

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KONSOLİDASYONLU-DRENAJLI ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEY
YÖNTEMİ İLE KALICI KAYMA DİRENCİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayşegül BAYIN

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep İYİSAN

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KONSOLİDASYONLU-DRENAJLI ÜÇ EKSENLİ BASINÇ DENEY
YÖNTEMİ İLE KALICI KAYMA DİRENCİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayşegül BAYIN
(501081302)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2011

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Recep İYİSAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Oğuz TAN (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. M. Şükrü ÖZÇOBAN (YTÜ)

OCAK 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Geoteknik mühendisliğinin önemli konularından biri şev stabilitesi ve stabilite analizleridir. Daha önceden göçmüş ve yeniden harekete geçen şevlerde stabilite analizlerinde kalıcı kayma direncinin kullanılması gerekmektedir. Zeminlerde kalıcı kayma direnci büyük deformasyonlar sonrasında oluştuğundan laboratuvarında, uzun süren özel deneylerle belirlenmektedir. Bu çalışmada kalıcı kayma direnci parametrelerinin konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemi ile belirlenmesi ve endeks özellikleri ile değişimi incelenmiştir. Ayrıca farklı deney yöntemlerinin kalıcı kayma direncine etkisini incelemek için tekrarlı kesme kutusu deneyleride yapılmış, her iki deney yöntemi sonucu bulunana parametreler karşılaştırılmıştır.

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Yüksek Lisans programı çerçevesinde hazırladığım bu tez çalışmasına başladığım günden bu yana her türlü özveriye gösterip, daima yapıcı eleştirilerde bulunan, bilim dışındaki her türlü konuda yardım ve fikirlerini esirgemeyen değerli danışmanım Doç.Dr. Recep İYİSAN'a, yüksek lisans tez çalışmam süresince değerli katkıları için Araştırma Görevlisi Sayın Mustafa HATİPOĞLU'na ve Teknisyen Sayın Semih VIÇ'e hürmet ve şükranlarımı sunar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür etmeyi borç bilirim. Ayrıca bilgi ve emekleri geçen diğer tüm arkadaşlarıma, ne kadar teşekkür etsem de borcumu ödeyemeceğim, maddi manevi desteklerini ömrüm boyunca esirgemeyen sevgili annem ve babama, amcam Sefer BAYIN' a ve diğer aile üyelerine teşekkür ederim.

Aralık 2010

Ayşegül BAYIN

İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
KISALTMALAR	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	3
1.2 Kapsam	4
2. ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİ.....	5
2.1 Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi	6
2.2 Kumların Kayma Direnci	8
2.3 Killerin Kayma Direnci	10
2.4 Efektif Gerilmeler ve Kayma Direnci.....	13
2.5 Kayma Direncinin Belirlenmesi	14
2.5.1 Laboratuvar deneyleri	15
2.5.1.1 Serbest basınç deneyi	15
2.5.1.2 Kesme kutusu deneyi	16
2.5.1.3 Basit kesme deneyi	18
2.5.1.4 Üç eksenli basınç deneyi.....	19
2.5.2 Arazi deneyleri	21
3. ZEMİNLERDE KALICI KAYMA DİRENCİ.....	23
3.1 Kalıcı Kayma Direncinin Tanımı	24
3.2 Geoteknik Mühendisliğinde Kalıcı Kayma Direncinin Önemi	28
3.3 Kalıcı Kayma Direnci Mekanizması	30
3.4 Kalıcı Kayma Direncinin DeneySEL Yöntemlerle Belirlenmesi.....	33
3.4.1 Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi	34
3.4.2 Tekrarlı kesme kutusu deneyi	37
3.4.3 Halka kesme deneyi	38
3.5 Kayma Deformasyonu ile Kalıcı Kayma Direncinin Değişimi	40
3.6 Kalıcı Kayma Direncini Etkileyen Faktörler	41
3.6.1 Mineralojinin etkisi	41
3.6.2 Kıvam limitlerinin etkisi	43
3.6.3 Kil yüzdesinin etkisi	46
3.6.4 Efektif normal gerilmenin etkisi	48
3.6.5 Kesme hızının etkisi.....	48
3.6.6 Zemin yapısının etkisi	53
3.7 Zeminlerin Kalıcı Kayma Direnci Açısı İle EndeksÖzellikleri Arasındaki İlişki	54

4. DENEYSEL ÇALIŞMA	67
4.1 Kullanılan Numunelerinin Geoteknik Özellikleri	68
4.2 Numune Hazırlama Yöntemi	70
4.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi	71
4.3.1 Üç eksenli deney numunelerinin hazırlanması ve deney	75
4.3.2 Hesaplamalar	78
4.4 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi	82
4.4.1 Tekrarlı kesme kutusu deney numunelerinin hazırlanması	83
4.4.2 Hesaplamalar	86
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ... 91	91
5.1 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Deney Sonuçları	93
5.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçları	97
5.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	99
5.3.1 Kalıcı kayma direncinin kıvam limitleri ve plastisite indisi ile değişimi	99
5.3.2 Kalıcı kayma direnci açısı ile numunelerin diğer geoteknik özellikleri arasındaki ilişki	103
5.4 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç ve Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	108
5.5 Geçmişteki Çalışmalarla Karşılaştırma Yapılması	116
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR	123
EK A	129
A.1 Elek ve Hidrometre Analizleri	129
EK B	147
B.1 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyleri	147
B.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri	177
ÖZGEÇMİŞ	189

KISALTMALAR

AK	: Aşırı Konsolide
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
ASTM	: American Standarts for Testing Material
B.S.B.	: Boşluk Suyu Basıncı
CD	: Konsolidasyonlu – Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
CU	: Konsolidasyonlu – Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi
İ.D.O.	: İnce Dane Oranı
NK	: Normal Konsolide
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması
UU	: Konsolidasyonsuz – Drenajsız Üç Eksenli Basınç Deneyi

SEMBOL LİSTESİ

A, B	: Skempton parametreleri
A₀	: Numunenin ilk kesit alanı
A_i	: Düzeltilmiş enkesit alanı
c	: Kohezyon
c_r ve c_p	: Pik ve kalıcı kohezyon
D	: Çap
D_r	: Rölatif sıkılık
e	: Boşluk oranı
G_s	: Özgül birim hacim ağırlık
I_p	: Plastisite indisi
KY	: Kil yüzdesi
P	: Düşey yük
q_u	: Serbest basınç direnci
R	: Regrasyon katsayısı
S	: Doygunluk derecesi
u	: Boşluk suyu basıncı
V	: Hacim
w	: Su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_p	: Plastik limit
φ	: Kayma direnci açısı
σ	: Normal gerilme
σ'_n	: Efektif normal gerilme
Δσ	: Deviator gerilme
ΔL	: Yatay yerdeğiştirme
ΔH	: Düşey yerdeğiştirme
Δσ₃	: Çevre basıncındaki artım
ΔV	: Hacim değişimi
Δu	: Boşluksuyu basıncındaki değişim
τ	: Kayma gerilmesi
τ_r	: Kalıcı kayma direnci
τ_p	: Pik kayma direnci
ε	: Deformasyon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Kırılma-yenilme kriterleri (Önalp, 2007).....	8
Çizelge 3.1: Pik ve kalıcı kayma dirençlerinin belirlendiği deplasman değerleri (Skempton, 1985).....	40
Çizelge 3.2: Bazı kil minerallerinin ortalama kalınlık-çap ve özgül yüzey değerleri (Bardet, 1997)	44
Çizelge 3.3: Çeşitli kil mineralleri ve likit limit (ω_L), plastik limit (ω_P) ve aktivite (A) değerleri (Das, 2002).....	44
Çizelge 3.4: Geri analiz ve laboratuvar kalıcı kayma dirençlerinin karşılaştırılması (Skempton, 1985).....	51
Çizelge 3.5: Bazı kil mineralleri ve data sayıları (Suzuki ve diğ., 2005).....	59
Çizelge 4.1: Deney numunelerinin geoteknik özellikleri	69
Çizelge 4.2: AYS-2 numunesine ait 200 kPa çevre basıncı altında deney sırasında alınan okumalar.....	79
Çizelge 4.3: AYS-2 numunesine ait çevre basınçları ve deviator gerilme	81
Çizelge 4.4: AYS-2 numunesi için deney sırasında alınan okumalar, düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamaları	87
Çizelge 4.5: AYS-2 numunesinde her normal gerilme için pik kayma direnci.....	89
Çizelge 5.1: AYS numunelerinin kalıcı kayma direnci ile ilişkilerinin incelendiği özellikleri	92
Çizelge 5.2: AYS numunelerinin üç eksenli deney sonuçları	96
Çizelge 5.3: AYS numunelerinin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları	99
Çizelge 5.4: Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki.....	100
Çizelge 5.5: Kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limit arasındaki ilişkiler	101
Çizelge 5.6: Kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişkiler	102
Çizelge 5.7: Kalıcı kayma direnci açısı ile w_p/w_L oranı arasındaki ilişkiler	103
Çizelge 5.8: Kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişkiler	104
Çizelge 5.9: Kalıcı kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişkiler	105
Çizelge 5.10: Kalıcı kayma direnci açısı ile ince dane oranı arasındaki ilişkiler	106
Çizelge 5.11: Kalıcı kayma direnci açısı ile ϕ_p arasındaki ilişkiler	107
Çizelge 5.12: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki	109
Çizelge 5.13: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki	109
Çizelge 5.14: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki	110
Çizelge 5.15: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limit ve likit limit oranı arasındaki ilişki	111
Çizelge 5.16: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki	112

