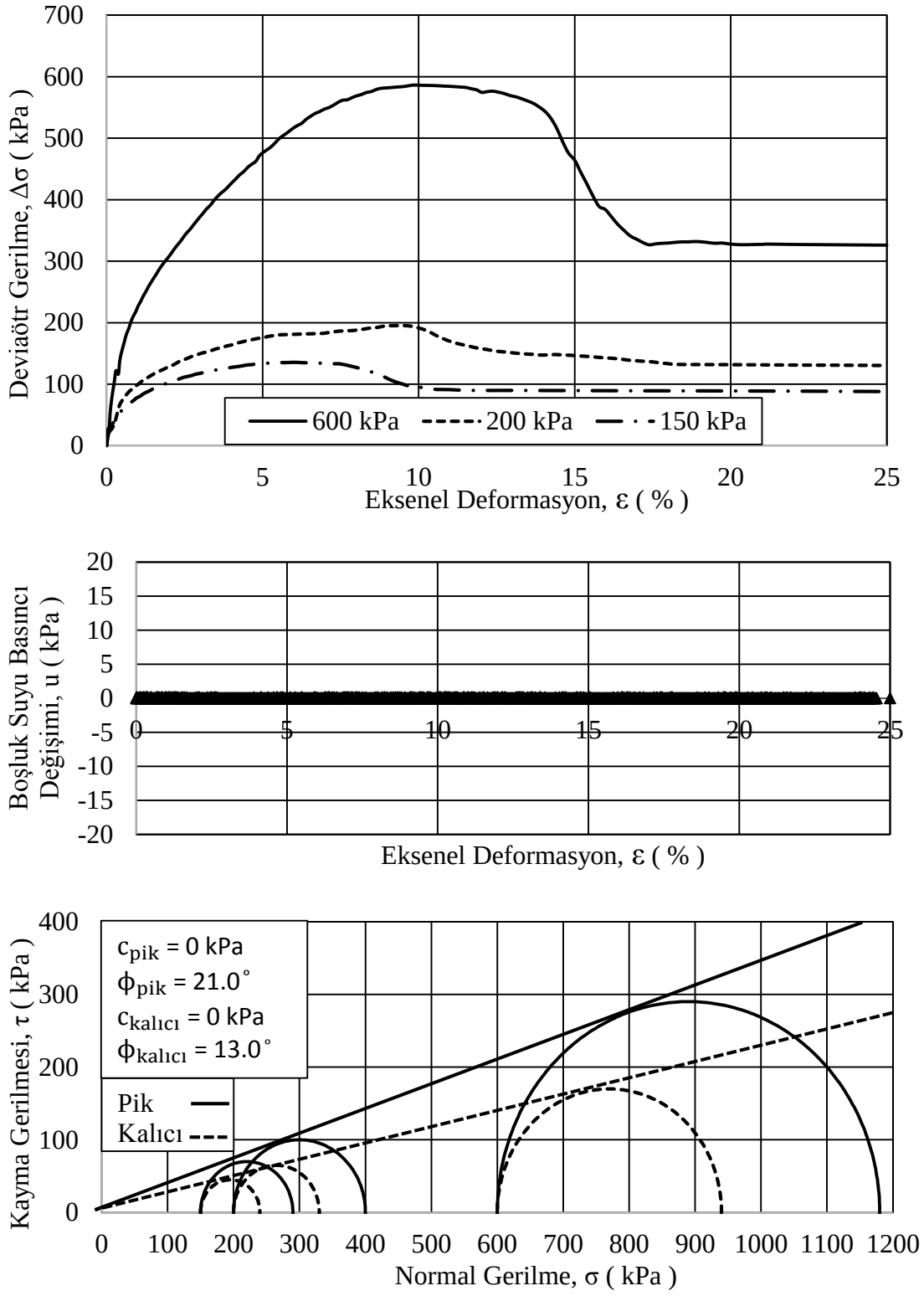
Şekil 4.16 : YS2 numunesi CD deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.17'de YS3 numunesinin üç sıkıştırma enerjisi için 80kPa, 100kPa ve 150kPa ön konsolidasyon basınçları altında yükleme yapılarak, suya doygun halde (S=%100) gerçekleştirilmiş konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçları görülmektedir.



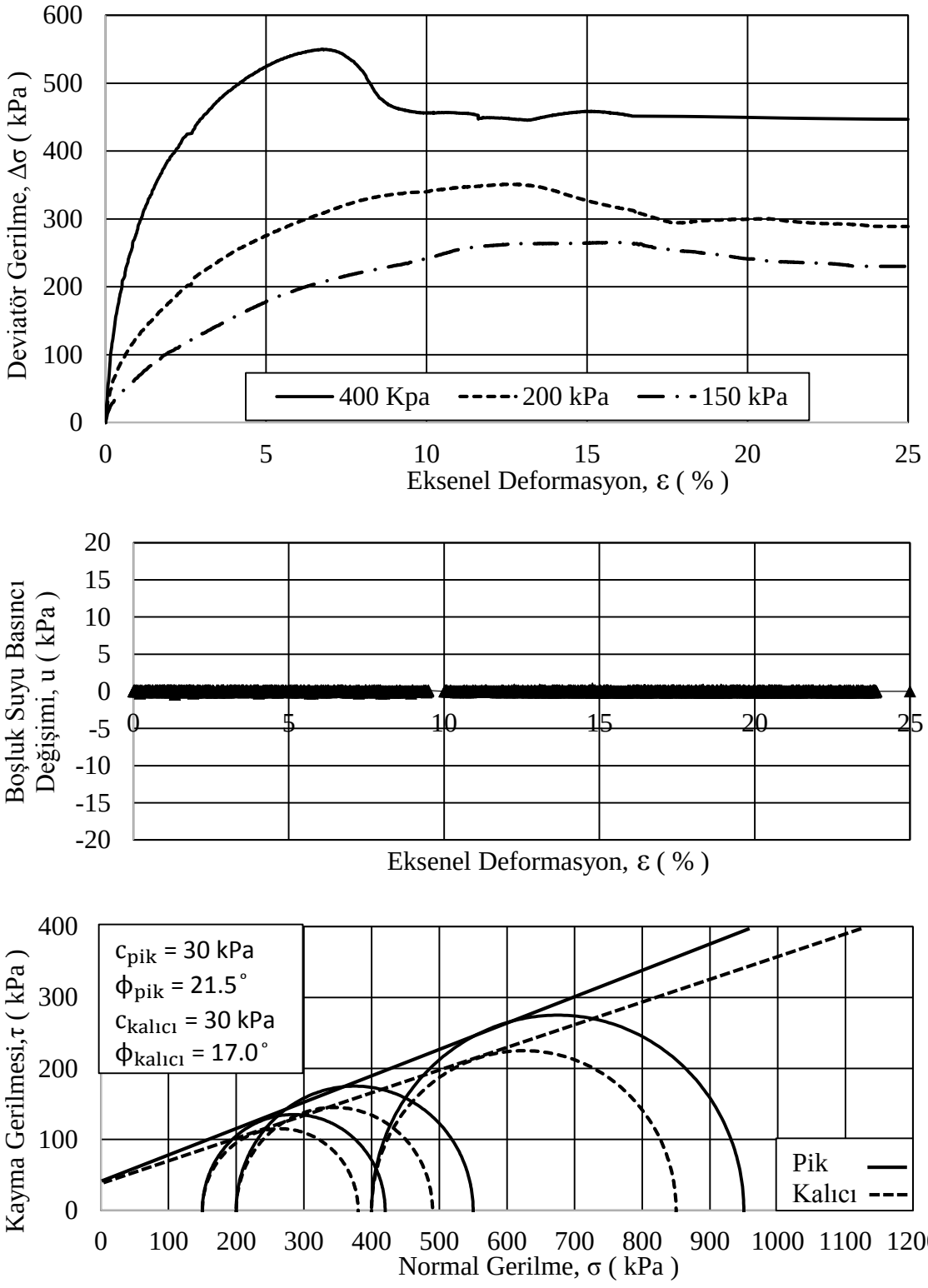
Şekil 4.17 : YS3 numunesi CD deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.18'de YS4 numunesinin üç sıkıştırma enerjisi için 150kPa, 200kPa ve 600kPa ön konsolidasyon basınçları altında yükleme yapılarak, suya doygun halde (S=%100) gerçekleştirilmiş konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçları görülmektedir.



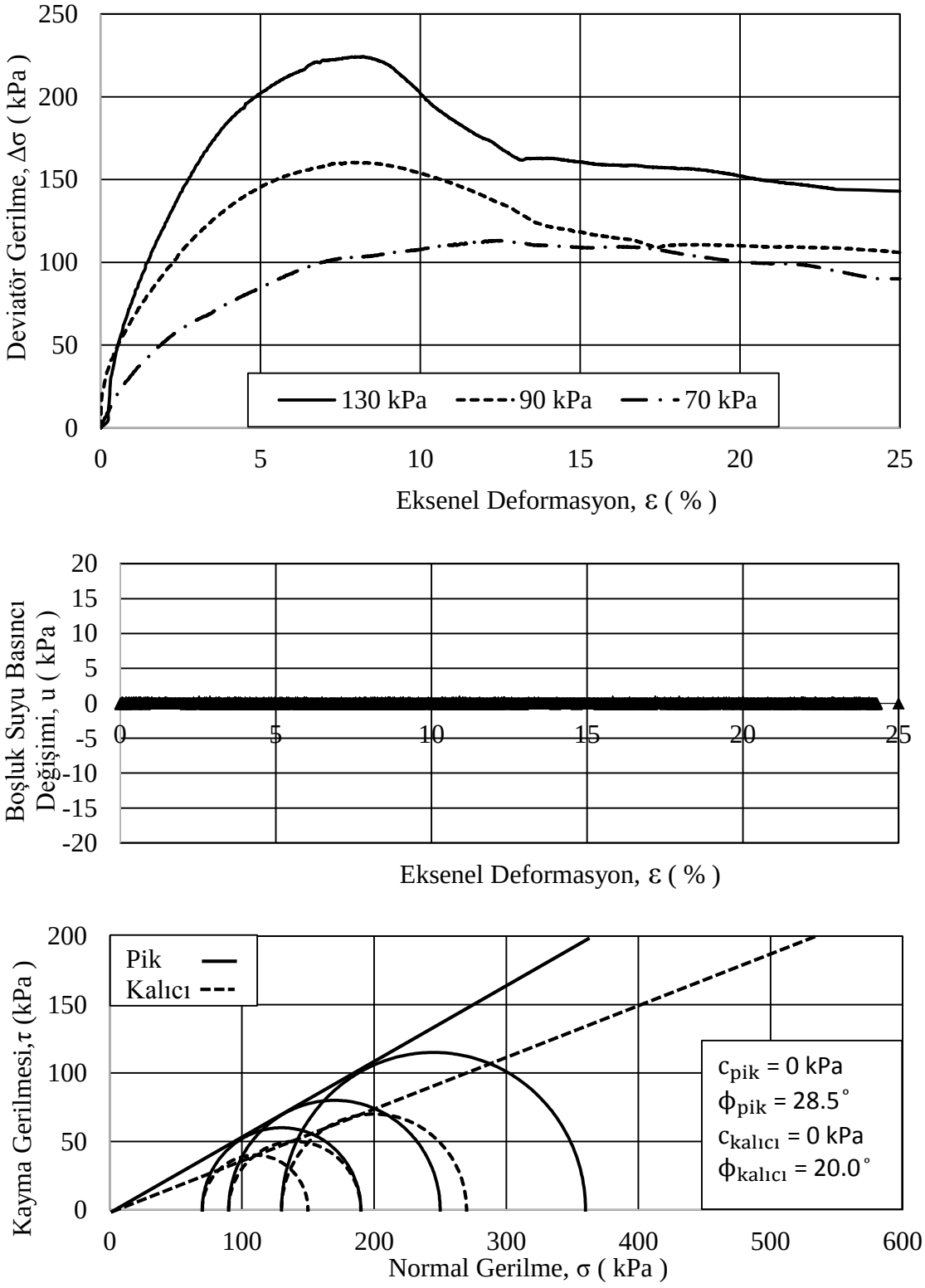
Şekil 4.18 : YS4 numunesi CD deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.19'da YS1 numunesinin üç sıkıştırma enerjisinde, 150 kPa, 200 kPa ve 400 kPa ön konsolidasyon basınçları altında, bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aletinde suya doygun olmayan durumda (optimum su muhtevalarındaki doygunluk oranlarında) gerçekleştirilen CD deney sonuçları görülmektedir.



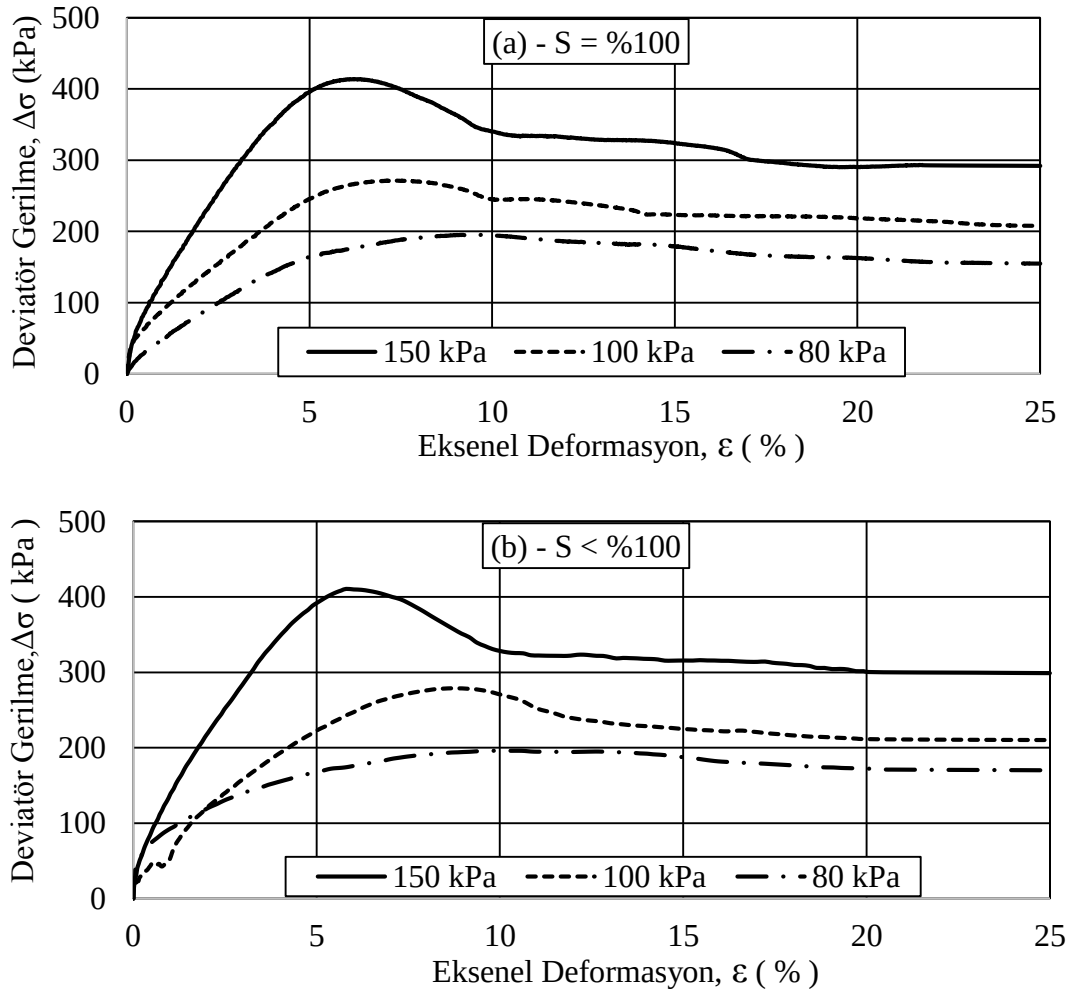
Şekil 4.19 : YS1 numunesi CD deney sonuçları (S<%100)

Şekil 4.20'de YS2 numunesinin üç sıkıştırma enerjisinde, 70 kPa, 90 kPa ve 130 kPa ön konsolidasyon basınçları altında, bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aletinde suya doygun olmayan durumda (optimum su muhtevalarındaki doygunluk oranlarında) gerçekleştirilen CD deney sonuçları görülmektedir.