Çizelge 5.17: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci ile aktivite arasındaki ilişki.....	113
Çizelge 5.18: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısı ile ince dane oranı arasındaki ilişki.....	114
Çizelge 5.19: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı ve pik kayma direnci arasındaki ilişki.....	115
Çizelge 5.20: Ürkmez, A.R., (2009) Tekrarlı K.K deney sonuçları ve yapılan çalışmadaki Tekrarlı K.K sonuçları.....	117
Çizelge A.1: AYS-1 numunesi Elek analizi	129
Çizelge A.2: AYS-1 hidrometre analizi.....	129
Çizelge A.3: AYS-2 numunesi elek analizi.....	131
Çizelge A.4: AYS-2 numunesi hidrometre analizi	131
Çizelge A.5: AYS-3 numunesi elek analizi.....	133
Çizelge A.6: AYS-3 numunesi Hidrometre analizi	133

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Coulomb sürtünme teorisi	6
Şekil 2.2: Mohr-coulomb göçme zarfı	7
Şekil 2.3: Kesme kutusu deneyinden kayma direnci açısının bulunması	10
Şekil 2.4: Normal ve aşırı konsolide zeminler için kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi	11
Şekil 2.5: Toplam ve efektif mohr gerilme daireleri	14
Şekil 2.6: Serbest basınç deney aleti	16
Şekil 2.7: Kesme kutusu deney aleti	17
Şekil 2.8: Basit kesme deney aleti (GCTS web sayfası)	19
Şekil 2.9: Üç eksenli deney hücresi	20
Şekil 2.10: Üç eksenli deney yöntemi için Mohr dairesi	20
Şekil 3.1: Pik ve kalıcı kayma direnci zarfları ve kayma dirençleri, (Head, 2006)	24
Şekil 3.2: Aşırı konsolidasyonun kayma gerilmesi ile kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi üzerindeki etkisi (Head, 2006)	25
Şekil 3.3: Kesme işlemi sırasında hacimdeki ve kesme boşluk oranındaki değişim (Head, 2006)	26
Şekil 3.4: Normal ve aşırı konsolide zeminler için kırılma zarfları (Das, 2006)	27
Şekil 3.5: Kil yüzdesi yüksek zeminlerin normal gerilme altında kayma gerilmeleri (Skempton, 1985)	30
Şekil 3.6: Kil yüzdesi düşük zeminlerin normal gerilme altında kayma dirençleri (Skempton, 1985)	31
Şekil 3.7: Pik ve kalıcı kayma direnci açıları ile kil yüzdesi ve plastisite indisi arasındaki ilişki (Lupini, 1981)	32
Şekil 3.8: Üç eksenli drenajlı deney aleti (İTÜ)	35
Şekil 3.9: Kesme kutusu deney aleti (İTÜ)	37
Şekil 3.10: Halka kesme deney aleti (İTÜ)	39
Şekil 3.11: Kil mineralojisinin kalıcı kayma direncine etkisi (Stark, 1994)	45
Şekil 3.12: Güney Galler aşırı konsolide zeminlerinin w_p/w_L ile kalıcı direnç açısı arasındaki bağıntı (De ve Furdas, 1973)	45
Şekil 3.13: Dane şekli ile dane çapı arasındaki ilişki (Mitchell, 1993)	47
Şekil 3.14: Farklı kesme hızlarında kaolinin belirlenen kalıcı durumları için elektron mikroskopundan görünümü	50
Şekil 3.15: 400 mm/dak değerindeki kesme hızının kalıcı kayma direncine etkisi (Skempton, 1985)	52
Şekil 3.16: Kalıcı kayma direnç açısına kesme hızının etkisi (Koltuk, 2005)	52
Şekil 3.17: Plastisite indisi ile kalıcı kayma direncinin değişimi (Skempton, 1964)	55
Şekil 3.18: Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direncinin değişimi (Skempton, 1964)	55
Şekil 3.19: Likit limit ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki (Mesri, 1986)	56
Şekil 3.20: Likit limit, kil yüzdesi ve efektif gerilme ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki (Stark, 1994)	57

Şekil 3.21: Kalıcı kayma direnci açısının ΔP ile değişimi (Wesley, 2003).....	58
Şekil 3.22: Kalıcı direnç ile plastisite indisi arasındaki ilişki (Suzuki, 2005).....	59
Şekil 3.23: Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki (Suzuki, 2005).....	60
Şekil 3.24: Kalıcı direnç ile w_p/w_L oranı arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)	60
Şekil 3.25: Halka kesme ve tekrarlı kesme deneylerine göre Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit ilişkisi (Yılmaz, 2006)	62
Şekil 3.26: Kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisi ilişkisi (Yılmaz, 2006)....	62
Şekil 3.27: Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (İyisan ve diğ. 2006)	63
Şekil 3.28: Kalıcı kayma direnci ile likit limit arasındaki ilişkinin yapılan çalışmalarda karşılaştırılması (Ürkmez, A. 2009).....	64
Şekil 3.29: A ve B numunelerinin birleştirilerek geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması (Ürkmez, 2009).....	65
Şekil 4.1: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri.....	70
Şekil 4.2: Proktor kalıbı, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi için numune kalıpları	71
Şekil 4.3: Üç eksenli basınç deney sistemi	72
Şekil 4.4: Üç eksenli deney hücresi şematik kesiti.....	73
Şekil 4.5: Üç eksenli basınç deneyi ters basınç ve çevre basıncı hücresi.....	73
Şekil 4.6: Alt başlık ve drenaj kanalları.....	74
Şekil 4.7: Üç eksenli hücreye ait eksenel yükleme kolu	74
Şekil 4.8: Üç eksenli deney numunesinin hazırlanması	76
Şekil 4.9: Üç eksenli deney hücresinde kesilmiş numune	78
Şekil 4.10: AYS-2 numunesi için ε - $\Delta\sigma$ ve ε -u eğrisi.....	81
Şekil 4.11: AYS-2 numunesine ait kalıcı ve pik kayma direnci mohr daireleri.....	81
Şekil 4.12: Kesme kutusu deney aletinin genel görünümü ve kesme kutusu deney aletinin kesiti	82
Şekil 4.13: Numunenin kesme kutusuna yerleştirilmesi, Kesme kutusu deneyinde konsol kol ve konsol kola yüklemenin yapılması	84
Şekil 4.14: Kesilmiş bir numunenin görünümü	85
Şekil 4.15: AYS-2 numunesi yatay yerdeğiştirme-kayma gerilmesi grafiği.....	88
Şekil 4.16: AYS-2 numunesi için pik ve kalıcı kayma direnci zarfı	89
Şekil 5.1: AYS-10 numunesine ait üç eksenli deviatör gerilme-birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı-birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi.....	93
Şekil 5.2: AYS-10 numunesi pik kayma direnci parametreleri için mohr daireleri ..	95
Şekil 5.3: AYS-10 numunesi için kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi .	97
Şekil 5.4: AYS-10 numunesi için kalıcı ve pik göçme zarfları	98
Şekil 5.5: Kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi	100
Şekil 5.6: Kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi	101
Şekil 5.7: Kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi	102
Şekil 5.8: Kalıcı kayma direnci açısı'nın plastik limit/likit limit oranı ile değişimi	103
Şekil 5.9: Kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi.....	104
Şekil 5.10: Kalıcı kayma direnci açısı'nın aktivite ile değişimi.....	105
Şekil 5.11: Kalıcı kayma direnci açısının ince dane oranı ile değişimi.....	106
Şekil 5.12: Kalıcı kayma direnci açısının pik kayma direnci açısı ile değişimi	107
Şekil 5.13: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi	108
Şekil 5.14: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi	109