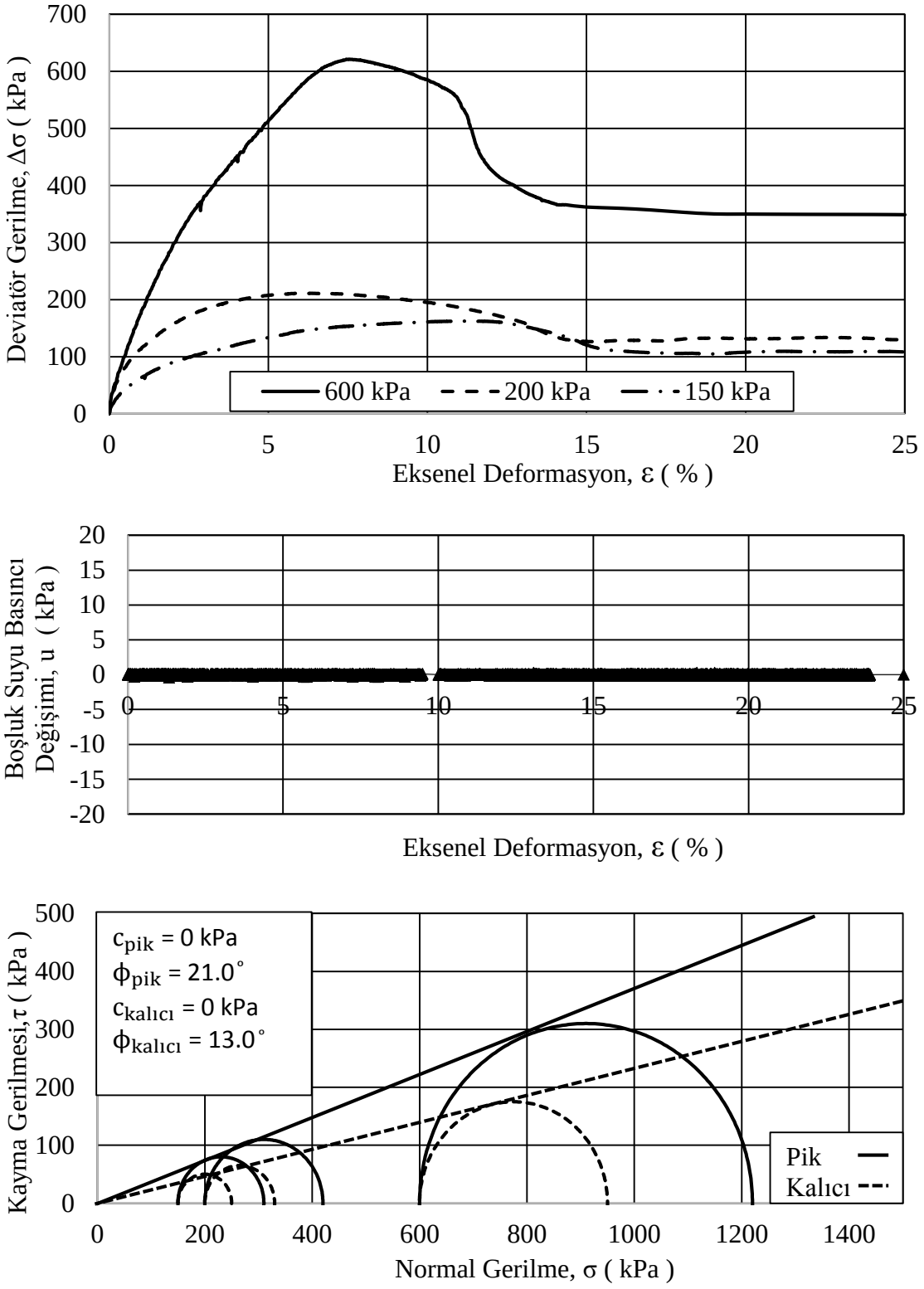
Şekil 4.20 : YS2 numunesi CD deney sonuçları (S<%100)

YS3 numunesinin üç enerji seviyesinde, 80 kPa, 100 kPa ve 150 kPa ön konsolidasyon basınçları altında, bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aletinde suya doygun olmayan durumda gerçekleştirilen CD deney sonuçları ile suya doygun durumda gerçekleştirilen CD deney sonuçları büyük oranda benzer çıktığından dolayı kayma mukavemeti parametreleri tabi haldeki doygunluk için belirlenememiştir. YS3 numunesinin manuel üç eksenli deney aletiyle yapılan CD deneyleri esnasında doygunluk aşamasını çok hızlı tamamladığı gözlenmiş, numuneler konsolidasyon tamamlanana kadar geçen süre içerisinde doygunluğa ulaşmıştır. Bilgisayar destekli üç eksenli deney aletiyle yapılan CD deneyleri esnasında numunelerin konsolide olurken verilen çok düşük ters basınçlarla dahi suya doygun hale geldiği görülmüştür. Bu sebeplere bağlı olarak YS3 numunesi için kendi doygunluk oranında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılamamıştır. Şekil 4.21'de YS3 numunesi için suya doygun ve kendi doygunluğunda yapılmış CD deney sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.21 : YS3 numunesi doygun ve doygun olmayan durumlar

Şekil 4.22'de YS4 numunesinin üç sıkıştırma enerjisinde, 150 kPa, 200 kPa ve 600 kPa ön konsolidasyon basınçları altında, bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney aletinde suya doygun olmayan durumda (optimum su muhtevalarındaki doygunluk oranlarında) gerçekleştirilen CD deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.22 : YS4 numunesi CD deney sonuçları (S<%100)

Çizelge 4.8'de suya doygun ve suya doygun olmayan durum için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen kayma mukavemeti parametreleri özetlenmiştir.

Çizelge 4.8 : Suya doygun ve doygun olmayan durumlar için elde edilen kayma mukavemeti parametreleri.

Numune No	S = %100				S < %100			
	Maksimum		Kalıcı		Maksimum		Kalıcı	
	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)
YS1	18.5	50	17.0	30	21.5	30	17.0	30
YS2	25.5	0	19.5	0	28.5	0	20.0	0
YS3	34.0	0	29.5	0	34.0	0	29.5	0
YS4	19.0	0	13.0	0	21.0	0	13.0	0

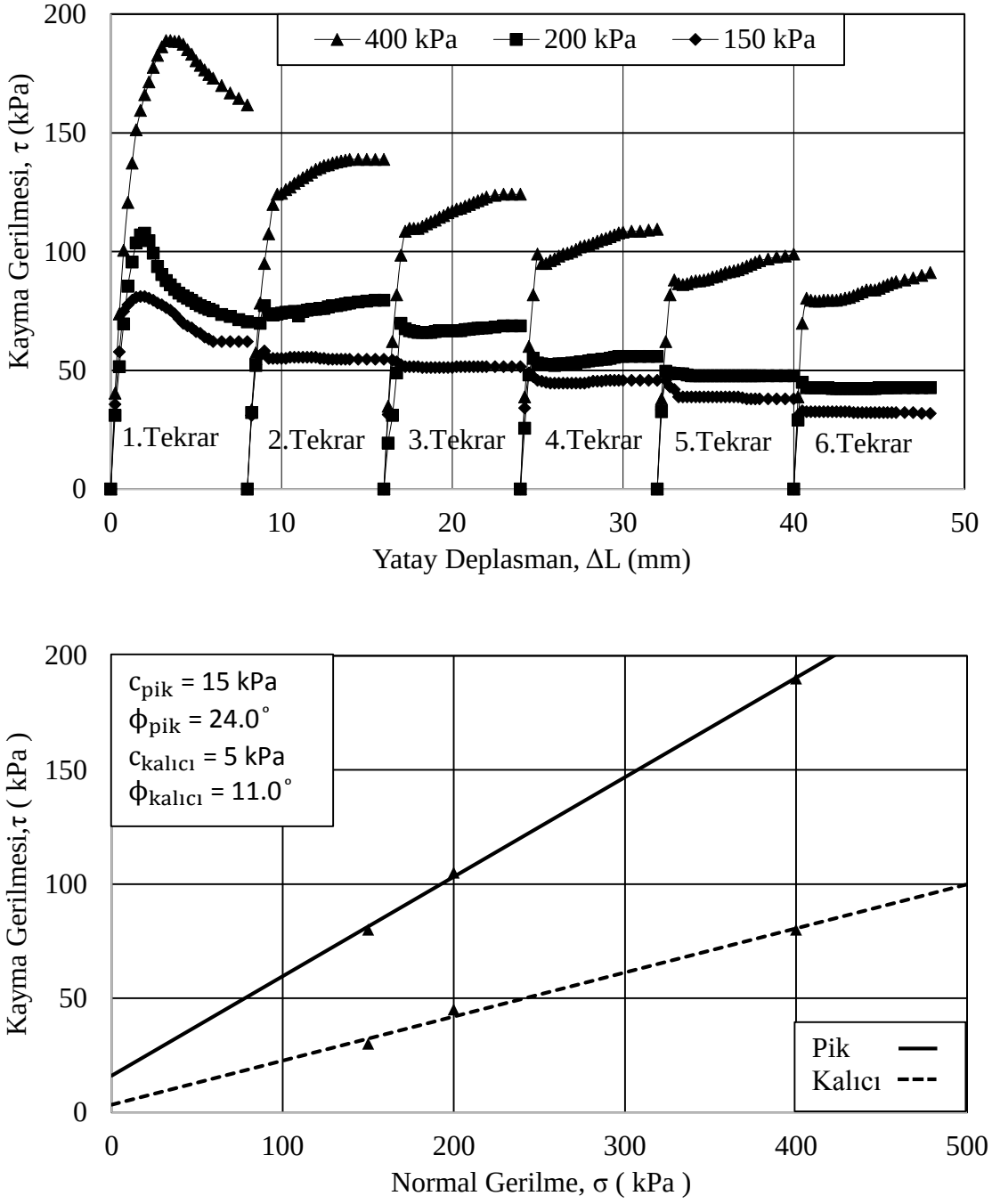
4.4 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri için suya doygun durumda tekrarlı kesme kutusu deneyleri her numune için ortalama 5 çevrim olacak şekilde yapılmıştır. Numunelerin tabi doygunluklarında tekrarlı kesme kutusu deney sistemiyle kayma mukavemeti parametreleri elde edilmek istenmiş; fakat doygun olmayan durumda istenilen kesme yüzeyi sağlanamadığı için mühendislik açıdan anlamlı sonuçlar elde edilememiştir. Şekil 4.23'deYS2 numunesi için doygun olmayan durumda (a) ve doygun durumda (b), 2.sıkıştırma enerjisinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyi sonrası kesilme yüzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : YS2 numunesi TKK deneyi kesilme yüzeyleri

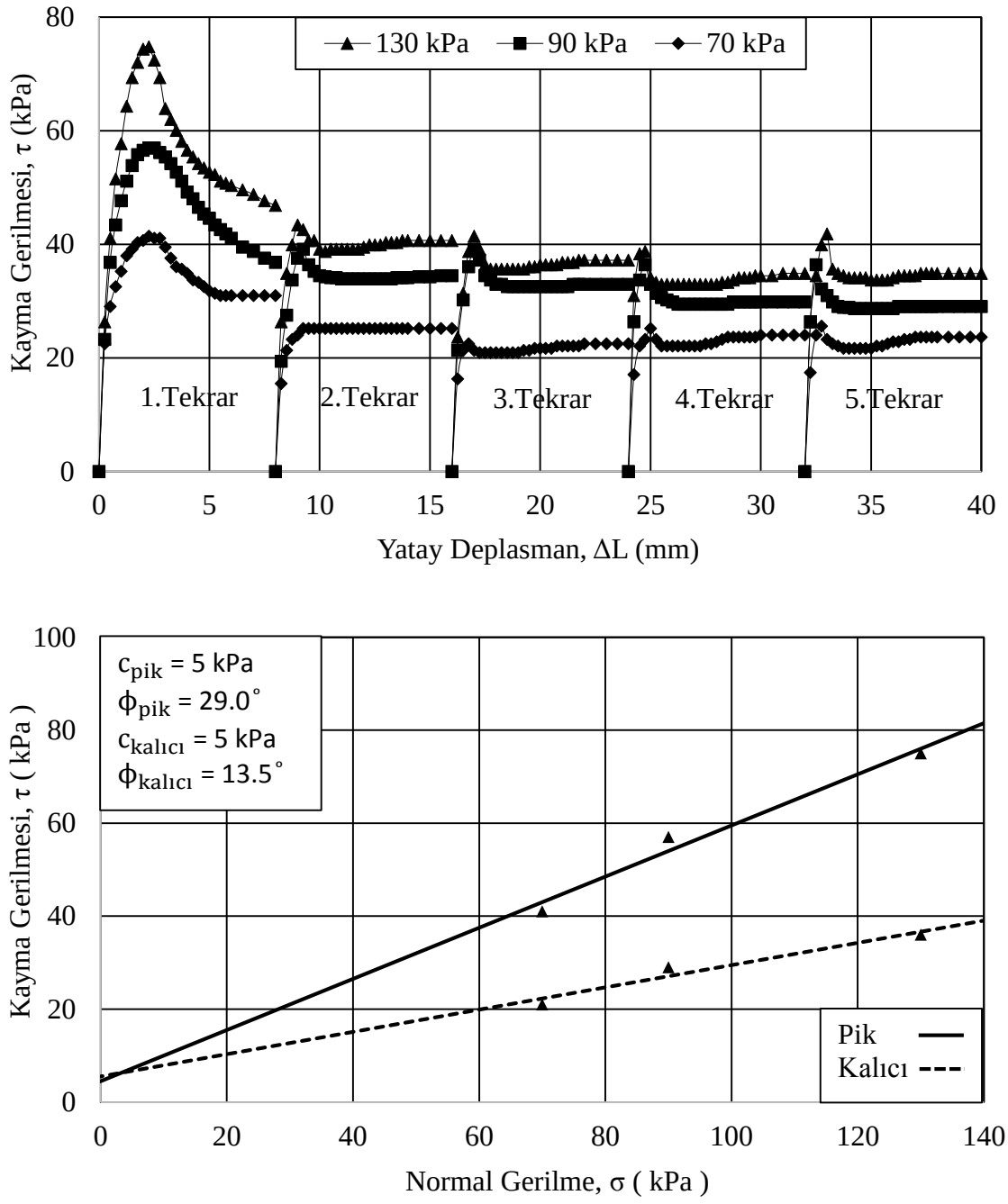
Şekil 4.24'de YS1 numunesinin suya doygun halde, hazırlandığı üç sıkıştırma enerjisinde, 150 kPa, 200 kPa ve 400 kPa ön konsolidasyon basınçları altında yüklemeye maruz bırakılarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.24 : YS1 numunesi TKK sonuçları (S=%100)

Şekil 4.24'de görüldüğü üzere YS1 numunesi için doygun durumda, artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen sabit bir mukavemet değerine (kalıcı kayma mukavemeti) ulaşabilmek için 6 tekrar yapılmıştır.

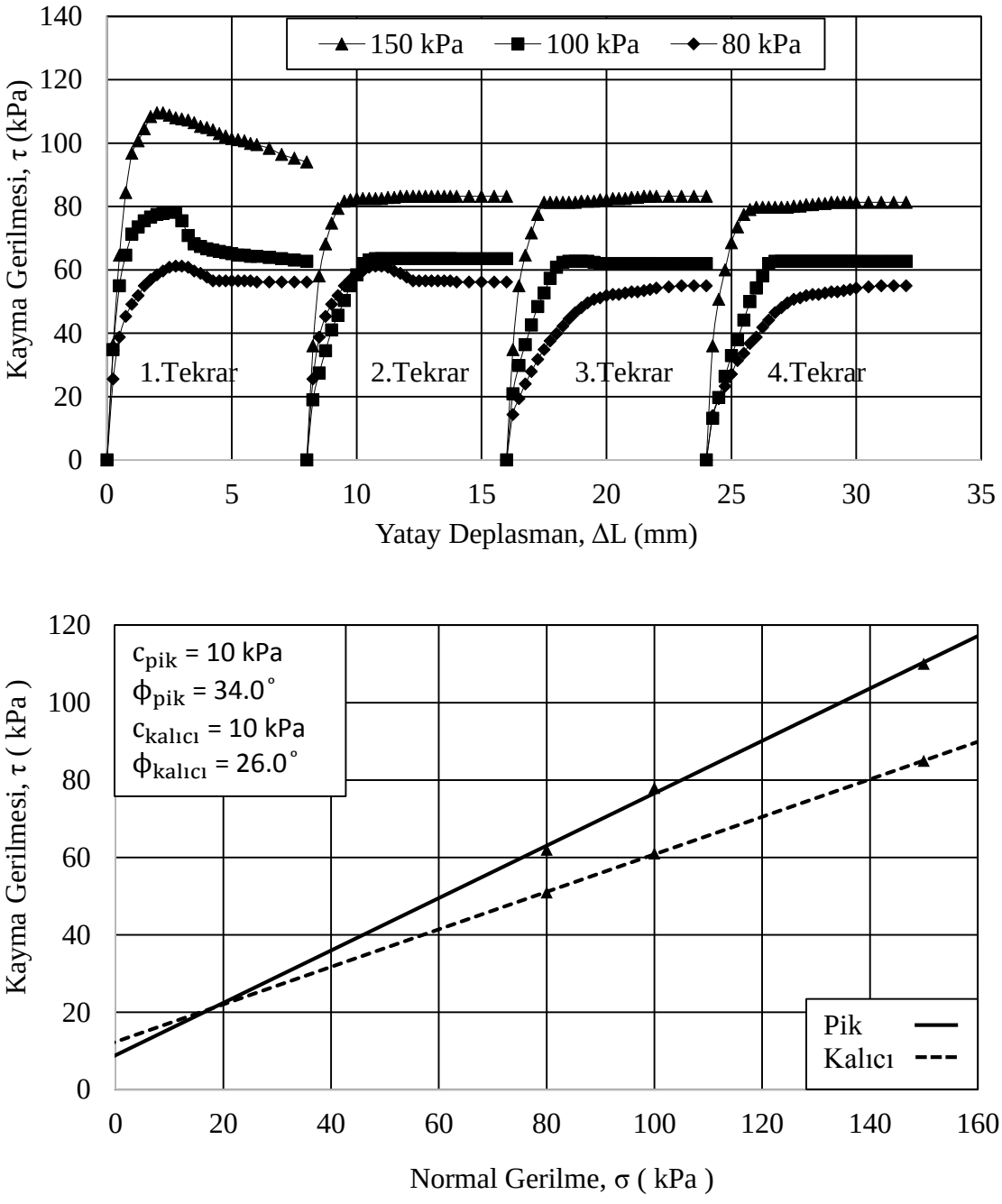
Şekil 4.25'de YS2 numunesinin suya doygun halde, hazırlandığı üç sıkıştırma enerjisinde, 70 kPa, 90 kPa ve 130 kPa ön konsolidasyon basınçları altında yüklemeye maruz bırakılarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.25 : YS2 numunesi TKK deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.25'de görüldüğü üzere YS2 numunesi için doygun durumda, artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen sabit bir mukavemet değerine (kalıcı kayma mukavemeti) ulaşabilmek için 5 tekrar yapılmıştır.