Şekil 5.15: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi	110
Şekil 5.16: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ve likit limit oranı ile değişimi	111
Şekil 5.17: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi	112
Şekil 5.18: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının aktivite ile değişimi	113
Şekil 5.19: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının ince dane oranı ile değişimi	114
Şekil 5.20: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı ve pikkayma direnci açısının değişimi	115
Şekil 5.21: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma direnci açılarının değişimi	116
Şekil 5.22: Yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının Ürkmez, A.R., (2009) in tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile karşılaştırılması	117
Şekil 5.23: Yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının Ürkmez (2009) nin tekrarlı kesme kutusu çalışmaları ile birlikte değerlendirilmesi	118
Şekil 5.24: Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deney sonuçlarının geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması	118
Şekil A.1: AYS-1 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	130
Şekil A.2: AYS-2 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	132
Şekil A.3: AYS-3 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	134
Şekil A.4: AYS-4 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	135
Şekil A.5: AYS-5 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	136
Şekil A.6: AYS-6 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	137
Şekil A.7: AYS-7 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	138
Şekil A.8: AYS-8 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	139
Şekil A.9: AYS-9 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	140
Şekil A.10: AYS-10 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	141
Şekil A.11: AYS-11 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	142
Şekil A.12: AYS-12 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	143
Şekil A.13: AYS-13 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	144
Şekil B.1: AYS-1 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	147
Şekil B.2: AYS-1 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	148
Şekil B.3: AYS-2 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	149
Şekil B.4: AYS-2 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	150
Şekil B.5: AYS-3 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi, ...	151
Şekil B.6: AYS-3 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	152
Şekil B.7: AYS-4 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	153
Şekil B.8: AYS-4 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi	154

Şekil B.9: AYS-5 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	155
Şekil B.10: AYS-5 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	156
Şekil B.11: AYS-6 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	157
Şekil B.12: AYS-6 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	158
Şekil B.13: AYS-7 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	159
Şekil B.14: AYS-7 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	160
Şekil B.15: AYS-8 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	161
Şekil B.16: AYS-8 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	162
Şekil B.17: AYS-9 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	163
Şekil B.18: AYS-9 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	164
Şekil B.19: AYS-10 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	165
Şekil B.20: AYS-10 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	166
Şekil B.21: AYS-11 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	167
Şekil B.22: AYS-11 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	168
Şekil B.23: AYS-12 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	169
Şekil B.24: AYS-12 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	170
Şekil B.25: AYS-13 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	171
Şekil B.26: AYS-13 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	172
Şekil B.27: AYS-14 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	173
Şekil B.28: AYS-14 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	174
Şekil B.29: AYS-15 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	175
Şekil B.30: AYS-15 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısıalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısıalma eğrileri ve mohr dairesi	176
Şekil B.31: AYS-2 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi.....	177
Şekil B.32: AYS-2 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları.....	178
Şekil B.33: AYS-7numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi.....	179
Şekil B.34: AYS-7 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları.....	180
Şekil B.35: AYS-9 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi.....	181
Şekil B.36: AYS-9 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları.....	182

Şekil B.37: AYS-10 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi....	183
Şekil B.38: AYS-10 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları.....	184
Şekil B.39: AYS-11 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi....	185
Şekil B.40: AYS-11 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları.....	186
Şekil B.41: AYS-12 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi....	187
Şekil B.42: AYS-12 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarflar.....	188

KONSOLIDASYONLU–DRENAJLI ÜÇ EKSENİ BASINÇ DENEY YÖNTEMİ İLE KALICI KAYMA DİRENCİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Zeminlerde göçme meydana gelmeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi değerine zeminin kayma direnci denilmektedir. Kayma gerilmesi, en büyük değere ulaştıktan sonra belirli bir seviyede artan deformasyonla değişmeyen sabit bir değer alır, bu sabit değere kalıcı kayma direnci denilir. Kalıcı kayma direnci, aşırı konsolide-fisürlü kil zeminlerde kayma gerilmesiyle kayma deformasyonu arasındaki ilişki incelendiğinde görülmektedir. Fisürlü killerin oluşturduğu şevlerde yapılacak mühendislik yapıların tasarımında ve şevlerin stabilitesinde kalıcı kayma direnci büyük önem taşımaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma direncini etkileyen başlıca faktörler; zemin cinsi, mineralojik yapı, efektif normal gerilme seviyesi olarak sıralanabilir. Kalıcı kayma direnci laboratuvarında başlıca tekrarlı kesme kutusu, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve halka kesme deney yöntemleri ile belirlenmektedir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre hem üstünlükleri hem de sınırlayıcı yanları bulunmaktadır. Kalıcı kayma direncini belirlemek için kullanılan tekrarlı kesme kutusu deneyinde, numune kalıcı kayma direncine ulaşıncaya kadar ileri geri kesildiği için tek bir yönde kayma oluşmamaktadır. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde arazi koşullarının iyi modellenenebilmesine karşılık numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı bulunmaktadır. Numune üzerinde sınırsız deformasyona izin verecek şekilde geliştirilen halka kesme aleti ile kalıcı kayma direncinin belirlenmesi özellikle rotasyonel kaymayı modellediği için daha güvenli sonuçlar vermektedir. Ülkemizde kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için genelde tekrarlı kesme kutusu deneyi tercih edilmektedir.

Bu çalışmada kalıcı kayma direncini belirlemek için farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde, farklı konsolidasyon basınçları altında aşırı konsolidasyon oranı sabit tutularak konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve deney yöntemlerinin kalıcı kayma direnci parametrelerine etkisini araştırmak için seçilen numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci parametrelerinin zeminin endeks özellikleri ile ilişkileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar geçmişte yapılmış çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Kalıcı kayma direnci açısını; likit limit, plastik limit, plastisite indisi, kil yüzdesi ve ince dane oranına bağlı olarak tahmin edebilmek ve pratik amaçlar doğrultusunda kullanabilmek için korelasyonlar geliştirilmiştir. Farklı numuneler üzerinde farklı deney yöntemleri sonucunda belirlenen kalıcı kayma direncinin artan likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ile birlikte azaldığı belirlenmiştir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma direncinin tekrarlı kesme kutusu sonucu elde edilen kalıcı kayma direncinden daha büyük olduğu, bulunmuştur.