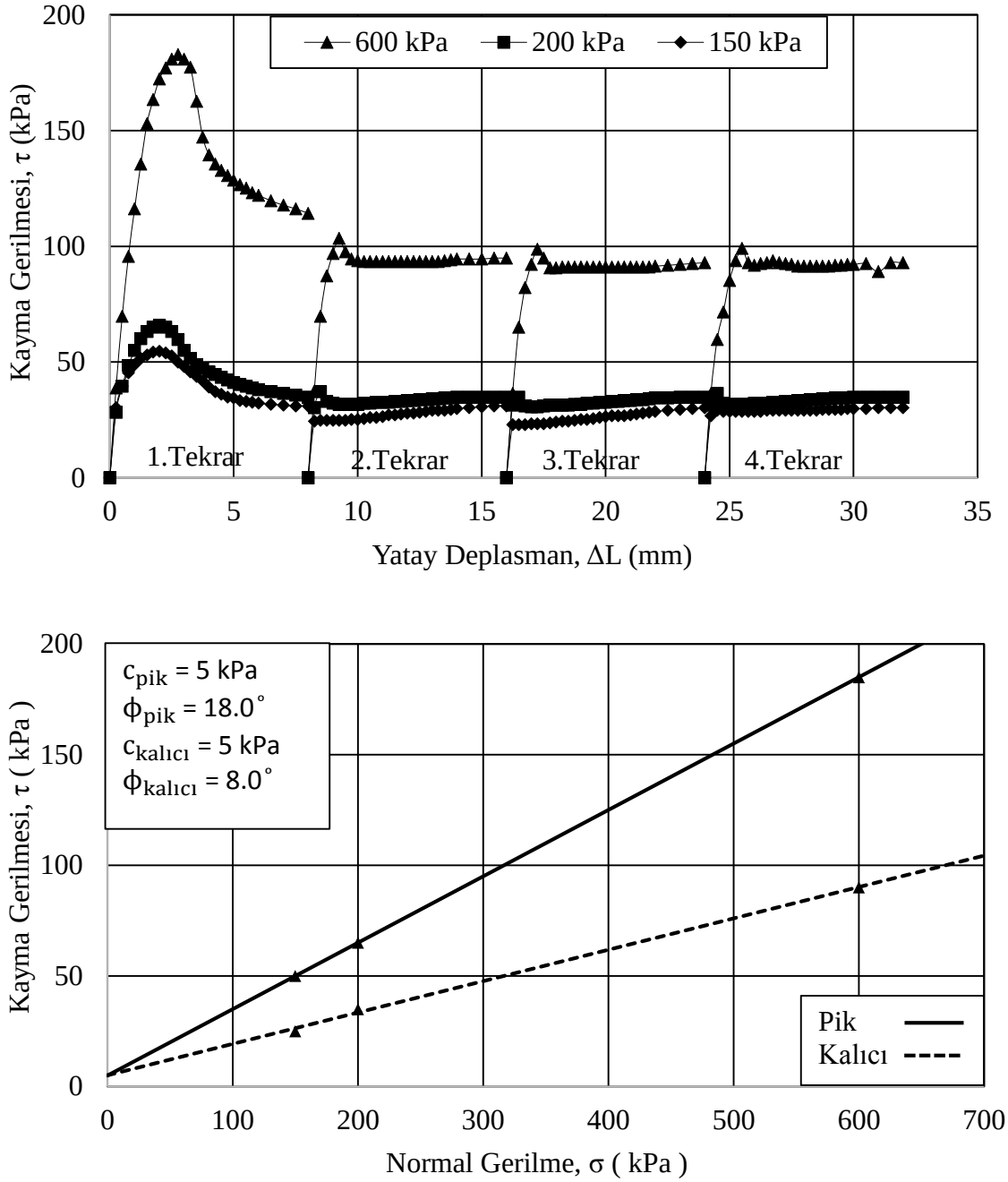
Şekil 4.26'da YS3 numunesinin suya doygun halde, hazırlandığı üç sıkıştırma enerjisinde, 80 kPa, 100 kPa ve 150 kPa ön konsolidasyon basınçları altında yüklemeye maruz bırakılarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.26 : YS3 numunesi TKK deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.26'da görüldüğü üzere YS3 numunesi için doygun durumda, artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen sabit bir mukavemet değerine (kalıcı kayma mukavemeti) ulaşabilmek için 4 tekrar yapılmıştır.

Şekil 4.27'de YS4 numunesinin suya doygun halde, hazırlandığı üç sıkıştırma enerjisinde, 150 kPa, 200 kPa ve 600 kPa ön konsolidasyon basınçları altında yüklemeye maruz bırakılarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyinin sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.27 : YS4 numunesi TKK deney sonuçları (S=%100)

Şekil 4.27'de görüldüğü üzere YS4 numunesi için doygun durumda, artan deformasyon seviyesiyle değişmeyen sabit bir mukavemet değerine (kalıcı kayma mukavemeti) ulaşabilmek için 4 tekrar yapılmıştır.

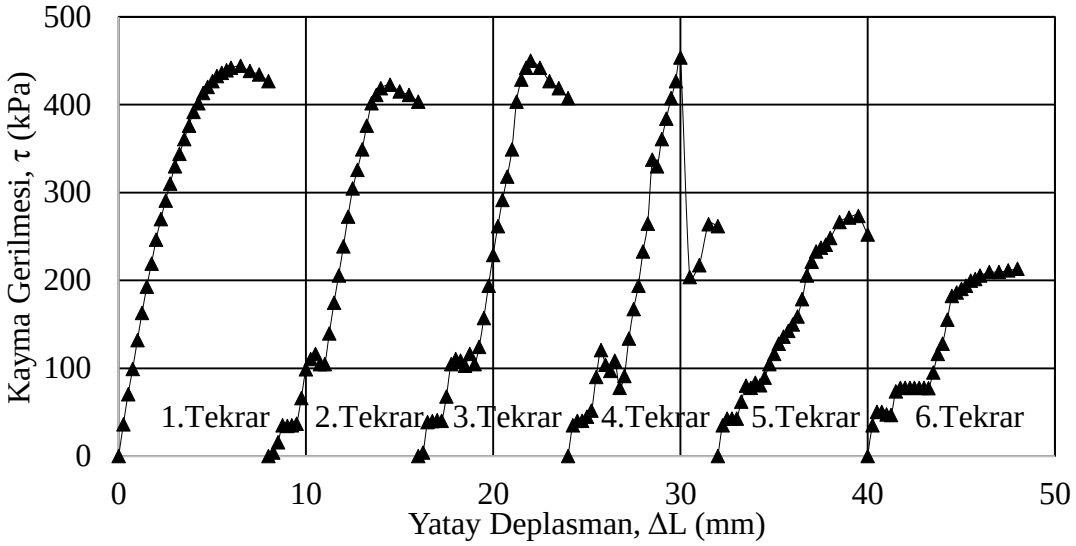
Çizelge 4.9'da YS1, YS2, YS3 ve YS4 numuneleri üzerinde suya doygun durumda yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinden ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.9 : Suya doygun durum için CD deneylerinden ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri.

Numune No	S = %100							
	Üç Eksenli Basınç Deneyi				Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi			
	Maksimum		Kalıcı		Maksimum		Kalıcı	
	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)
YS1	18.5	50	17.0	30	24.0	15	11.0	5
YS2	25.5	0	19.5	0	29.0	5	13.5	5
YS3	34.0	0	29.5	0	34.0	10	26.0	10
YS4	19.0	0	13.0	0	18.0	5	8.0	5

Çizelge 4.9'da görüldüğü üzere tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarına göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi olarak tekrarlı kesme kutusu deneylerinde üç eksenli basınç deneylerine göre çok daha ileri deformasyon seviyelerine gidilebilmesi gösterilebilir. Üç eksenli basınç deneyleri için deformasyon sınırı %25 iken tekrarlı kesme kutusu deneylerinde bu sınır %50 seviyelerine kadar gelebilmektedir.

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde ikinci aşama olarak, numunelerin susuz ortamda kendi doygunluklarında ön konsolidasyon basınçları altında konsolide edilip, kesilmesi denenmiştir. YS1 ve YS2 numuneleri üzerinde 2.sıkıştırma enerjisinde bu işlem denenmiş; fakat elde edilen sonuçların kararsız olduğu gözlenmiştir. Bunun en önemli sebebi, numunelerin %95 doygunluğa ulaşmadan kendi doygunluk oranlarında kesilmeye çalışılmasından ötürü istenilen kesme yüzeyinin sağlanamamasıdır. Suyun olmayışından dolayı kesme yüzeyinde cilalanma etkisinin olmayışı ve buna bağlı olarak danelerin kesme yüzeyine paralel olarak yönlenmeyişi kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin bulunmasını olanaksız kılmıştır. YS1 numunesi üzerinde,2.sıkıştırma enerjisinde, numunenin kendi doygunluk oranında yapılan tekrarlı kesme kutusu sonuçları şekil 4.28'de gösterilmiştir.



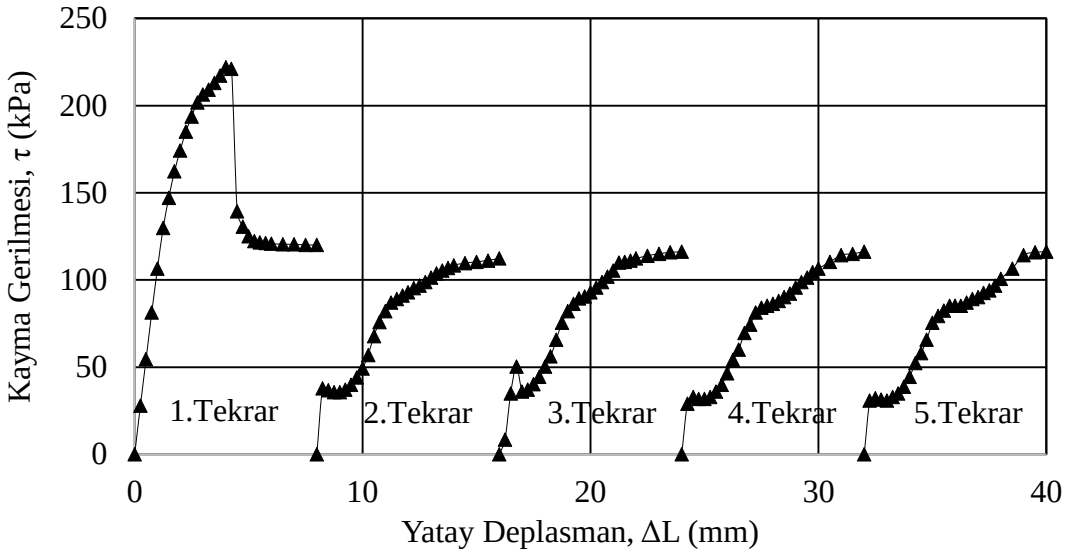
Şekil 4.28 : YS1 numunesi 2.sıkıştırma enerjisi TKK deney sonucu (S<%100, 200 kPa)

Şekil 4.28'de görüldüğü üzere YS1 numunesi üzerinde 6 tekrar olacak şekilde, 2.sıkıştırma enerjisi için kendi doygunluğunda yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonucu kararsız bir yapıdadır. Şekil 4.29'de YS1 numunesinin 2.sıkıştırma enerjisinde, 200kPa ön konsolidasyon basıncı altında, kendi doygunluk oranında, kesme yüzeyinde çeşitli noktalarda oluşan girinti ve çıkıntılar görülmektedir. İstenilen kayma yüzeyinin sağlananaması kayma mukavemeti değerlerini etkilemiştir.



Şekil 4.29 : YS1 TKK deney sonrası kesme yüzeyi (S<%100)

YS2 numunesi üzerinde, 2.sıkıştırma enerjisinde, numunenin kendi doygunluk oranında yapılan tekrarlı kesme kutusu sonuçları şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30 : YS2 numunesi 2.sıkıştırma enerjisi TKK deney sonucu (S<%100, 90 kPa)

Şekil 4.30'da YS2 numunesi üzerinde kendi doygunluğunda yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonucu görülmektedir. Bu sonuç YS1 numunesi sonucuna göre kısmen daha anlamlı olarak görünse de YS2 numunesinin deney sonrası kesilme yüzeyinin görünüme bakıldığında sonuçların anlamsız olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.31'de YS2 numunesinin kendi doygunluğundaki tekrarlı kesme kutusu deneyi sonrası kesilme yüzeyi gösterilmiştir.



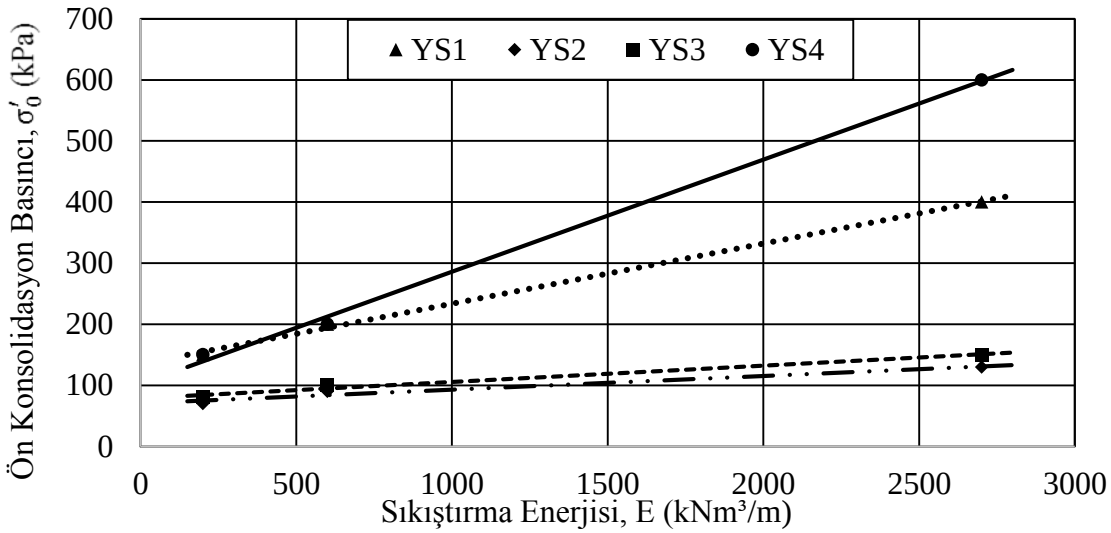
Şekil 4.31 : YS2 TKK deney sonrası kesme yüzeyi (S<%100)

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında endeks özellikleri belirlenen numuneler üzerinde üç sıkıştırma enerjisinde suya doygun ve doygun olmayan durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmış, maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Kullanılan numunelerin farklı sıkıştırma enerjilerinde endeks özelliklerine göre ön konsolidasyon basınçlarının değişimi, suya doygun ile doygun olmayan durum arasındaki kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi ile ilgili korelasyonlar önerilmiştir. Üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1 Farklı Sıkıştırma Enerjilerindeki Ön Konsolidasyon Basıncı Değişimi

YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin 1.sıkıştırma enerjisinde (belirlenen sıkılık), 2.sıkıştırma enerjisinde (standart proktor sıkılığı) ve 3.sıkıştırma enerjisinde (modifiye proktor sıkılığı) ön konsolidasyon basınçlarının sıkıştırma enerjileri ile değişimi şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Numunelerin ön konsolidasyon basıncı - sıkıştırma enerjisi değişimleri

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere her numune için doğrusal regresyon analizi yardımıyla hesaplanan ön konsolidasyon basıncı-sıkıştırma enerjisi değişimi için elde edilen bağıntılar çizelge 5.1'de verilmiştir.

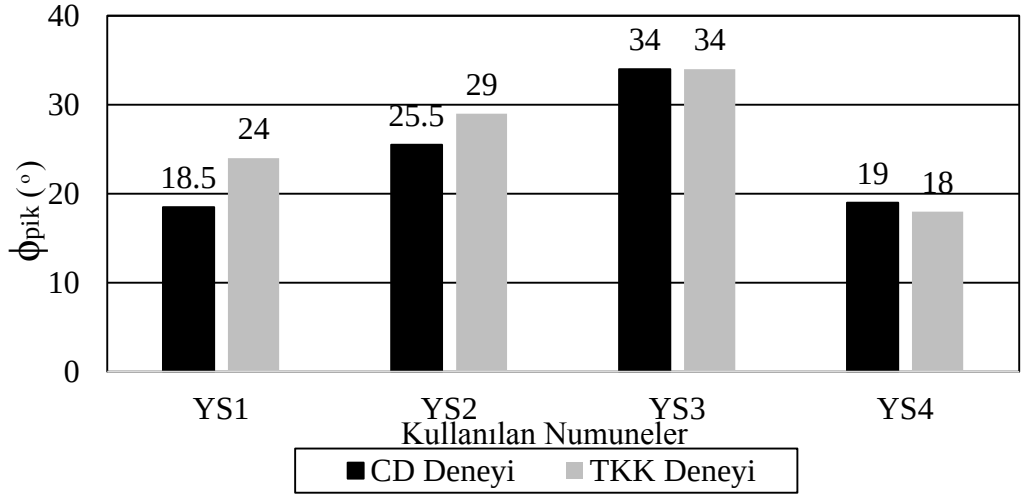
Çizelge 5.1 : Numunelerin üç enerji seviyesinde ön konsolidasyon basıncı-sıkıştırma enerjisi değişimi için elde edilen bağıntılar ve belirleme katsayıları

Numune No	Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
YS1	Doğrusal	σ'_0 = 0.0984*E+135	0.99
YS2		σ'_0 = 0.0224*E+70	0.97
YS3		σ'_0 = 0.0266*E+80	0.98
YS4		σ'_0 = 0.1835*E+100	0.99

Çizelge 5.1'de görülen 'σ'_0' kısaltması ön konsolidasyon basıncını, 'E' kısaltması ise denklem 4.1 ile hesaplanan sıkıştırma enerjisini göstermektedir. Kullanılan numunelerin konsolidasyon deney sonuçlarına göre iki yöntemle elde edilen ön konsolidasyon basınçlarının, sıkıştırma enerjisindeki artışla doğrusal ilişki gösterdiği gözlenmiştir.

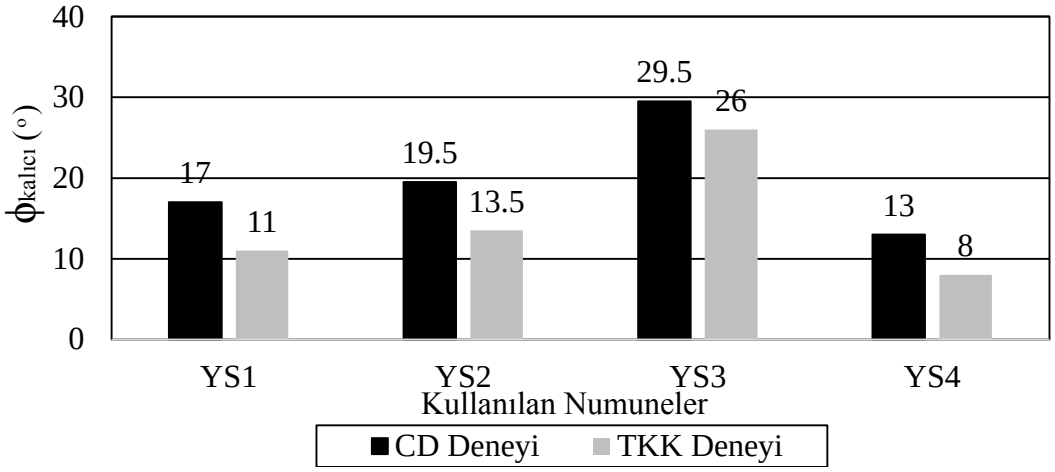
5.2 Doygun Durumda Üç Eksenli Basınç Deneyi ve Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 5.2'de suya doygun durumda üç sıkıştırma enerjisinde gerçekleştirilen konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinden ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum kayma mukavemeti açıları, şekil 5.3'de kalıcı kayma mukavemeti açıları gösterilmiştir.