DETERMINATION OF RESIDUAL SHEAR STRENGTH BY CONSOLIDATED-DRAINED TRIAXIAL TEST

SUMMARY

The greatest shear strain value that soil can resist before failure is named as soils shear strength. Shear strain obtains a constant value after failure with a precisely increasing deformation this constant value is known as residual shear strength. Residual shear strength is observed when the relation between shear strain and shear deformation investigated in over consolidated fissured clayey soil. Residual shear strength is an important issue in designing engineering structures on slopes constituted from fissured clayey soil and slope stability. Major factors effecting residual shear strength can be listed as type of soil, mineralogical structure, level of effective normal strain. Residual shear strength is determined from laboratory tests as reversal shear box test, consolidated–drained triaxial compression test, ring shear test. Each method has advantages and limitations. As the sample sheared back, a forward until reaching residual shear strength during determination of residual shear strength in reversal shear box test, shearing is not observed in one direction. In consolidated-triaxial test site conditions can be finely modeled, but there is a limitation in applicable deformation to the sample. Determination of residual shear strength gives more reliable results with the ring shear apparatus that allows unlimited deformation on the sample as it models especially rotational shearing. Generally in our country, for determination of residual shear strength parameters reversal shear strength test is preferred.

In this study; consolidated-drained triaxial compression test under different consolidation pressures in which over consolidation ratio is constant and investigate the effect of test methods on residual shear strength parameters, reversal shear box tes is performed to determine residual shear strength of samples having different geotechnical properties. The relation between soil index properties and residual shear strength parameters obtained from test results is investigated; obtained results are compared with the results obtained from past studies. Correlations are developed to estimate residual shear strength angle from liquid limit, plastic limit, plasticity index, clay percentage, fine-grained particle size. It is determined that residual shear strength, obtained from different test methods with several samples, decreases with increasing liquid limit, plastic limit and plasticity index. It is found that residual shear strength obtained from consolidated-drained triaxial test results are greater than the residual shear strength obtained from reversal shear box test results.

1. GİRİŞ

Zemin tabakaları içinde derinlik boyunca, gerek kendi ağırlığından ve gerekse uygulanan yüklerden dolayı gerilme artışları oluşmakta ve bu artışlar zeminde şekil değiştirmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Zeminin diğer mühendislik malzemelerine göre gerilme-şekil değiştirme davranışı daha karmaşıktır. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, zeminin başlangıç gerilme durumuna, gerilme geçmişine, yükleme anındaki drenaj koşullarına ve yükleme hızı gibi birçok faktöre bağlıdır. Zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmeler genellikle uygulanan yükler ile doğrusal olarak artmamakta, yükler kaldırıldığında şekil değiştirmelerin büyük bir kısmı kalıcı olmaktadır.

Uygulanan yüklerin meydana getirdiği gerilmelerin, zeminin kayma direncini aşması durumunda göçmenin meydana geldiği bilinmektedir. Göçme yüzeyi boyunca göçmeye neden olan kuvvetler ile göçmeye karşı koyan kuvvetlerin karşılaştırılmaları ve göçmeye karşı bir güvenlik sayısının belirlenmesi başta şevlerin stabilitesi olmak üzere temellerin taşıma gücü, istinat yapılarına gelen yanal toprak basınçlarının belirlenmesi gibi bütün stabilite problemlerinde yapılmaktadır. Zeminlerin kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi incelendiğinde, kayma gerilmesinin aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda deformasyonun artmasıyla birlikte en büyük gerilme değerine ulaşıncaya kadar arttığı ve bir tepe noktasına ulaştığı, daha sonra azalarak sabit bir değer aldığı görülmektedir. Bu sabit kalan kayma gerilmesi değerine kalıcı ya da rezidüel kayma direnci denilmektedir. Kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu ilişkisi normal konsolide killerde veya gevşek kumlarda incelendiğinde ise gerilme deformasyon ilişkisinde belirli bir pik değer elde edilmediği görülmekte, artan deformasyon ile birlikte kayma gerilmesinin yönlendiği değer yine kalıcı kayma direnci olmaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma direncinin belirlenmesi, özellikle şev duraylılığına duyulan ilgi ile önem kazanmıştır. Kalıcı kayma direnci büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan göçmeye neden olan gerilme değeri değildir. Göçme sonucu oluşan yüzeylerde direnin kalıcı kayma direnci değerinde olduğu ya da gittikçe bu değere yaklaşmakta olduğu bilinmektedir.

Kalıcı kayma direnci, önceden büyük kayma hareketlerinin meydana gelmiş olduğu göçme yüzeyleri içeren şevlerin stabilitesi ve fisürlü-sert kil zeminlerin oluşturduğu şevlerin stabilite analizlerinde önem kazanmaktadır. Ülkemizde bulunan şevlerin büyük bir kısmının aşırı konsolide veya fisürlü killerden meydana geldiği göz önünde bulundurulduğunda ve özellikle ulaşım alanlarındaki bu şevlerde belirli bir süreden sonra önemli stabilite problemleriyle karşılaşılması kalıcı kayma direnci parametrelerinin önemini göstermektedir. Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları ve kayma direnci parametreleri laboratuvar deney yöntemleri ile elde edilebilir. Tekrarlı kesme kutusu, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve halka kesme deneyi zeminlerin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için kullanılan laboratuvar deney yöntemleridir. Zeminlerin kalıcı kayma direncini etkileyen en önemli faktörler zemin cinsi, mineralojisi, efektif gerilme ve kesme hızıdır. Ayrıca kalıcı kayma direncini belirlemek için kullanılan deney yöntemi de kalıcı kayma direnci parametrelerini etkilemektedir (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

Bu çalışma kapsamında zeminlerin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde farklı konsolidasyon basınçları altında aşırı konsolidasyon oranı iki olacak şekilde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneylerde numune sürekliliğini sağlamak için Standart Proktor sıklığında hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Değişik konsolidasyon basınçları altında konsolide edilmiş numuneler üzerinde yaklaşık aynı kesme hızında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deney yöntemlerinin kalıcı kayma direncine etkisini belirlemek için seçilen numuneler üzerinde yaklaşık aynı kesme hızında tekrarlı kesme kutusu deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları zeminlerin geoteknik özellikleri ile ilişkileri incelenmiş ve iki farklı deney yöntemi sonucu bulunan kalıcı kayma direnci açıları karşılaştırılmıştır. Pratik amaçlar doğrultusunda, kalıcı kayma direnci açısını tahmin edebilmek için zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olan korelasyonlar geliştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kalıcı kayma direncinin artan likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ile birlikte azaldığı gözlemlenmiş, elde edilen sonuçlar önceki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli

deney sonucu elde edilen kalıcı kayma direncinin tekrarlı kesme kutusu deney sonucu elde edilen kalıcı kayma direncinden daha büyük olduğu bulunmuştur.

1.1 Amaç

Bu çalışmada zeminlerin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde, farklı konsolidasyon basınçları altında, aşırı konsolidasyon oranı sabit olacak şekilde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılması ve deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci parametrelerinin zeminin geoteknik özellikleri ile ilişkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca farklı deney yöntemlerinin kalıcı kayma direnci parametrelerine etkisini araştırmak amacı ile seçilen numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmesi, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci parametreleri ile tekrarlı kesme kutusu sonucu elde edilen parametrelerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda, farklı kil yüzdelere, likit limit ve plastik limite sahip numuneler üzerinde kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek amacıyla konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri, farklı çevre basınçları altında aynı zamanda ve aynı şartlarda hazırlanan özdeş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan numuneler farklı çevre basınçlarında aşırı konsolidasyon oranı iki ($AKO=2$) olacak şekilde konsolide edilmiş ve konsolide olmuş, doygunluk kazanmış numune, drenaja mücade edilecek hızda kesilmiştir. Zemin numuneleri üzerinde deney yönteminin kalıcı kayma direncine etkisini belirlemek amacıyla seçilen numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri de yapılmıştır.

Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile başta likit limit, plastik limit, plastisite indisi olmak üzere zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda, kalıcı kayma direnci açısını, zeminlerin geoteknik özelliklerine bağlı olarak tahmin edebilmek amacıyla çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Kullanılan deney yöntemlerinin kalıcı kayma direnci parametrelerine etkisini göstermek için tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney sonuçlarından bulunan kalıcı kayma direnci açıları karşılaştırılmış. Ayrıca bu çalışmada elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla kıyaslanmıştır.

1.2 Kapsam

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada zeminlerin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için farklı endeks özelliklere sahip numuneler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci parametreleri ile geçmişte yapılmış çalışmalar karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, zeminlerin kayma direncinden, zeminlerde göçmeyi tanımlayan kırılma hipotezlerinden biri olan Mohr-Coulomb kırılma hipotezinden, kayma direncini etkileyen faktörlerden, arazide ve laboratuvar da belirlenmesinden bahsedilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümü, zeminlerin kalıcı kayma direnci hakkında genel bilgileri, geoteknik mühendisliğindeki önemi, laboratuvar deney yöntemleri ile belirlenmesi, kalıcı kayma direncini etkileyen faktörleri ve zeminlerin kalıcı kayma direnci açısı ile geoteknik özellikleri arasındaki ilişkileri, konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

Dördüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan numunelerin endeks özellikleri ve deneylerde kullanılacak numuneleri hazırlama yöntemleri, kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için yapılan laboratuvar deney yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde ise yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinin sonuçları, deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler verilmiş. Pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilmesi için geliştirilen bağıntılar bu bölümde verilmiştir. Ayrıca deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile geçmişteki çalışmalar birlikte incelenmiştir.

Son bölümde ise deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerden yararlanarak çıkartılan genel sonuçlar yer almaktadır.

2. ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİ

Zeminlerin kayma direnci zemin mekaniğinin en önemli konusu olarak nitelendirilebilir. Zeminlerde göçme, kırılma, yenilme veya kayma, ortamın uygulanan gerilmelere dayanma yeteneğinin kaybolması olarak tarif edilebilir. Kayma direncinin ilk incelemesi Coulomb tarafından yapılmıştır. Zeminlerin kayma direnci basitçe, boşluk oranı (e), zeminin türü, etkisinde kaldığı gerilmeler (σ) ve yapı dokusuna bağlıdır (Önalp, 2007). Sığ veya derin temellerin taşıma kapasitesi, şev stabilitesi, istinat duvarı tasarımı gibi geoteknik mühendisliği problemlerinin çoğu kayma direncinin bir değerlendirmesini gerektirir. Bu sebeple zeminlerin kayma direncinin doğru bir şekilde belirlenmesi geoteknik mühendisliğinde çok önemlidir.

Zeminlerin kayma direnci göçme meydana gelmeden zeminin karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlamıştık. Kayma direnci kavramı, zeminlerin temel özelliği değildir, yükleme ve drenaj koşullarına, zamana bağlı olarak değişim gösterebilir. Laboratuvarda yapılan deneylerde ölçülen değerler, deneylerin yapıldığı koşullara bağlı olmaktadır. Ayrıca çalışmalarda ölçülen kayma direnci değerleri drenaj koşullarına da bağlıdır (Head, 2006).

Zeminlerin kayma direnci kavramını 4 bölüme ayırmak mümkündür

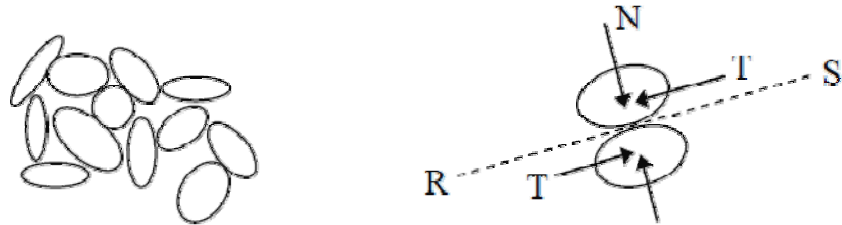
- a) Zamandan bağımsız, drenajın olduğu kum-çakıl gibi iri daneli zeminlerin kayma direnci,
- b) Drenajsız koşullar altında bulunan çok yumuşak kohezyonlu zeminlerin kayma direnci,
- c) İnce daneli, killi zeminlerin kayma sırasında drenaja izin veren, yeterince yavaş bir yerdeğiştirme hızına bağlı drenajlı kayma direnci,
- d) Aşırı konsolide killer gibi büyük yerdeğiştirme hareketleri ve yavaş yerdeğiştirme hızı gerektiren zeminlerin uzun dönem veya drenajlı kalıcı kayma direnci,

Yukarıdaki koşulların hangisinde olursa olsun kayma direncinin doğru şekilde belirlenmesi yapılacak mühendislik yapılarının tasarımında, yapım süresinde ve sonrasında stabil kalmasını sağlamada önemlidir.

Zeminlerin kayma direncini belirlemek için birçok göçme hipotezi geliştirilmiştir. Kayma direncinin matematiksel bir ifade ile gösterimi Coulomb (1776) ve Tresca (1869) ile başlamıştır. Zeminler için ilk geçerli göçme hipotezi 1911 yılında Mohr tarafından geliştirilmiştir. Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan Mohr hipotezini yıllar içinde başka teoriler izlemiştir. Bunlar içinde en basit olanı ve uygulamada yaygın olarak kullanılanı Mohr-Coulomb göçme hipotezidir.

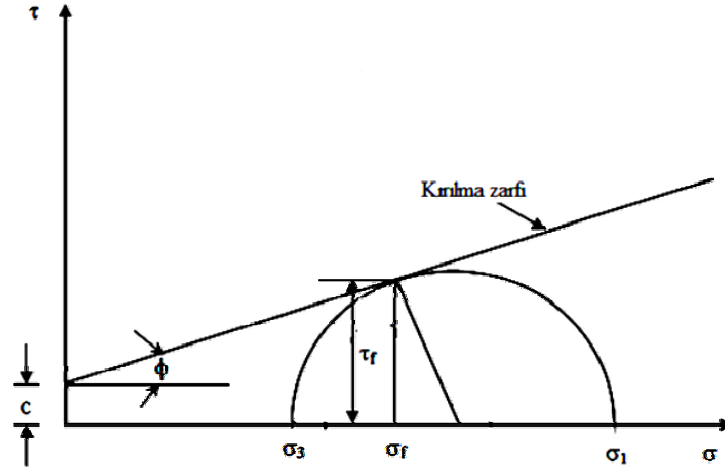
2.1 Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi

Göçmeye neden olan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önünde bulunduran birçok hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezler içerisinde en çok kullanılan hipotez, kayma direncinin ilk incelemesini ve matematiksel bir ifade ile gösterimini yapan Coulomb (1776) ile bir matematikçi olan O.Mohr'un geliştirdiği Mohr-Coulomb göçme hipotezidir. Bu hipoteze göre zeminlerin kayma direnci, Coulomb sürtünme yasasına dayanmaktadır. Şekil 2.1'de R-S doğrultusunda birbirleri üzerinde kaydırılmaya çalışılan iki blok görülmektedir. Hareketin gerçekleşmesi için uygulanan T kuvvetinin bloklar arasındaki sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir (Bardet, 1997). Mohr malzemeler için bir yenilme kriteri geliştirmiştir. Bu kriter gere, malzemelere uygulanan kayma gerilmesi kayma düzlemi üzerinde normal gerilmenin belli bir değerine erişirse yenilme meydana gelir.