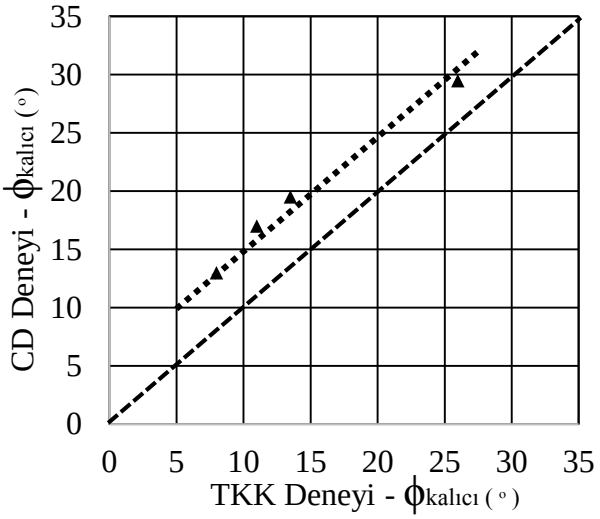
Şekil 5.2 : CD deneyleri ve TKK deneyleri ile edilen maksimum kayma mukavemeti açılarının karşılaştırımlası (S=%100)

Şekil 5.2'de görüldüğü üzere konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi (CD) ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri (TKK) ile suya doygun durumda elde edilen maksimum kayma mukavemeti açıları arasındaki farkın 1^{o} - 6^{o} arasında değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.3 : CD deneyleri ve TKK deneyleri ile edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması (S=%100)

Şekil 5.3'de görüldüğü üzere konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi (CD) ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyleri (TKK) ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarından ortalama 5^{o} yüksek olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.4'de suya doygun durumda CD deneyi ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarıyla TKK deneyi ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları kıyaslanmıştır.



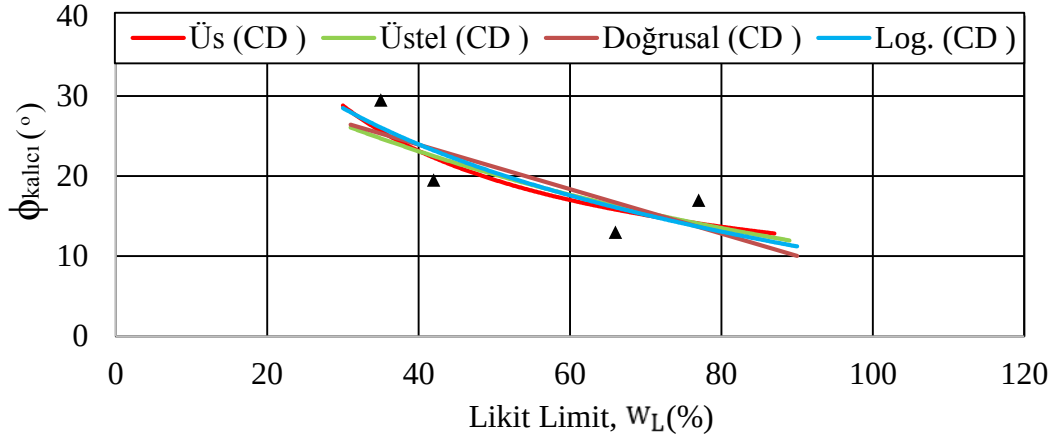
Şekil 5.4 : CD ve TKK deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının doğrusal regresyon analizi ile karşılaştırılması (S=%100)

Şekil 5.4'de görüldüğü üzere yapılan doğrusal regresyon analizi sonucunda 0.96 belirleme katsayısıyla;

$$\phi_{kalıcı\ (CD)} = \phi_{kalıcı\ (TKK)} + 5 \qquad \textbf{(5.1)}$$

bağıntısı elde edilmiştir. Önerilen bağıntı kullanılarak suya doygun durumda gerçekleştirilen konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemi veya tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında geçiş yapmak mümkün olmaktadır.

Şekil 5.5'de suya doygun durumda yapılan CD deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi gösterilmiştir.



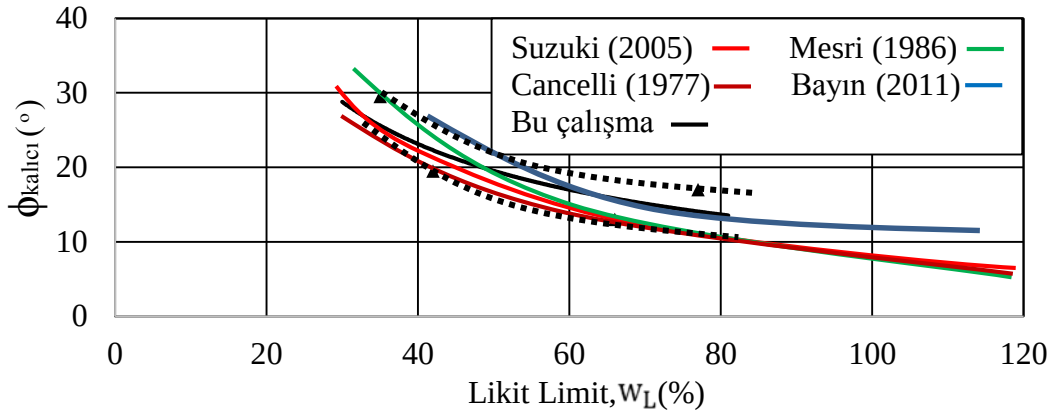
Şekil 5.5 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100)

Çizelge 5.2'de suya doygun durumda yapılan CD deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişim denklemleri ve regresyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.2 : CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100).

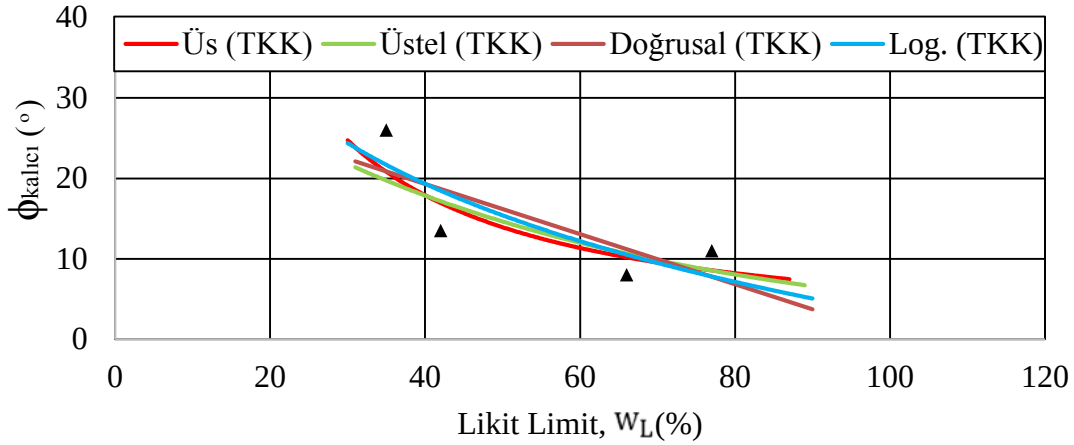
Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_{kalıcı} = 380*w_L^{-0.76}$	0.68
Üstel	$\phi_{kalıcı} = 39*e^{-0.01*w_L}$	0.60
Doğrusal	$\phi_{kalıcı} = -0.28*w_L + 35$	0.62
Logaritmik	$\phi_{kalıcı} = -15.7*\ln(w_L) + 82$	0.70

Şekil 5.6'da CD deney soncuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.6 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla kıyaslanması

Şekil 5.7'de suya doygun durumda yapılan TKK deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi gösterilmiştir.



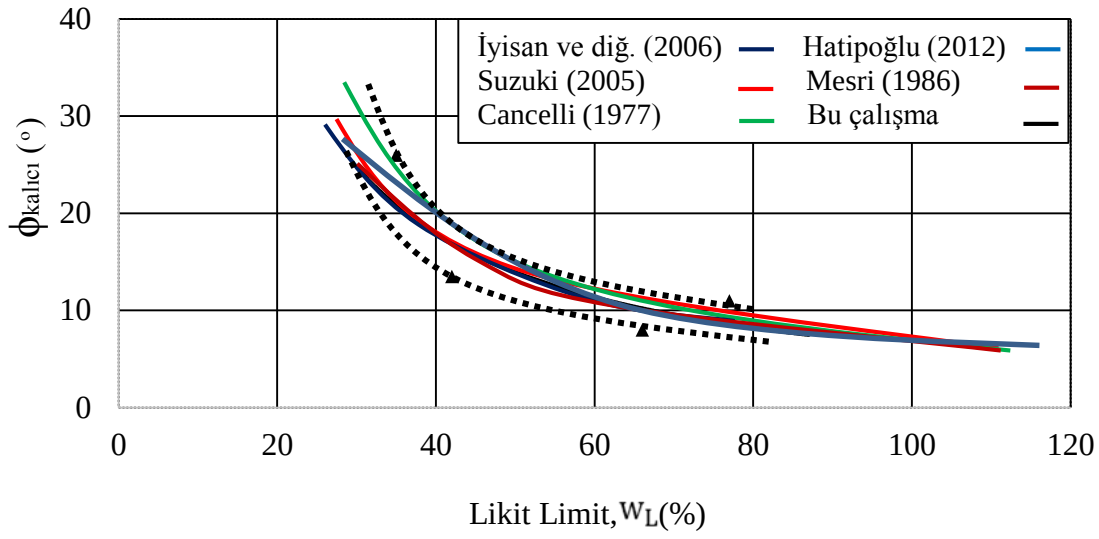
Şekil 5.7 : TKK deney sonuçlarına göre edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100)

Çizelge 5.3'de suya doygun durumda yapılan TKK deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişim denklemleri ve regresyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.3 : TKK deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi (S=%100).

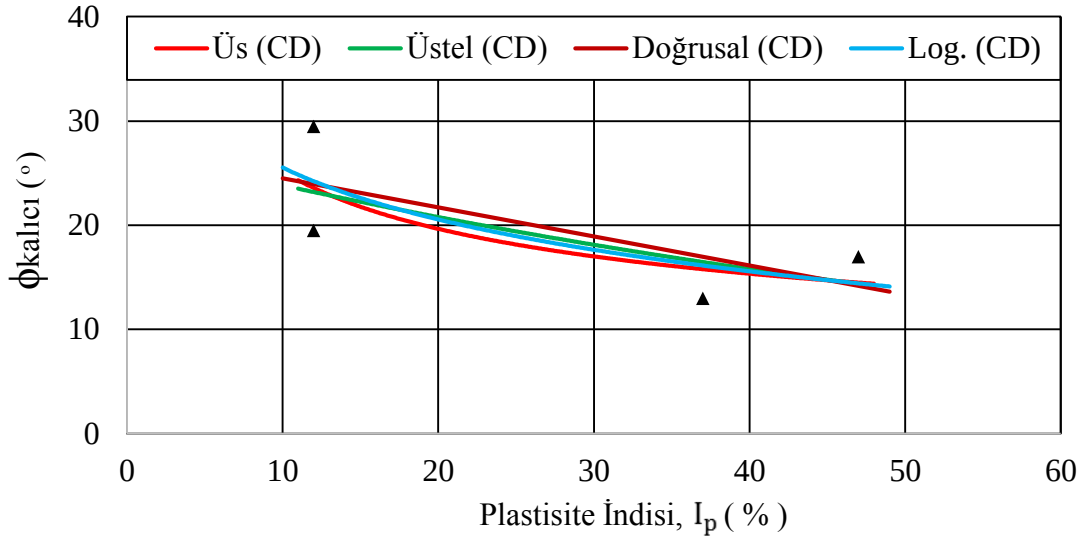
Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_{kalıcı} = 1130*w_L^{-1.13}$	0.70
Üstel	$\phi_{kalıcı} = 39*e^{-0.02*w_L}$	0.63
Doğrusal	$\phi_{kalıcı} = -0.31*w_L + 32$	0.61
Logaritmik	$\phi_{kalıcı} = -17.6*\ln(w_L) + 84$	0.70

Şekil 5.8'de TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.



Şekil 5.8 : TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılması

Şekil 5.9'da suya doygun durumda yapılan CD deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi gösterilmiştir.



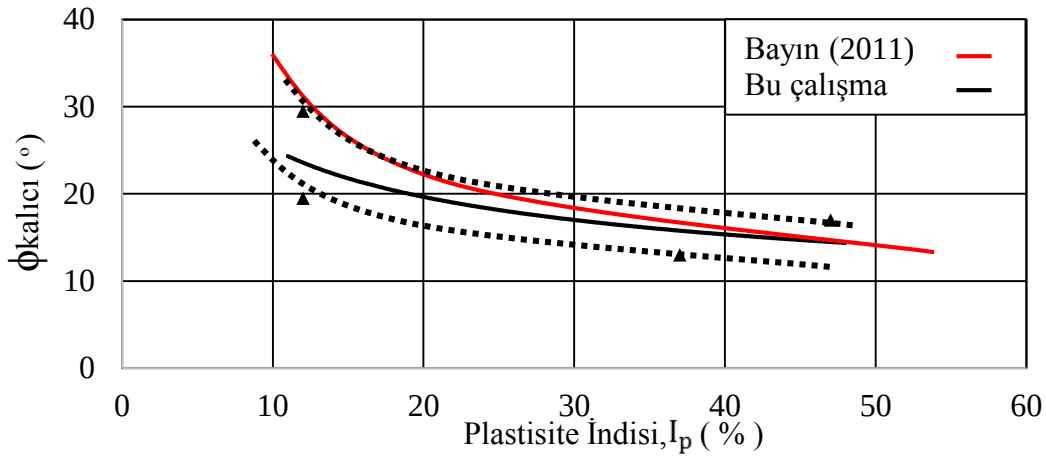
Şekil 5.9 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100)

Çizelge 5.4'de suya doygun durumda yapılan CD deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişim denklemleri ve regresyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.4 : CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100).

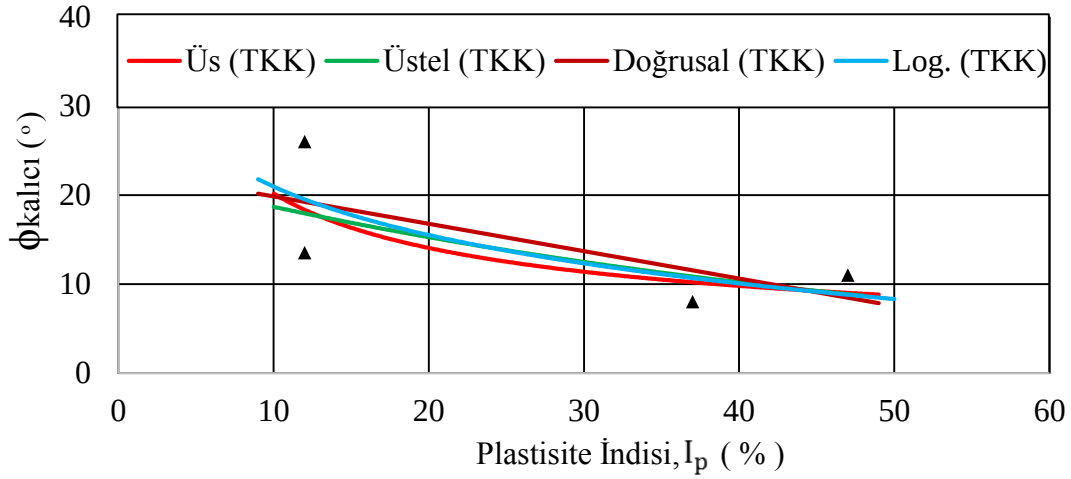
Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_{kalıcı} = 57.3*I_p^{-0.357}$	0.58
Üstel	$\phi_{kalıcı} = 27.3*e^{-0.014*I_p}$	0.51
Doğrusal	$\phi_{kalıcı} = -0.28*I_p + 27$	0.50
Logaritmik	$\phi_{kalıcı} = -7.19*\ln(I_p) + 42$	0.55

Şekil 5.10'da CD deney soncuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.10 : CD deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılması

Şekil 5.11'de suya doygun durumda yapılan TKK deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi gösterilmiştir.



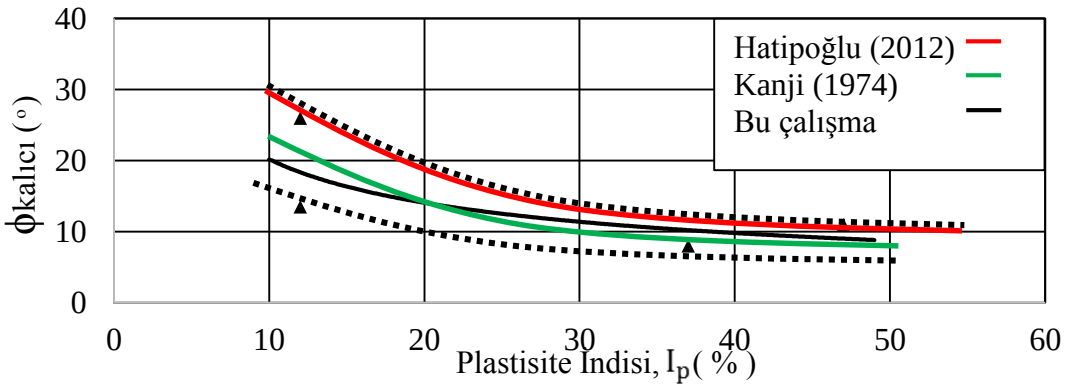
Şekil 5.11 : TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100)

Çizelge 5.5'de suya doygun durumda yapılan CD deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişim denklemleri ve regresyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.5 : TKK deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimi (S=%100).

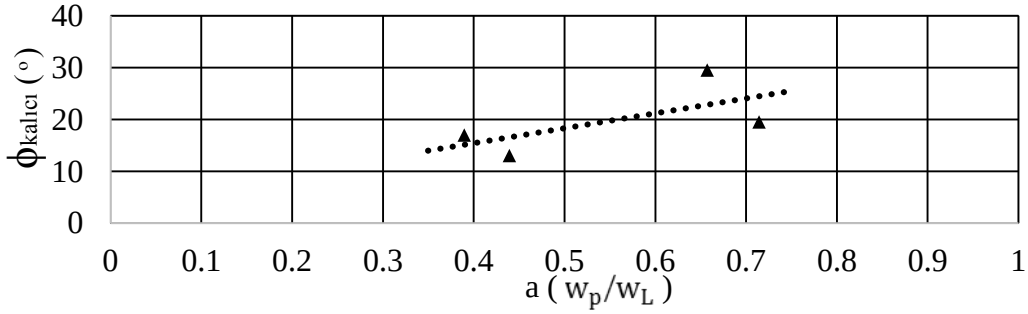
Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_{kalıcı} = 67*I_p^{-0.52}$	0.58
Üstel	$\phi_{kalıcı} = 22.9*e^{-0.02*I_p}$	0.52
Doğrusal	$\phi_{kalıcı} = -0.31*I_p + 23$	0.48
Logaritmik	$\phi_{kalıcı} = -7.9*\ln(I_p) + 39$	0.52

Şekil 5.12'de TKK deney soncuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi ile ilgili geçmişte yapılmış çalışmalar ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.12 : TKK deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişiminin geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılması

Şekil 5.13'de suya doygun durumda yapılan CD deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının 'a' ile gösterilen plastik limit/likit limit oranı ile değişimi gösterilmiştir ($a = w_p/w_L$).