Şekil 2.1: Coulomb sürtünme teorisi

Mohr hipotezi zamanla Coulomb'un yatay bağıntısı ile birleştirilerek Mohr-Coulomb göçme hipotezi oluşturulmuştur. Buna göre zeminin kayma direnci Şekil 2.2'de gösterilen kırılma zarfı ile temsil edilmektedir.



Şekil 2.2: Mohr-coulomb göçme zarfı

Bu şekilde normal gerilmeler (σ) yatay eksen, kayma gerilmeleri (τ) düşey eksen üzerinde gösterilmektedir. Kırılma zarfının altında kalan gerilme durumları için göçme meydana gelmezken, bu zarfa ulaşıldığında zeminde göçme meydana gelmektedir. Göçme zarfının üzerinde herhangi bir gerilme durumu bulunmamaktadır. Zeminin göçme zarfının doğrusal olmadığı bilindiği halde, uygulamada bu eğri bir doğru olarak kabul edilir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği nokta c ve yatay ile yaptığı açı ϕ ile gösterilirse, kayma direncini veren bağıntı

$$\tau = c + \sigma \times \tan\phi \quad (2.1)$$

şeklinde yazılabilir. Bağıntı 2.1'de kohezyon olarak ifade edilen " c " ve kayma direnci açısı olarak tanımlanan " ϕ " değerleri, kayma direnci parametreleri olarak adlandırılır. Tanımlanan bu parametreler belirli bir zemin için sabit değildirler, deney sırasında yapılan yüklemelere ve drenaj şartlarına göre değişim göstermektedirler. Zeminlerin boşluklu bir yapıya sahip olduğu ve dane yüzeylerinin bir düzlem olmadığı bilinmektedir. Danelerin birbirlerinin hareketine engel olacak şekilde ve konumda bulunmaları (kilitlenme etkisi) " ϕ " değerine sürtünme açısı dışında başka anlamlar da yüklemektedir. Bundan dolayı zeminlerde " ϕ " için "sürtünme açısı" tanımlaması yerine "kayma direnci açısı" tanımlamasının kullanılması daha doğru olmaktadır (Mitchell, 1993).

Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan Mohr-Coulomb hipotezini yıllar içinde başka teoriler izlemiştir. Zeminlerin gevrek olmadığı kabulü ile çözüme giden bu teorilerden bazıları Çizelge 2.1’de özetlenmektedir. Zemin gibi sünek bir malzeme ile karşılaştırma için bir gevrek kırılma teorisi bağıntısı da çizelgede en altta verilmiştir. Burada σ_t malzemenin çekmeye dayanımı, k ise denklem değişmezini göstermektedir.

Çizelge 2.1: Kırılma-yenilme kriterleri (Önalp, 2007)

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	$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2k_4^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2} =$
Mohr - Coulomb	$(\sigma_1 - \sigma_3) = k_5^2(\sigma_1 + \sigma_3)$
Griffith (gevrek)	$\sigma_1 = \sigma_t(\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0)$ $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8k_6(\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0)$

Tresca-Coulomb hipotezi yatay bir doğruyu, Mohr-Coulomb ise eğimli bir doğruyu göstermektedir.

2.2 Kumların Kayma Direnci

İri daneli ya da kohezyonsuz olarak nitelendirilen kumlar, çakıllar ve bunların hakim olduğu zeminlerde en belirgin özellik yerçekimi, yani kitle kuvvetlerinin hakim olmasıdır. İri daneli zeminlerde sürtünme birincil derecede etkin olmaktadır ve bu zeminlerde kohezyon parametresi sıfır olarak alınmaktadır. Bu nedenle kum zeminler için kayma direnci bağıntısı;

$$\tau = \sigma \times \tan\phi \quad (2.2)$$

olarak belirtilmektedir. İri daneli zeminlerde drenajlı koşulların geçerli olduğunu düşünmek gerçekçi bir yaklaşım olmaktadır. Bunun nedeni, çakıl ve kumdan oluşan

zeminlerde permeabilite değerinin yüksek olmasından dolayı yükleme sırasında boşluk suyunun rahatlıkla zemin içerisinden çıkabilmesidir. Böylece boşluk suyu basıncında da herhangi bir artış meydana gelmemektedir. Sonuç olarak, kumların arazi yüklemeleri altında davranışları incelenirken drenajlı kayma direnci açısının bulunması yeterli olmaktadır.

Kum zeminlerin kayma direncini etkileyen başlıca faktörler aşağıdaki gibi sayılabilir

a) Danelerin mineralojik kökeni ve biçimi: Köşeli daneler arasında sürtünme ve kilitlenme önemli boyutlara varabilirken yuvarlak danelerde bu etki aynı düzeyde olmamaktadır.

b) Danelerin boyutu ve dağılımı: Üniform kumların sahip olduğu kayma direnci açısı iyi derecelenmiş zeminlerinkinden daha düşük değerdedir

c) Birim hacim ağırlık ve boşluk oranı: Birim hacim ağırlık ve bunun dolaylı göstergesi olan porozite veya boşluk oranı, kumun kayma direncinin etkileyen en önemli iki öğeden biridir. Birim hacim ağırlık azaldıkça ve boşluk oranı arttıkça kumun kayma direnci azalmaktadır

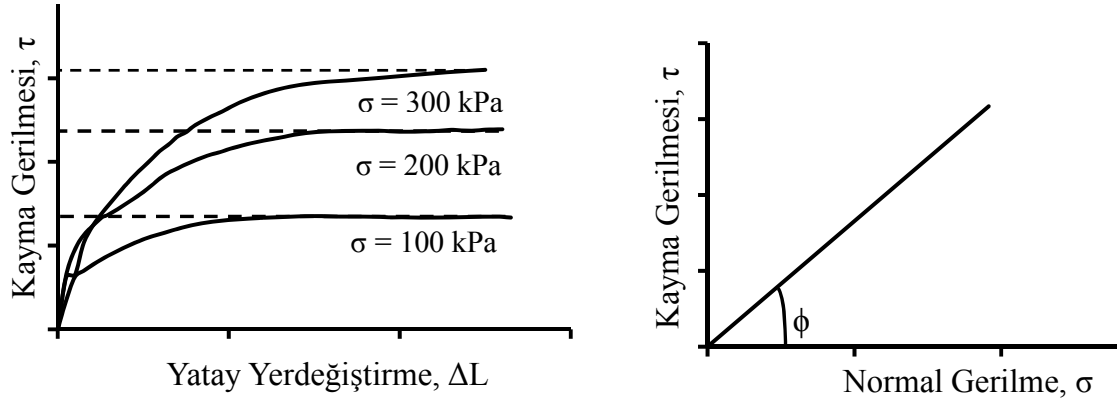
d) Doygunluk derecesi: Doygunluğunu yitirmesi durumunda kumun efektif çapına da bağlı olarak beliren kılcallık etkisi de kuma görünür kohezyon etkisi vermektedir

e) imentolanma: Özellikle deniz gibi tuzlu ortamda çökelmiş kumlarda organik ve anorganik etkilerle çimentolanma olabilir. Bu etki çoğu taşlaşma düzeyine erişmese de, kumda kayma direncini arttırmaktadır

f) Etkiyen efektif gerilmeler: Önceleri sadece killere özgü olduğu düşünülen aşırı konsolidasyon olayının kumlarda da etkin olduğu bulunduğundan aşırı konsolidasyon oranının kumların kayma direncini yükselten bir özellik olduğu unutulmamalıdır.