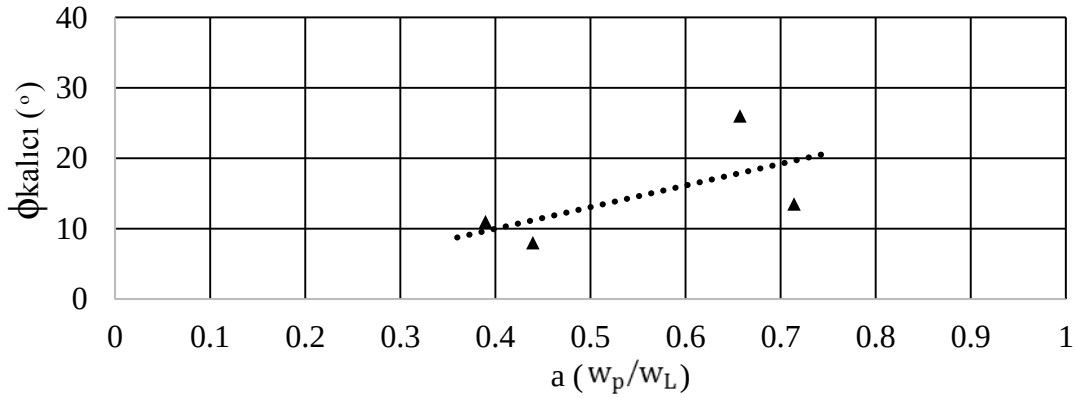
Şekil 5.13 : CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının a oranı ile değişimi (S=%100)

Şekil 5.13'de görüldüğü üzere YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin suya doygun durumda gerçekleştirilen CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının 'a' oranı ($a = w_p/w_L$) ile değişimi için yapılan doğrusal regresyon analizi sonucunda 0.45 belirleme katsayısı ile;

$$\phi_{kalıcı} = 28.7*a + 4 \quad \textbf{(5.2)}$$

bağıntısı elde edilmiştir.

Şekil 5.14'de suya doygun durumda yapılan TKK deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının 'a' oranı ($a = w_p/w_L$) ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : TKK deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının a oranı ile değişimi (S=%100)

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere YS1, YS2, YS3 ve YS4 numunelerinin suya doygun durumda gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının 'a' oranı ($a = w_p/w_L$) ile değişimi için yapılan doğrusal regresyon analizi sonucunda 0.40 belirleme katsayısı ile;

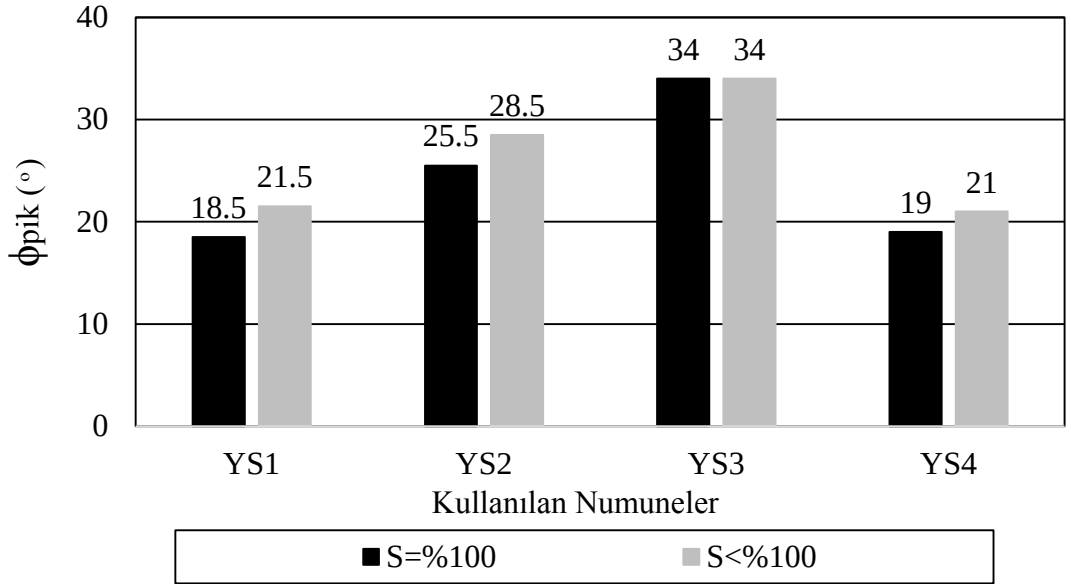
$$\phi_{kalıcı} = 30.7*a - 2 \quad \textbf{(5.3)}$$

bağıntısı elde edilmiştir.

Buraya kadar olan kısımda suya doygun durumda (S=%100) yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ve bu parametrelerin endeks özellikleri ile değişimi karşılaştırılmıştır. Likit limit, plastisite indisi ve plastik limit değerinin likit limit değerine oranı ile kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi üzerine çeşitli korelasyonlar önerilmiştir.

5.3 Doygun Olmayan Durumda CD Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 5.15'de üç sıkıştırma enerjisinde suya doygun durumda ve suya doygun olmayan durumda gerçekleştirilmiş konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre elde edilen maksimum kayma mukavemeti açıları karşılaştırılmıştır.

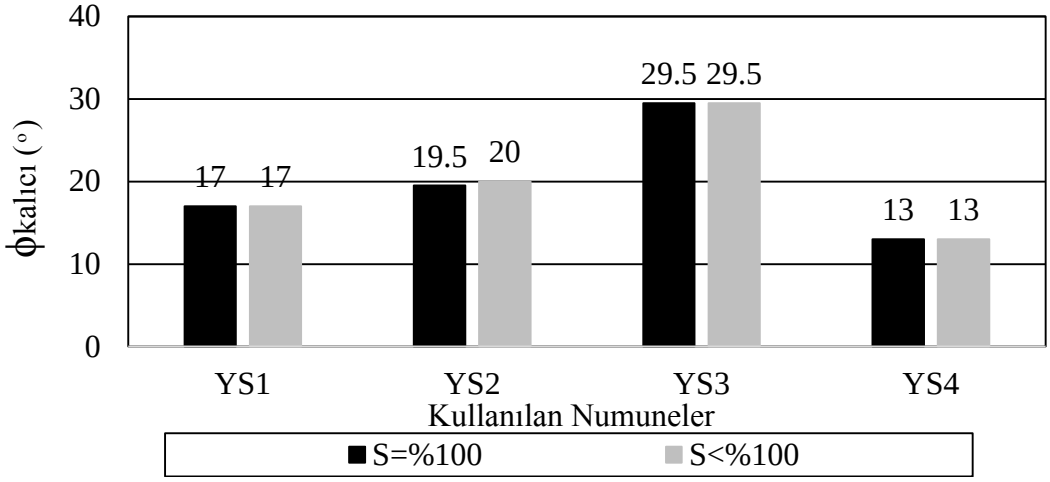


Şekil 5.15 : CD deney sonuçlarına göre doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması

Şekil 5.15'de görüldüğü üzere kullanılan numunelerin maksimum kayma mukavemeti açılarının doygun olmayan durumda doygun duruma göre yaklaşık 3° yüksek çıktığı gözlenmiştir.

YS3 numunesi için doygun durum ve doygun olmayan durumda maksimum kayma mukavemeti açısının aynı çıkmasının sebebi olarak, bu numunenin hazırlandığı üç sıkıştırma enerjisindeki optimum su muhtevası değerindeki doygunluk oranlarının %95'e yakın olması, ve deney esnasında uygulanması zorunlu olan çok küçük ters basınçlarla bile konsolidasyon sırasında doygunluğa ulaşmış olması gösterilir. Bu özellikteki numune üzerine doygun olmayan durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi istenilen şekilde gerçekleştirilemediğinden, doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri beklenilenin aksine aynı değerler olarak elde edilmiştir.

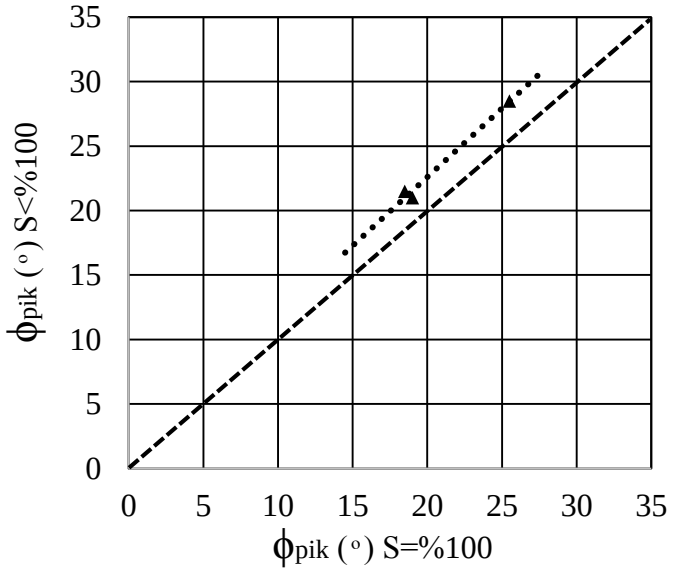
Şekil 5.16'da konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre suya doygun ve doygun olmayan durumda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : CD deney sonuçlarına göre doygun ve doygun olmayan durumdaki kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması

Şekil 5.16'da görüldüğü üzere suya doygun durumda ve doygun olmayan durumda gerçekleştirilen CD deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının, iki durum için değişmediği ve bu sonuçlara bağlı olarak doygunluğun maksimum kayma mukavemeti açılarını etkilediği fakat kalıcı kayma mukavemeti açılarını etkilemediği gözlenmiştir.

Şekil 5.17'de konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre doygun durum ve doygun olmayan durumda maksimum kayma mukavemeti açılarının değişimi gösterilmiştir.



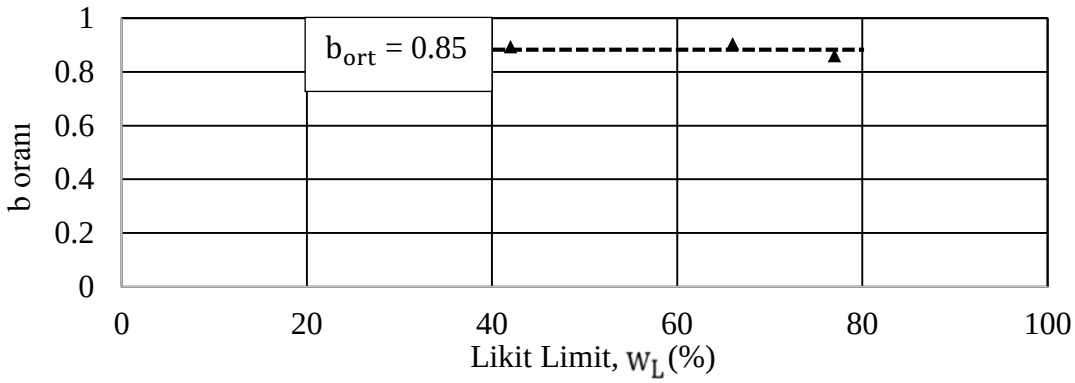
Şekil 5.17 : Doygun ve doygun olmayan durum maksimum kayma mukavemeti açılarının kıyaslanması

Şekil 5.17'de görüldüğü üzere yapılan doğrusal regresyon analizi sonucunda 0.98 belirleme katsayısıyla;

$$\phi_{pik\ (S<\%100)} = 1.07*\phi_{pik\ (S=\%100)} + 1.3 \quad \textbf{(5.4)}$$

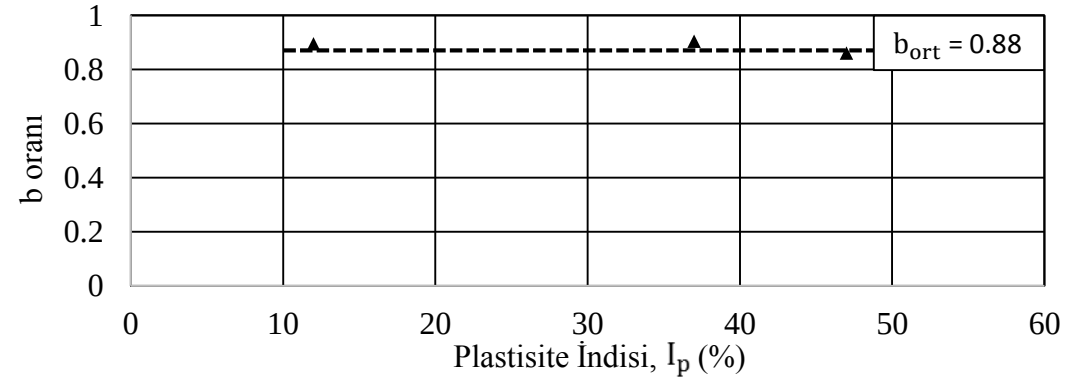
bağıntısı elde edilmiştir. Önerilen bağıntı kullanılarak doygun durumda gerçekleştirilen konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ile elde edilen maksimum kayma mukavemeti açıları kullanılarak doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarını elde etmek mümkündür.

Şekil 5.18'de 'b' oranı ile gösterilen doygun olmayan ile doygun durum arasındaki maksimum kayma mukavemeti açılarının oranlarının ($b = \phi_{pik-S=\%100}/\phi_{pik-S<\%100}$) likit limit ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.18 : b oranının likit limit değişimi ile karşılaştırılması

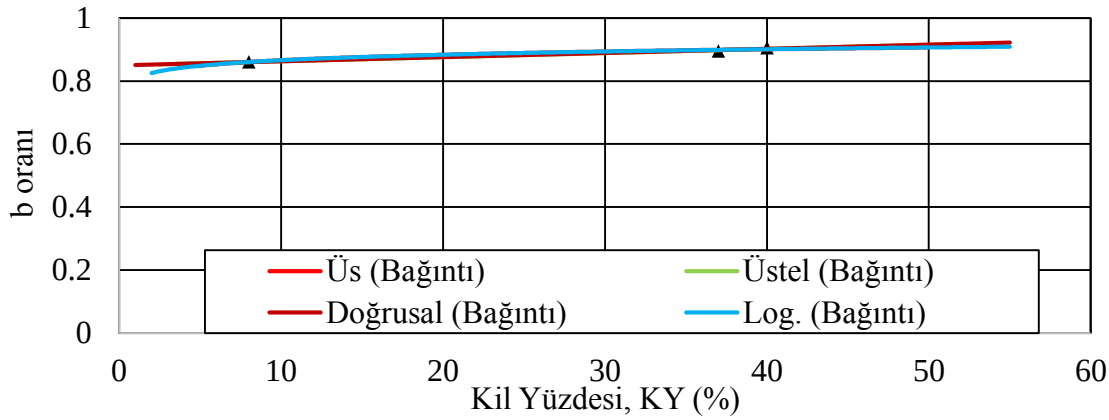
Şekil 5.18'da görüldüğü üzere kullanılan numuneler için likit limit değer aralığı 40 – 80 arasında 'b' oranı ($b = \phi_{pik-S=\%100}/\phi_{pik-S<\%100}$) ile gösterilen doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarının oranının 0.85 gibi ortalama bir değer aldığı gözlenmiştir. Şekil 5.19'da elde edilen deney sonuçlarına göre 'b' oranı ile plastisite indisinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.19 : b oranının plastisite indisi değişimi ile kıyaslanması

Şekil 5.19'da görüldüğü üzere kullanılan numuneler için plastisite indisi değer aralığı 10 – 50 arasında 'b' oranı ($b = \phi_{pik-S=\%100}/\phi_{pik-S<\%100}$) ile gösterilen doygun ve doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarının oranının 0.88 gibi ortalama bir değer aldığı gözlenmiştir. Önerilen ortalama oranlar ile belirtilen plastisite indisi değer aralığındaki numuneler için doygun durumda elde edilen maksimum kayma mukavemeti açıları kullanılarak doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarına geçiş yapmak mümküdür.

Şekil 5.20'de kullanılan numuneler için 'b' oranı ile kil yüzdesi değişimi gösterilmiştir. Yapılan regresyon analizleri, elde edilen bağıntılar ve belirleme katsayıları çizelge 5.6'da verilmiştir.



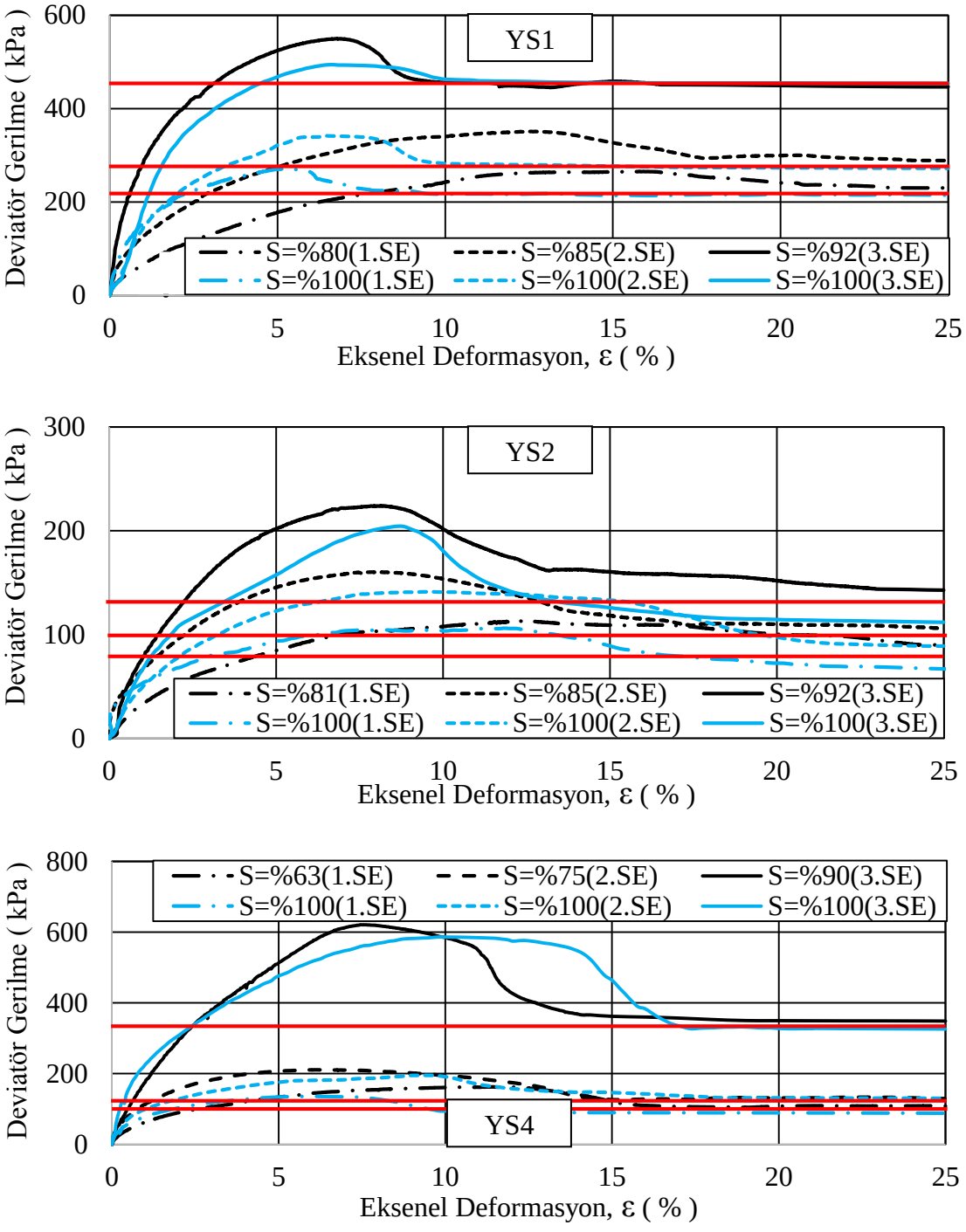
Şekil 5.20 : b oranının kil yüzdesi değişimi ile kıyaslanması

Çizelge 5.6 : b oranının kil yüzdesi değerleri ile kıyaslanması sonucu elde edilen bağıntılar.

Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$b = 0.81*KY^{0.0286}$	0.97
Üstel	$b = 0.85*e^{0.00154*KY}$	0.98
Doğrusal	$b = 0.0013*KY + 0.85$	0.98
Logaritmik	$b = -0.025*\ln(KY) + 81$	0.97

Çizelge 5.6'da verilen 'b' oranı, $\phi_{pik-S=\%100}/\phi_{pik-S<\%100}$ bağıntısını temsil eden bir oran ve 'KY' kil yüzdesi ifadesinin kısaltması olarak gösterilmiştir. Önerilen bağıntılar yardımıyla kil yüzdesi değerlerine göre doygun durumdaki ve doygun olmayan durumdaki maksimum kayma mukavemeti açılarının oranı elde edilmektedir. Yapılan incelemeler sonucu b oranı - kil yüzdesi değişimi sonuçlarından pratik amaçlar doğrultusunda elde edilen bağıntıların daha sağlıklı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Şekil 5.21'de YS1, YS2 ve YS4 numunelerinin üç sıkıştırma enerjisinde, doygun ve doygun olmayan durumda CD deney sonuçları gösterilmektedir. Maksimum kayma mukavemeti değerleri için doygun olmayan durumda deviatör gerilmeler doygun duruma göre daha yüksek değerler alırken, kalıcı kayma mukavemeti değerleri için doygun ve doygun olmayan durumda deviatör gerilmeler yaklaşık olarak eşit değerler almaktadır ve bu durum şekiller üzerinde kırmızı hat ile belirtimiştir.

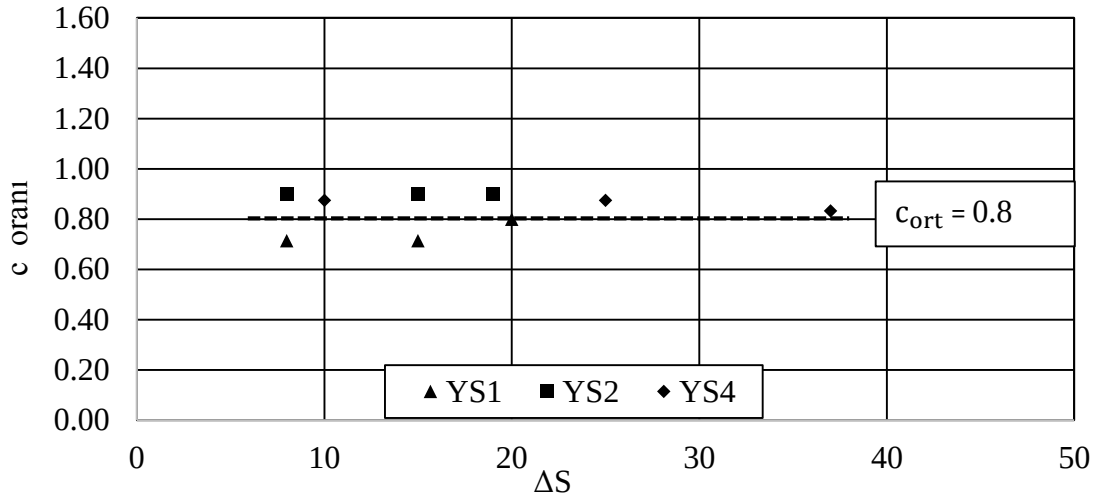


Şekil 5.21 : YS1, YS2 ve YS4 numunelerinin doygun ve doygun olmayan durumdaki CD deney sonuçları

Şekil 5.21'de görülen kırmızı hatlar, doygun ve doygun olmayan durumlarda ulaşılan kalıcı kayma mukavemeti değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğunu göstermektedir. Bu durumun bir sonucu olarak kalıcı kayma mukavemeti parametreleri, doygun ve doygun olmayan durum için değişmemiştir. Doygun olmayan durumda maksimum kayma mukavemeti değerlerinden kalıcı kayma mukavemeti değerlerine ulaşıncaya kadar olan deformasyon miktarlarının farklarının (ε_r) doygun duruma göre yüksek çıktığı gözlenmiştir. Şekil 5.22'de YS1, YS2 ve YS3 numuneleri için 'c' oranı ile doygunluk oranı farkı değerlerinin değişimi gösterilmiştir.

$$c = \frac{\varepsilon_{r-S=\%100}}{\varepsilon_{r-S<\%100}} \qquad \textbf{(5.5)}$$

$$\Delta S = 100 - S_{SE} \qquad \textbf{(5.6)}$$



Şekil 5.22 : Numunelerin c oranı ile doygunluk oranı farkı değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.22'de görüldüğü üzere doygunluk oranı farkı değerlerinin 'ΔS' (denklem 5.6) %5-%40 aralığında iken 'c' oranı (denklem 5.5) ortalama 0.8 gibi bir değer almaktadır. Elde edilen ortalama 'c' değeri ile tabi haldeki doygunluğu %5-%40 arasında değişen zeminler için doygun durumdaki maksimum kayma mukavemeti değeri ile kalıcı kayma mukavemeti değerine ulaşıldığı andaki deformasyon farkı (ε_r) kullanılarak doygun olmayan durumdaki 'ε_r' değeri elde edilebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin drenajlı koşullarda, suya doygun (S=%100) ve doygun olmayan durumda (S<%100) maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Amaç doğrultusunda yapılan deneysel çalışmalarda, arazide farklı doygunluk oranlarında numune temin etmenin oldukça zor olması sebebiyle laboratuvar ortamında hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Kullanılan numuneler üzerinde, üç sıkıştırma enerjisinde, her enerji seviyesine ait ön konsolidasyon basınçları altında suya doygun durumda ve her enerji seviyesindeki optimum su muhtevası değerindeki doygunluk oranında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları doğrultusunda bazı korelasyonlar önerilmiş, sonuçlar geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Üç sıkıştırma enerji seviyesinde gerçekleştirilen deney sonuçları doğrultusunda, kullanılan numunelerin ön konsolidasyon basınçları ile sıkıştırma enerji miktarları arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir.
- Kullanılan numunelerden elde edilen sonuçlara göre suya doygun durumda (S=%100) yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının, yine doygun durumda yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarından ortalama 5^{o} yüksek olduğu saptanmıştır.
- Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinden, suya doygun olmayan durumda (S<%100) elde edilen maksimum kayma mukavemeti açılarının, beklenildiği üzere doygun durumda (S=%100) elde edilen kayma mukavemeti açılarından yaklaşık 2^{o} yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi olarak doygun olmayan durumda zemin içerisindeki hava boşluklarının emme gerilmesine sebep olarak kayma mukaveti değerini arttırması belirtilmiştir.

- Çalışma kapsamında kullanılan numunelerden, uygulanan yöntem doğrultusunda elde edilen sonuçlara göre suya doygunluğun maksimum kayma mukavemeti açıları üzerinde etkisinin olduğu, kalıcı kayma mukavemeti açıları üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Kullanılan numuneler için doygun ve doygun olmayan durumda, üç sıkıştırma enerjisinde kalıcı kayma mukavemeti değerlerinin doygun durumdaki değerler ile yaklaşık olarak aynı olması nedeniyle kalıcı kayma mukavemeti açılarında bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir (%80<S<%100 doygunluk oranı değerleri için geçerli olmak üzere).
- Kullanılan numuneler için bu yöntemle yapılan deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açıları üzerinde doygunluğun önemli bir etkisi olmadığı saptandığından, doygun durumda kalıcı kayma mukavemeti açılarını elde etmek için kullanılan bağıntıların, suya doygun olmayan durum için de geçerli olabileceği sonucuna ulaşılmıştır (%80<S<%100).
- Doygun olmayan durumda, kalıcı kayma mukavemetini elde edebilmek amacıyla her numune için tekrarlı kesme kutusu deneylerinden anlamlı sonuçlar elde edilemediği gözlenmiştir. Bunun başlıca sebebi olarak doygun olmayan durumda istenilen kesme yüzeyinin sağlanamaması gösterilmiştir.
- Optimum su muhtevası değerindeki doygunluk oranı %95'e yakın olan ve doygunluk aşamasını göreceli olarak daha hızlı tamamlayan numunelerde çalışmada uygulanan yöntem ile doygun olmayan durumda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi istenilen şekilde gerçekleştirilemediği görülmüştür.

Sonuç olarak suya doygun ve doygun olmayan durumda maksimum ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri için çeşitli bağıntılar önerilmiştir. Yapılacak deneylerle daha fazla veri elde edilerek sonuçların geliştirilmesi mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Budhu, M., (2011). “Soil Mechanics and Foundations”, John Wiley & Sons, 2006, pp 261-280.

Bayın, A., (2011). “Plastisitenin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi”, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bromhead, E.N., (1986). "The Stability of Slopes", Surrey University Press, Chapman & Hall, New York.

Cancelli, A., (1977). “Residual Shear Strength and Stability Analysis of a Landslide in Fissured Overconsolidated Clays”, Engineering Geology, Vol.16, pp 193-197.

Craig, R.F., (2004). “Soil Mechanics”, Seventh Edition, English Language Book Society / Van Nostrand Reinhold, London, pp 145-170.

Craig, R.F., (2012). “Soil Mechanics”, Eight Edition, English Language Book Society / Van Nostrand Reinhold, London, pp 170-175.

Das, M..B., (2010). “Principles of Geotechnical Engineering”, Seventh Edition, Thomson, Canada, pp 365-390.

Hatipoğlu, M., (2012). “Kalıcı Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleri ile Belirlenmesi”, Doktora Tezi.

Head, K.H., (1994). “Manual of Soil Laboratory Testing”, Volume 2, Second Edition, Pentech Press, London, pp 190-250.

Head, K.H., (1998). “Manual of Soil Laboratory Testing”, Volume 3, Second Edition, Pentech Press, London, pp 247-283.

Head, K.H., (2006). “Manual of Soil Laboratory Testing”, Volume 2, Second Edition, Pentech Press, London, 201-224.

Hoyos, L.R., Velosa, C.L., Puppala, A.J., (2014). " Residual Shear Strength of Unsaturated Soils via Suction-Sontrolled Ring Shear Testing", Engineering Jeology, pp 1-11.

Koltuk, S., (2005). "Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi.

Kumbasar, V., Kip, F., (1992). "Zemin Mekaniği Problemleri", Beşinci Baskı, Çağlayan Basımevi, İstanbul, s 159-200.

Lemos, L.J.L., (1986). “The effect of the rate of shear on residual strength”, Ph.D. Thesis, University of London.

Lupini, J.F., Skinner, A.E. ve Vaughan, P.R., (1981). "The Drained Residual Strength of Cohessive Soils", Geotechnique, Vol.31, No.2, pp 181-213.

Meehan, C.L., Tiwari, B., Braondon, T.L., Duncan, J.M. (2011). "Triaxial Shear Testing on Polished Slickensided Surfaces", Landslides, No.8, pp 449-458.

Mesri, G., Cepeda-Diaz, A.F., (1986)."Residual shear strength of clays and shales", Geotechnique, Vol.36, No.2, pp 269-274.

Mitchell, J.K., (1993). "Fudamentals of Soil Behaviour", John Wiley & Sons, New York.

Önalp, A., (2013). "Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği", Birsen Yayınevi, İstanbul.

Özaydın, K., (2000). "Zemin Mekaniği", Birsen Yayınevi, İstanbul.

Skempton, A. W., (1964). "Long-Term Stability of Clay Slopes", Geotechnique, Vol.14, No.2, 75-101.

Skempton, A. W., (1985). "Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory", Geotechnique, Vol.35, No.1, 3-18.

Stark, T. D., ve Eid, H. T., (1994). "The Drained Residual Strength of Cohessive Soils", Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, Vol. 120, No.5, pp 856-871.

Tan, A.O., (2013). "Zemin Mekaniği", Birsen Yayınevi, İstanbul, s 123-144.

Tiwari, B. ve Marui, H., (2005). "Comparison of Residual Shear Strengths from Back Analysis and Ring Shear Tests of Undisturbed and Remoulded Specimens", Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, Vol. 131, No.9, pp 1071-1079.

Ürkmez, A.R., (2009). "Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Yöntemi ile Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G. (2000). "Comparison of Empirical Procedures to Predict the Predict the Shear Strength of Unsaturated Soils Using the Soil-Water Characteristic Curve", Geo-Denver 2000, No.99, 195-209.

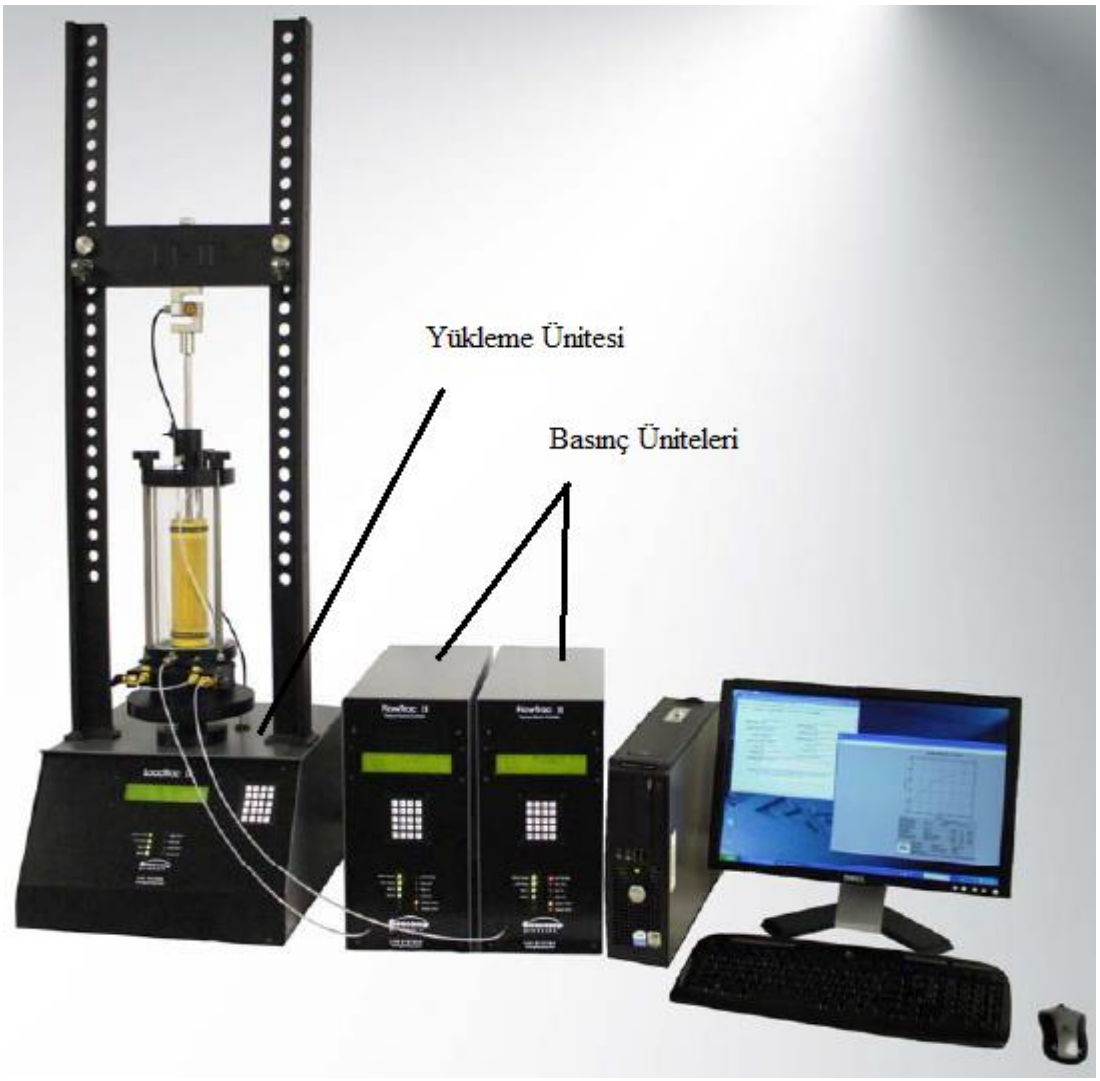
Yılmaz, E., (2006). "Zeminlerin endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi", Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

EK A: Bilgisayar Kontrollü Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi Yazılım Kullanma Klavuzu

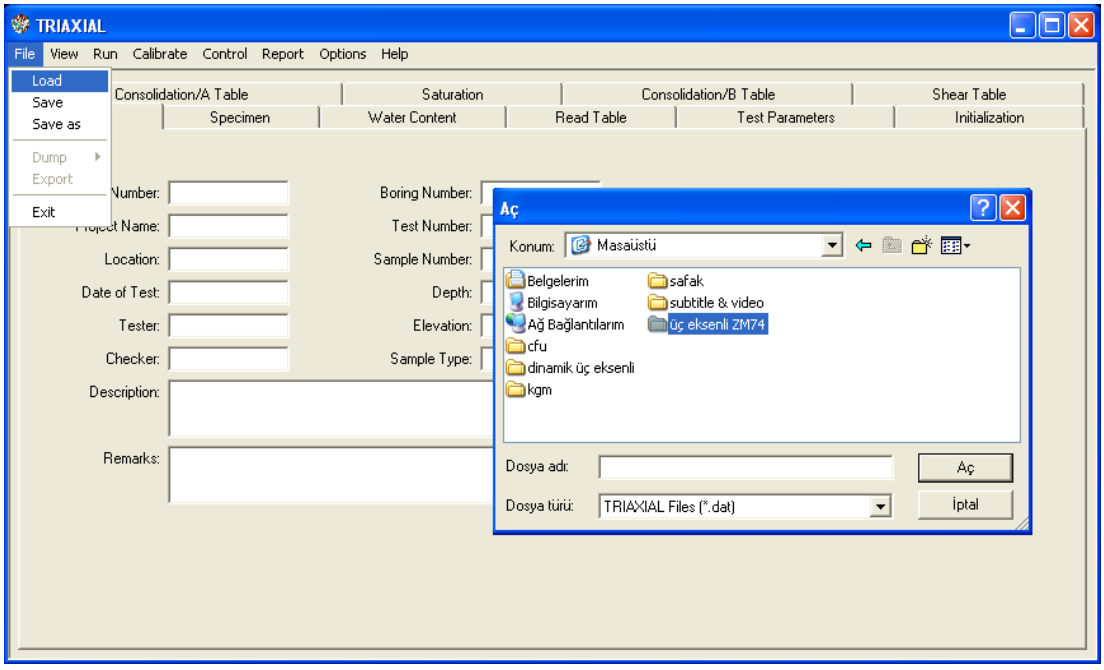
EK A BİLGİSAYAR KONTROLLÜ ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEY SİSTEMİ YAZILIM KULLANMA KLAVUZU

İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan Bilgisayar Kontrollü Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonsuz-drenajlı (CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Bir paket program yardımıyla deneyin tüm aşamaları kontrol edilmektedir. Deney sistemi genel olarak, yükleme ünitesi (Load Track) ve iki adet basınç ünitesinden (Flow Track) oluşmaktadır (Şekil A.1).