Kumun kayma direnci en kolay şekilde laboratuvar da yapılan kesme kutusu deneyi ile belirlenebilir. Kesme kutusu deneyi sonucu elde edilecek kayma direnci açısının doğru olabilmesi için hazırlanan deney numuneleri ile arazi sıklılığının aynı olması gerekmektedir. Kumun kesme kutusu deneyi ile kayma direncini ölçmek için aynı birim hacim ağırlıkta hazırlanmış en az üç numune gerekmektedir. Her bir numune farklı normal gerilmeler altında, belirlenen bir sabit kesme hızında kesilmektedir, deney sırasında kayma deformasyonuna karşı kayma gerilmesi ölçülmektedir. Her deney için şekil 2.3’de gösterildiği gibi ölçülen en büyük kayma gerilmesine (τ)

karşı gelen normal gerilme (σ) ilişkisi çizildiğinde, numuneye ait kırılma zarfı elde edilir.



Şekil 2.3: Kesme kutusu deneyinden kayma direnci açısının bulunması

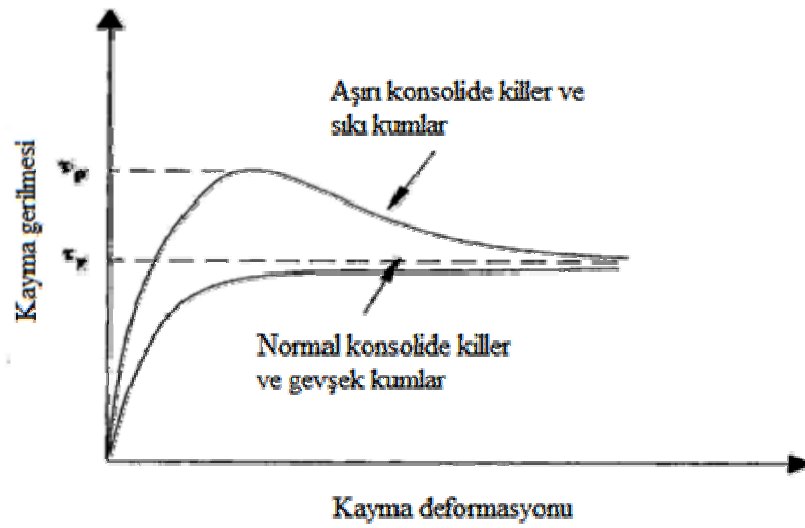
Orijinden geçen bir eğri olan bu doğru, kesme kutusunun zorladığı bir düzlem boyunca ölçülen kayma direncinin normal gerilmeyle doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

2.3 Killerin Kayma Direnci

Kayma direnci konusunda kumlarla killeri ayıran en belirgin özelliklerin kumların yüksek geçirirliliği ve killerde de jeolojik geçmişin daha etkili olması olarak söylenebilir. Kil zeminlerin davranışları çakıl kum ve plastik olmayan siltlerden çok daha karmaşıktır. Killerin kayma direnci, içerdiği danelerin mikroskobik boyutları nedeniyle daneler arası yüzey kuvvetlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Gevşek kumlarla normal yüklenmiş killer, sıkı kumlarla da aşırı konsolide killerin gerilme-deformasyon (σ - ϵ), boşluk suyu basıncı-hacim değişimi (u - ΔV) bağıntılarında paralellik ve kritik durumlarında tam benzerlik, bulunmaktadır (Önalp 2007). Su muhtevası, başlangıç gerilme durumu ve gerilme tarihçesi ile kayma gerilmelerinin oluşması sırasındaki geçerli yükleme ve drenaj koşulları, kesilme hızı, çimentolanma, gevreklik, ortamın anizotropluğu, kilin kıvamı, kilin absorbe ettiği su miktarı, kil zeminde hakim kil mineralinin cinsi, dane boyutu ve şekli, kil mineralinin içerdiği suyun kimyası, daneler arası çekme veya itme kuvvetleri, kullanılan ölçüm tekniği, laboratuvarda yapılan deneylerde kullanılan numunenin kalitesi gibi birçok faktör killerin kayma direncini önemli ölçüde etkilemektedir. Daha basit bir deyişle killerin ölçülecek kayma direnci fiziksel, fiziko-kimyasal ve

gerilme özelliklerinin yanında, örnekleme ve ölçüm yöntemi gibi onun doğasından kaynaklanmayan etkenlere de bağlıdır.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar killerin davranışının daha açık bir şekilde tanımlanabilmesi için bu zeminlerin jeolojik kökenleri doğrultusunda, normal yüklenmiş (NK) yani tamamen konsolide olmuş, aşırı konsolide (AK, önceden yüklenmiş) ve fisürlü killer olmak üzere üç ana grup altında incelenmesinin yararlı olduğunu göstermiştir. Boşluk suyu basınçlarının aşırı yükseliş veya düşüşü ortamda toplam ve efektif gerilmeler arasında önemli farklar oluşturduğundan, ölçülecek kayma direnci parametrelerinin toplam ve efektif gerilmelere göre ifadesi özellikle killerde daha da önem taşımaktadır. Şekil 2.4’de normal ve aşırı konsolide zeminler için kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil’den de görüldüğü gibi aşırı konsolide killerin ve sıkı kumların aynı deformasyona karşılık gelen kayma dirençleri normal konsolide killer ve gevşek kumlara göre daha büyüktür.



Şekil 2.4: Normal ve aşırı konsolide zeminler için kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi

Killerin kayma direncinin ölçümü, kolaylığı ve gereken sürenin kısalığı nedeniyle laboratuvarda yapılmaktadır. Arazi koşullarına çok benzer olmasa da, laboratuvar deneyleri yüklemenin özelliği ve drenajın kontrolü ile olabildiğince arazi koşullarına uygun yapılmaya çalışılır. Laboratuvarda tüm kontrollerin en kolay sağlandığı deney üç eksenli basınç deneyidir. Üç eksenli basınç deneyi arazideki koşullara bağlı olarak, konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajsız (CU), konsolidasyonlu-drenajlı (CD) olarak yapılabilmektedir. Laboratuvarda yapılan

deneylerde yumuşak killerde belirlenen en önemli sorunlardan biri çok hızlı yapılan yüklemenin getirdiği kritik gerilme durumlarıdır. Bir dolgunun normal konsolide killer üzerine çok hızlı inşa edilmesi, bir barajın yüksek plastisiteli çekirdeğinin hızla yükseltilmesi ya da yumuşak kil tabakası üzerine inşa edilen bir temelin aşırı hızla yüklenmesi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşulları yaratır. Su seviyesinde ani düşüş olmadan sürekli sızıntı altında konsolide olmuş baraj çekirdeğinin, arazi yüzeyine dolgu yapılmadan doğal kilin yerinde drenajsız kayma direnci konsolidasyonlu-drenajsız (CU) koşullar altında belirlenir. Sürekli sızıntı kuvvetlerinin etkidiği bir baraj çekirdeği ya da bir yamacın uzun vadeli duraylılığı problemlerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) koşullar kullanılır.

Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde kayma deformasyonun artmasıyla kayma gerilmesi ilk önce artarak belirli bir pik değere ulaşır. Ardından kayma gerilmesi azalarak belirli bir seviyeye kadar düşer ve kayma deformasyonu da değişmeyen sabit bir değeri alır. Bu sabit değeri, kil zeminlerin kalıcı veya rezidüel kayma direnci değeri oluşturmaktadır. Kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki normal konsolide kil zeminlerde incelendiğinde ise kayma gerilmesinin artan deformasyon ile birlikte belirli bir pik değere ulaştığı görülmekte ve kayma gerilmesinin yönlendiği değeri kalıcı kayma direnci olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

Zeminler eğer arazide yer altı suyu tabakası altında yer alıyor ise suya doygun olmaktadır. Ayrıca yer altı suyu tabakasının üzerinde bulunan kohezyonlu zeminlerin belirli bir yüksekliğe kadar kapilarite etkisiyle doygun hale geldiği bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı, geoteknik mühendisliğinde meydana gelen problemlerin çoğunda suya doygun kil zeminlerin davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Arazide bazı tabii zemin tabakaları, sıkıştırılmış toprak dolguları tamamen suya doygun değildir ve bu tür zeminlerin kayma direncinin belirlenmesi oldukça zordur. Suya doygun olmayan bu tür zeminlerde emmeninde etkin olması nedeniyle bu ortamlarda gerilme birim deformasyon ilişkisinin daha karmaşık olduğu belirtilmektedir. Doygun olmayan zeminlerde kılcal emme yüksekliğinin belirlenmesinin zorluğundan, ayrıca; doygun olmayan zeminlerin kayma direncinin doygun olan zeminlerin kayma direncinden daha yüksek olmasından dolayı, bu zeminleri doygunlaştırarak belirlenen kayma direncine göre yapılan tasarımlarda daha güvenli tarafta bulunulmakta ve hesaplamalar basitleştirilmektedir.