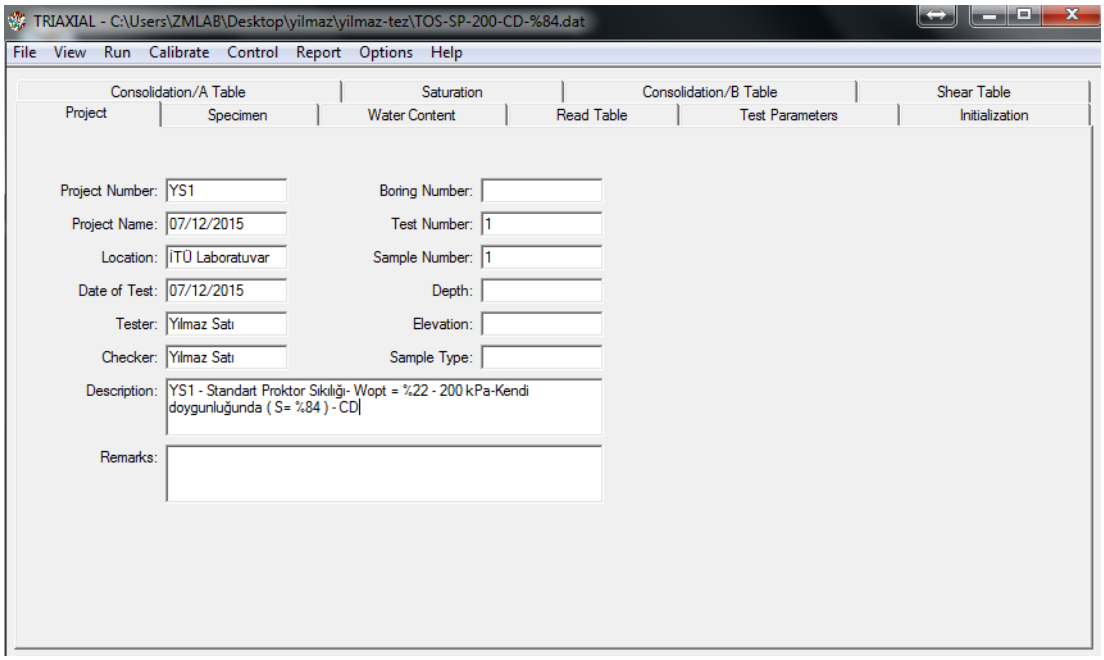
Şekil A.1 : Bilgisayar destekli üç eksenli basınç deney sistemi

Deneyin her aşaması Windows işletim sisteminde çalışan bir yazılım (shear software) ile kontrol edilmektedir. Yazılım deney verilerini kaydetmek dışında ayrıca grafik ile de sonuç gösterebilmektedir. Yazılım kullanılırken ilk olarak yükleme ve basınç ünitelerinin arkasındaki açma-kapama düğmesi açılır. Cihazların önündeki ışıklar yanıp söndükten sonra bilgisayardan ilgili makinenin klasörüne girilerek program açılır. Yapılacak deneyin özelliklere göre uygun şablon File - Load seçeneğiyle seçilir (Şekil A.2). Bu aşamada kullanılacak sistemin klasöründeki şablon dosyası olduğunu teyit etmek gerekir.



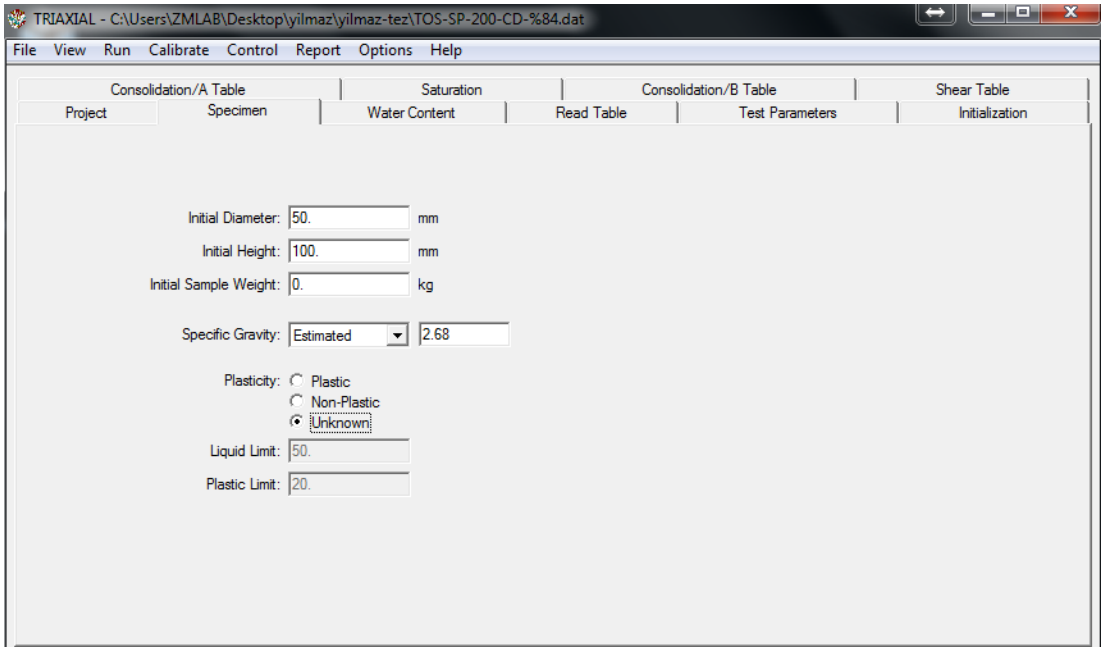
Şekil A.2 : Yazılıma şablon dosya yüklenmesi

Şablonu açtıktan sonra şablon üzerinde değiştirilecek bilgilerin programın tüm sayfalarına girilmesi gerekmektedir. Şablon açıldıktan sonra yazılımın ilk kısmı olan 'Project' kısmına yapılacak deney ve kullanılacak numune ile ilgili bilgiler girilir (Şekil A.3).

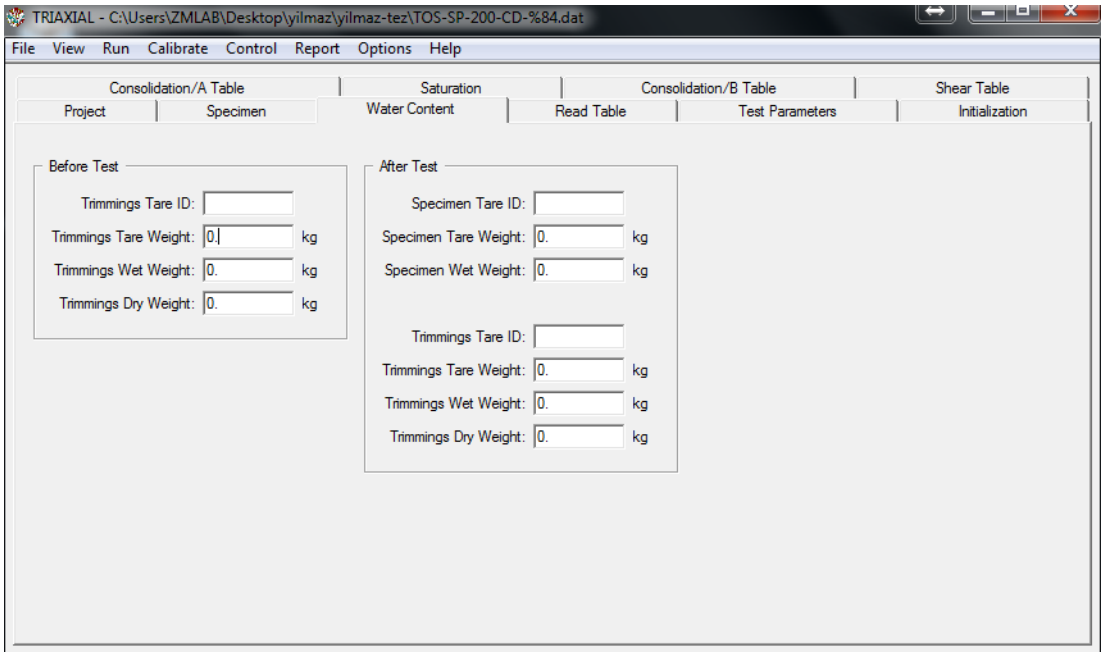


Şekil A.3 : Deneye ve numuneye ait bilgilerein girilmesi

Yazılımın ‘Specimen’ ve ‘Water Content’ başlıklı kısımları deney sonuçlarını etkilememekle birlikte raporda yer almaktadır. İstenildiği takdirde doldurulabilir (Şekil A.4 ve şekil A.5).

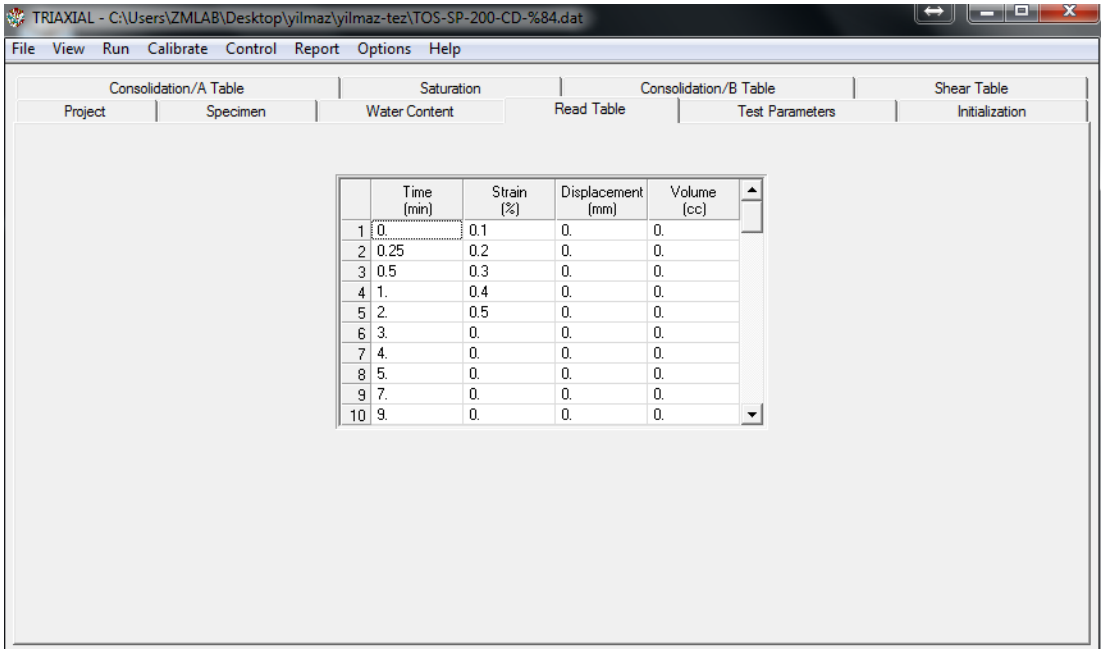


Şekil A.4 : Numune boyutları ve dane özgül ağırlığın belirtilmesi



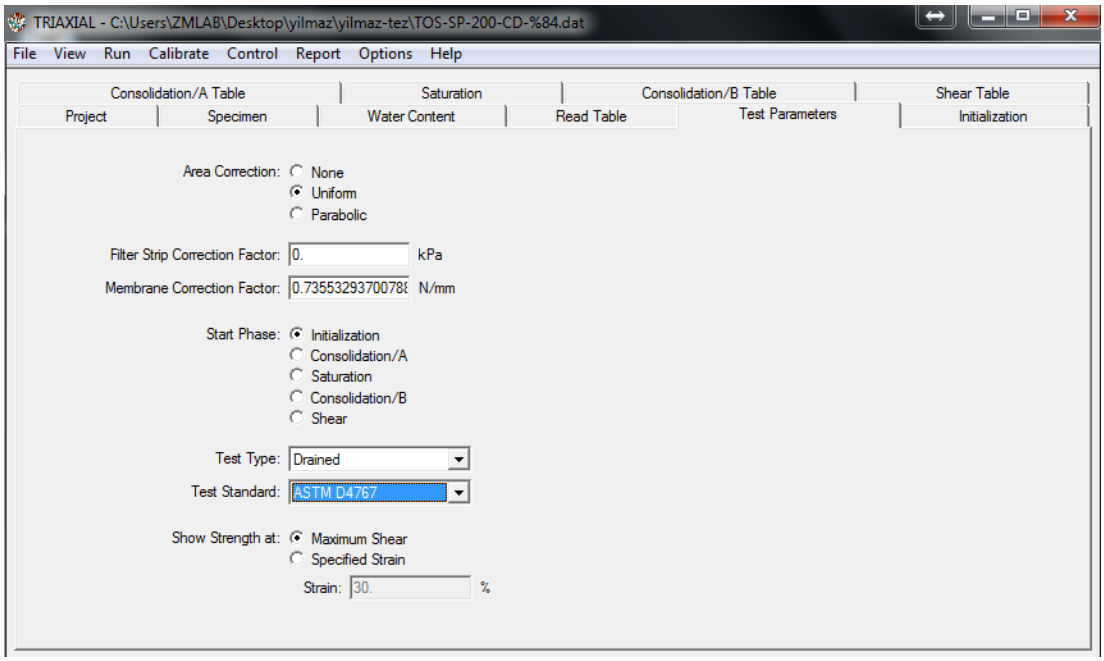
Şekil A.5 : Deney başı ve deney sonu su muhtevası değerlerinin girilmesi

'Read Table2 (Okuma Tablosu), 'ConsolidationA/B' (Konsolidasyon A ve B Tablosu) ve 'Saturation Table' (Doygunluk Tablosu) sayfalarındaki ilgili verilerin raporlarda kullanılacak kayıt sıklığı ve türünü belirlemek için doldurulur. Deney sonucunda alınacak rapordaki veri adetini kontrol altında tutmak için okuma tablosunun iyi oluşturulması gerekir. Örneğin 24 saat sürecek bir konsolidasyonda her saniye veri alınırsa toplam 86400 adet veri sayfada 60 satır veri ile 1440 sayfada gösterilir. Başlangıçta daha sık veri topladıktan sonra her 30 dakikada bir veri kaydı yapılması halinde 24 saatte toplam 60 civarında veri satırı elde edilerek kayıtlar tek sayfaya sığdırılabilir ve veri fazlalığı yüzünden analiz sıkıntısı yaşanmasının önüne geçilmiş olur (Şekil A.6).



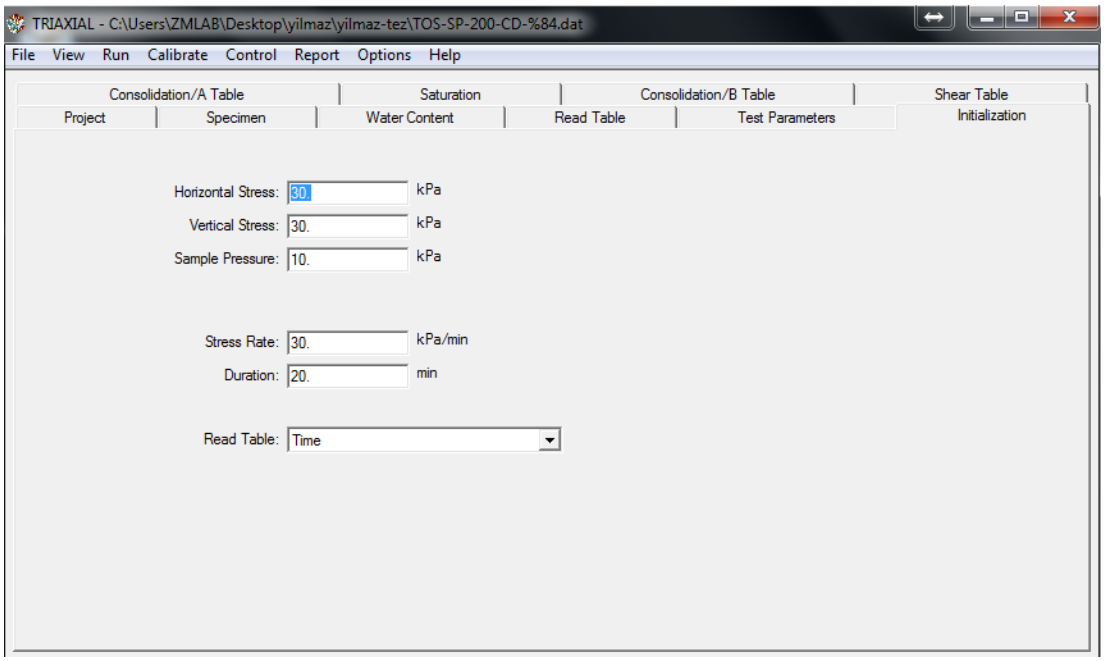
Şekil A.6 : Veri alma sıklığının belirtilmesi

'Test Parameters' kısmında deneye ait parametrelerin girilmesi gereklidir. Alan düzeltmesi, membrane düzeltme faktörü, deneye hangi aşamadan başlanmak istendiği, drenajlı veya drenajsız deneylerden hangisinin yapılacağı ve hangi standartların kullanılacağı gibi kısımlar doldurulur (Şekil A.7).



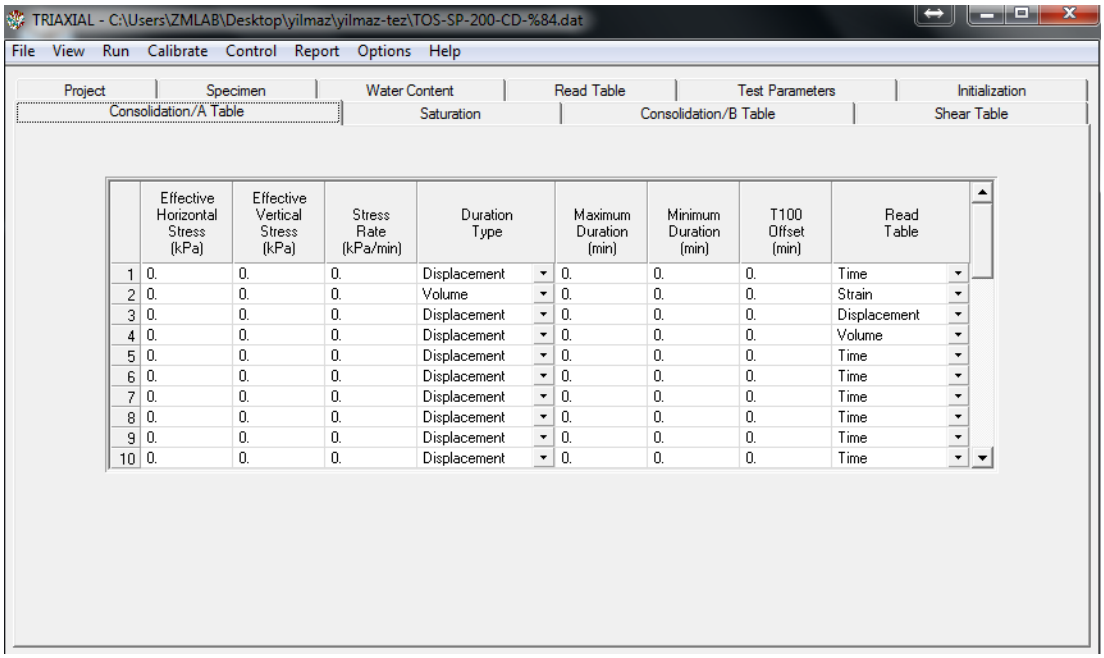
Şekil A.7 : Deneye ait parametrelerin girilmesi

Deneyin başlangıcında sistemde herhangi bir sızıntı olup olmadığını görmek, varsa düzeltip tekrar başlamak için 'Initalization' aşaması kullanılır (Şekil A.8). Ayrıca bu düşük basınç dengesi sırasında hücrenin en sağındaki numune su tahliye vanası açılarak numune hortum sistemindeki hava kabarcıklarının en düşük basınca sahip yolu seçerek bu vanadan atılması sağlanabilir. Böylece doyurma sürecinin daha verimli olması sağlanabilir. 'Horizontal Stress' kısmına yaklaşık 30kPa gibi bir değer girilir ve hücre basıncı değeridir. 'Vertical Stress' kısmına 10kPa gibi bir ters basınç değeri girilerek düşük basınçlarda sızıntı kontrolü yapılması sağlanır. 'Duration' kısmına bu aşamanın ne kadar süre devam edilmesi isteniyorsa o süre girilir. Genellikle 20 dakika gibi bir süre kontrol için yeterli olmaktadır.



Şekil A.8 : Başlangıç aşaması

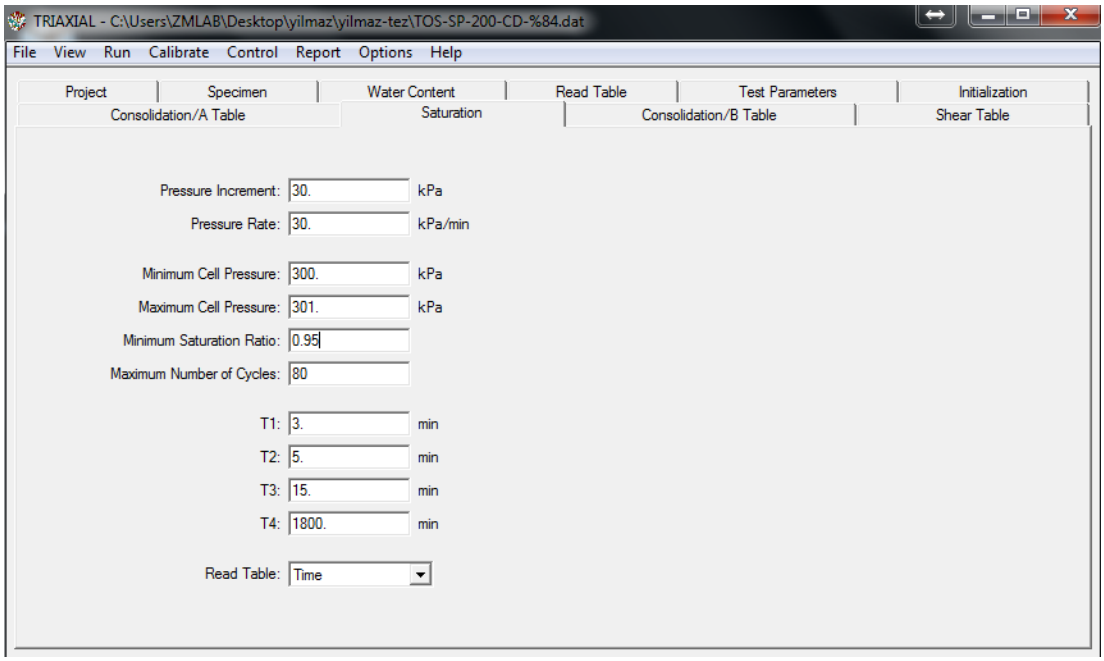
Konsolidasyon/A seçeneği doyurma işleminden önce konsolidasyon uygulanmak istendiğinde kullanılır(Şekil A.9). Tüm verileri sıfır olduğu takdirde otomatik olarak atlanır ve bir sonraki aşamaya geçilir. 'Effective Horizontal & Vertical Stress' kısımlarında numuneye uygulanacak konsolidasyonu yükü (kPa) olarak yatay ve dikey stres kısmına girilir. Genelde ikisi aynı girilir ve böylece numune her yönden aynı basınca maruz kalır. Efektif olduğu için o anda mevcut olan ters basınç sabit tutularak üstüne bu yük uygulanır. O yüzden toplam basınç daha fazla olsa da numuneye uygulanan net basınç girilen miktar olacaktır.



Şekil A.9 : Konsolidasyon/A aşaması

'Minimum duration' kısmında belirtilen minimum süreden önce konsolidasyon aşaması tamamlansa dahi süre tamamlanmadan diğer aşamaya geçilmemektedir. 'Maximum duration' kısmında belirtilen sürede zarfında konsolidasyon tamamlanmamışsa aşama sonlandırılacaktır. Süreler girilirken zaman biriminin kontrol edilmesi gerekir. (minutes) dakika, (seconds) saniye, (hour) saat, (day) gün, (miliseconds) milisaniye anlamına gelmektedir. Örneğin zaman birimi dakikadaysa ve siz süreleri saat olarak girerseniz konsolidasyon adımı birkaç dakikada, numune henüz konsolide olmadan tamamlanır. Zaman birimini değiştirmek için 'Options – Units' seçeneği kullanılır. Açılan kutuda 'Time' seçeneklerinden istenilen seçilip onaylanır.

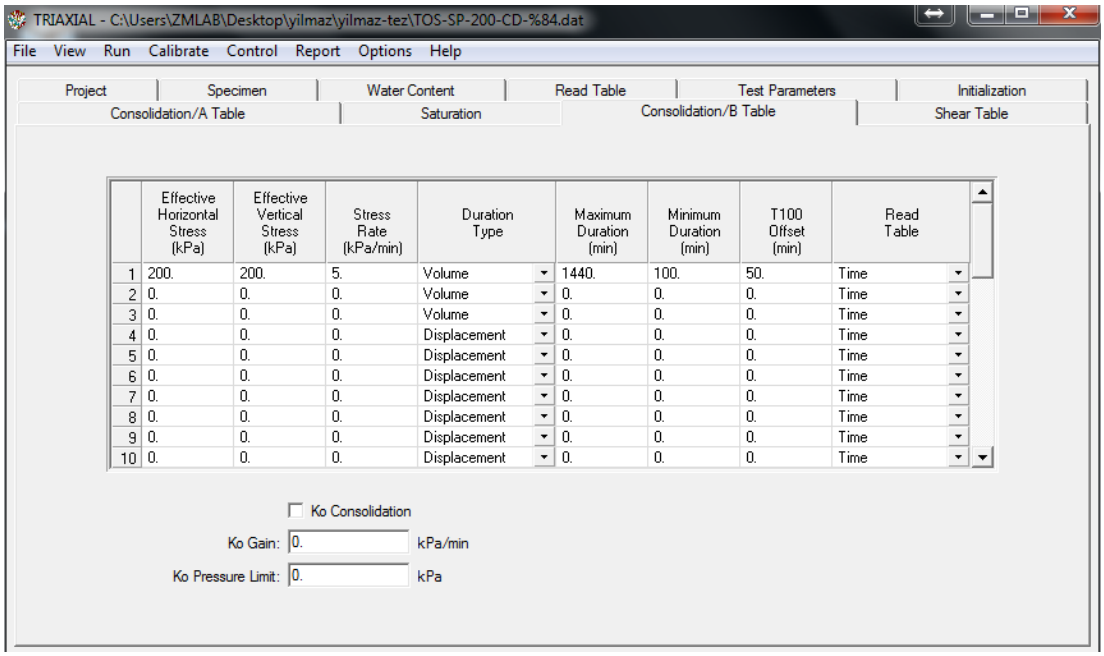
Doygunluk aşamasında numunenin başlangıç doygunluk oranı ve zamana bağlı doygunluk değişimi gösterilmektedir. Şekil A.10'da görülüğü üzere doygunluk aşamasına ait bilgilerin girilmesi görülmektedir. 'Minimum saturation ratio' kısmına girilen doygunluk oranına ulaşıldıktan sonra aşama otomatik olarak sonlandırılır. Belirtilen basınçlara ulaşıldığında doygunluk tamamlanmamışsa, döngüye girilir. 'T4' kısmında belirtilen süre boyunca doygunluk tamamlanmamışsa diğer aşamaya geçilir.



Şekil A.10 : Doygunluk aşaması

Bundan sonraki safhalarda hep efektif basınç uygulanacağı için azami hücre basıncını girerken 'T3' doyurma basınç döngüsü için basıncın 'Pressure Increment' kadar daha artacağını, ardından Konsolidasyon/ B'deki efektif yanal basınç (veya Azami K0 oranına göre uygulanacak yanal basınç) ve kullanılacaksa kesme tablosundaki yanal yük adımlarının bunun üstüne ekleneceğini hesap ederek bu safhada basıncın kullanılan hücrenin kapasitesinin üstüne çıkılmayacağının kontrol edilmesi gerekmektedir.

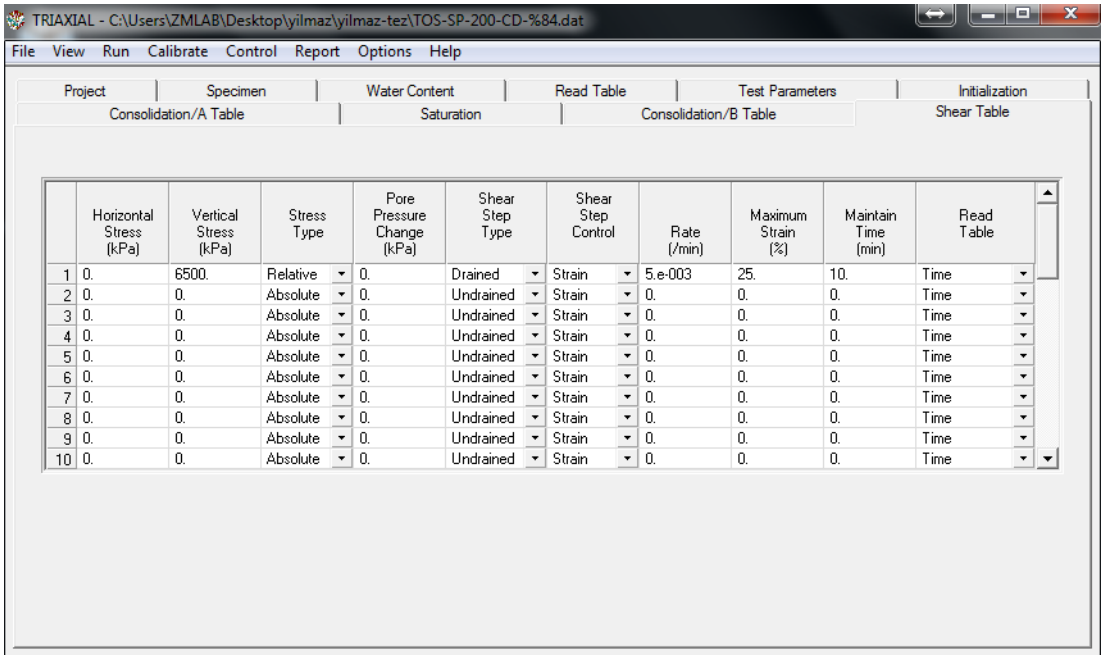
Konsolidasyon B tablosu (Şekil A.11), K0 konsolidasyonu seçeneğiyle burada yer almaktadır. K0 konsolidasyon, hücre basıncını değiştirerek yanal gerinmenin hacimsel gerinmeye eşit tutulması, yani numunenin kesit alanının sabit tutulması anlamına gelmektedir. K0 konsolidasyon seçeneği seçilmezse, tablo aynen konsolidasyon A tablosu gibi olmakta ve 'Minimum K' ve 'Maximum K' seçenekleri yerine 'Effective Horizontal Stress' seçeneği bulunmaktadır. Bu aşama doygunluk sonrası konsolidasyon aşamasıdır. Karekök-zaman yöntemine göre numunenin konsolide olması sonucunda tamamlanır.



	Effective Horizontal Stress (kPa)	Effective Vertical Stress (kPa)	Stress Rate (kPa/min)	Duration Type	Maximum Duration (min)	Minimum Duration (min)	T100 Offset (min)	Read Table
1	200.	200.	5.	Volume	1440.	100.	50.	Time
2	0.	0.	0.	Volume	0.	0.	0.	Time
3	0.	0.	0.	Volume	0.	0.	0.	Time
4	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
5	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
6	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
7	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
8	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
9	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time
10	0.	0.	0.	Displacement	0.	0.	0.	Time

Şekil A.11 : Doygunluk sonrası konsolidasyon aşaması

Son aşama kesme aşaması olup (Şekil A.12), belirlenen hızda, belirlenen deformasyon seviyesine kadar kesme gerçekleştirilir. 'Vertical stress' kısmına yük pistonun kapasitesini aşmayacak bir basınç değeri girilir (6500 kPa). 'Rate' kısmında kesme hızı belirtildikten sonra 'Maximum strain' kısmında deneyin sonlandırılacağı düşey deformasyon sınırı tanımlanır. Bu aşamalar tamamlandıktan sonra deneye başlanır ve yazılım girilen bilgiler doğrultusunda deneyi devam ettirir ve sonlandırır.



	Horizontal Stress (kPa)	Vertical Stress (kPa)	Stress Type	Pore Pressure Change (kPa)	Shear Step Type	Shear Step Control	Rate (/min)	Maximum Strain (%)	Maintain Time (min)	Read Table
1	0.	6500.	Relative	0.	Drained	Strain	5.e-003	25.	10.	Time
2	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
3	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
4	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
5	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
6	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
7	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
8	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
9	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time
10	0.	0.	Absolute	0.	Undrained	Strain	0.	0.	0.	Time

Şekil A.12 : Kesme aşaması

Deneye ‘Run’ seçeneği yardımıyla başlanılır. Yazılım yeni deney için dosya adı ister ve tüm verileri bu dosya ismi altında kaydeder. Dosya adını yazıp “Save” tuşuna bastıktan sonra sistem, pompaları başlangıç konumuna getirip getirmemesi gerektiğini sorar (Şekil A.13).



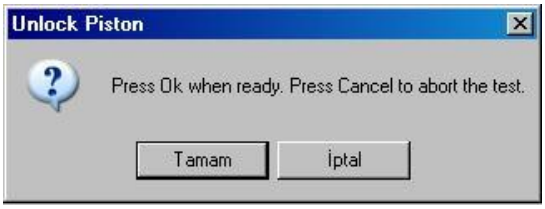
Şekil A.13 : Pompaların başlangıç konumuna getirilmesi

“Evet” tuşuna basıldığında sistem otomatik olarak iki pompayı da boşaltır ve belirlenmiş olan seviyelere kadar tekrar doldurur. Böylece deney ortasında pompalarda suyun bitmesinin önüne geçilmiş olur. Ancak pompalardaki suyun yeterli olduğunu düşünüyorsanız “hayır” tuşuna basarak bu adımı atlayabilirsiniz. Bu adım tamamlandıktan sonra bu sefer yük teması sağlama sorusu sorulur (Şekil A.14).



Şekil A.14 : Yük teması sağlanması

Statik üç eksenlilerde çubuğun yük hücresine teması için bu soruya “evet” yanıtı verilir. Platen yükseltilip temas sağlandıktan sonra bu sefer hücre çubuğunu serbest bırakma sorusu sorulur (Şekil A.15).



Şekil A.15 : Hücre çubuğu serbest bırakma

Çubuğu sabitleyen kol gevşetilir ve sonra “tamam” tuşuna basılır. Artık deney başlamıştır. Deneyin sürecini görmek için ‘View - Test Monitor’ ile deneyin aşaması ve son okumaları takip edilebilir. ‘View - Test Graph’ seçeneği ile de o aşamanın grafiklerini takip edilebilmektedir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **: Yılmaz Satı**

Doğum Tarihi ve Yeri **: 11/09/1990 - İzmir**

E-posta **: yusufyilmazsati@hotmail.com**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** İstanbul Teknik Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- BAHAŞ İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Özyurt Madencilik İnşaat Sanayi Ticaret A.Ş. (Ortak Girişim) - Saha Uygulaması (Stajyer)
- Özyurtlar İnşaat - Büro ve Saha Uygulaması (Stajyer)
- Geoport Zemin - Saha Mühendisi