2.4 Efektif Gerilmeler ve Kayma Direnci

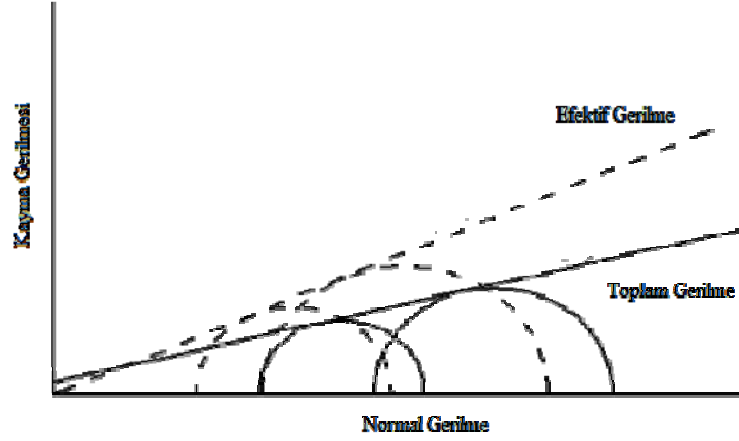
Geoteknik mühendisliğinde stabilite problemlerinin analizinin hangi yaklaşımla yapılacağına (drenajlı veya drenajsız) zemin türü, yükleme hızı ve drenaj koşullarına bakılarak karar verilir. İri daneli zeminlerin yüksek geçirimliliğe sahip olmasından dolayı drenajlı durumun hakim olduğu kabul edilir. İnce daneli zeminlerin stabilite hesaplarında, toplam gerilme veya efektif gerilme analiz yöntemlerinden hangisinin kullanılmasının daha uygun ve doğru olacağı uzun senelerdir tartışma konusu olmuştur. Fakat zemin davranışının ve direncinin efektif gerilmeler tarafından kontrol edildiği bilinmektedir. Buna rağmen efektif gerilmeleri düşünmeden drenajsız kayma direnci parametresi kullanarak stabilite hesapları yapmak pratiktir.

Drenajsız kayma direnci, suya doymuş killerin mühendislik uygulamalarında yükleme esnasında boşluk suyu basıncının sönümlenmesi veya konsolidasyonun meydana gelmesi için zamanın olmadığı kabul edilen, yüklemelerin oldukça hızlı olduğu kritik tasarım durumlarında kullanılmaktadır. Örnek olarak normal konsolide killer üzerine yapılan dolguların ve yapı temellerinin stabilitesi verilebilir. Bu durumda zemin, hızla artan gerilmeler sonucu kilde ani yükselen boşluk suyu basınçları sistem dışına çıkamadan kayma gerilmeleri aldığından, ani yenilmeler gündeme gelebilmektedir. Bu gibi problemlerde analizlerin sadece toplam gerilmelere göre yapılması gerçekçi olur. Ancak, bir yamacın uzun vadeli duraylılığı problemlerinde veya tabakalar halinde yavaş yükselen dolgu altındaki yumuşak kilin kayma direncinin belirlenmesinde, analizlerin efektif gerilmelere göre yapılması daha doğru olmaktadır.

Boşluk suyu basınçları zeminlerin kayma direncinin doğru bir şekilde belirlenmesinde önemli bir etkidir. Zeminin toplam ve efektif gerilme türünden ifade edilen kayma direnci önemli farklar gösterebilmektedir. Mohr-Coulomb göçme kriterine göre kayma direncini veren bağıntı efektif gerilmeler cinsinden yazılacak olursa;

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \times \tan(\phi') \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. (2.3) nolu eşitlikte, $(\sigma - u = \sigma')$ göçme düzlemine etkiyen efektif gerilmeyi, c' ve ϕ' efektif gerilmeler cinsinden kayma direnci parametrelerini göstermektedir.



Şekil 2.5: Toplam ve efektif mahr gerilme daireleri

Mohr gerilme dairelerini, toplam gerilmeler cinsi ile birlikte efektif gerilmeler cinsinden de çizmek mümkün olmaktadır. Şekil 2.5’de toplam ve efektif gerilme daireleri ve bu dairelere teğet olan göçme zarfları gösterilmiştir, görüldüğü gibi efektif gerilmelere göre elde edilen kayma direnci açısı toplam gerilmelere göre elde edilen kayma direnci açısından büyüktür.

2.5 Kayma Direncinin Belirlenmesi

Zeminlerin kayma direnci parametreleri ve gerilme-şekil değiştirme davranışları arazi ve zemin tabakalarından alınan numuneler üzerinde yapılan çeşitli laboratuvar deney yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Laboratuvarda yapılan deneylerde zeminlerin gerilme şekil değiştirme davranışının ve kayma direncinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için, deney koşulları ile arazi koşulların olabildiğince benzer olması gerekmektedir. Uygulamada birbirinden farklı koşullar ile karşılaştırılması nedeniyle, zeminlerin kayma direncini belirlemek amacıyla kullanılan birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Örselenmemiş numune almanın zor olduğu kumlu zeminlerde ve yumuşak killerde arazi deney sonuçlarından yararlanılmaktadır. Killi zeminlerin drenajsız kayma direnci ile arazi deneylerinde yapılan ölçümler arasında çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir . Kayma direncini belirlemek amacıyla yapılan arazi deneylerinin başlıcaları Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Arazi Veyn deneyidir. Ölçülen SPT değeri ve efektif kayma direnci açısı arasında çimentolaşmamış kumlar için ampirik bir ilişki verilmiştir. SPT sonuçları ile

zeminlerin drenajsız kayma direnci belirlenebilir. CPT ölçülen uç direnci ile zeminin kayma direnci açısı arasında ampirik bir ilişki geliştirilmiştir.

Zeminlerin kayma direncinin laboratuvarda belirlenmesi için yapılan deneyler sonucu elde edilen parametreler, numune alımı sırasında meydana gelen örselenme, zeminde mevcut normal gerilmelerin örnek alma sonucu sıfıra düşmesi, laboratuvarda boşluk suyu basınçlarının araziye göre tümüyle değişebilmesi, deneyde uygulanan gerilmelerin arazidekilerle aynı olmaması nedeni ile doğal durumlarındaki parametrelerden çok farklı çıkabilir. Zeminlerin kayma dirençlerini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılanları kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve serbest basınç deneyidir. Basit kesme ve laboratuvar Veyn deneyi ise diğer yöntemlerdir. Aşağıda bu deney yöntemlerinden kısaca bahsedilmiştir.

2.5.1 Laboratuvar deneyleri

Çoğu kayma direnci ölçümleri laboratuvar deneyleri yapılarak belirlenir. Laboratuvarda yapılan deneyler, araziden alınan örselenmemiş ve örselenmiş numuneler üzerinde yapılır. Yaygın olarak kullanılan başlıca laboratuvar deney yöntemleri; serbest basınç, kesme kutusu, basit kesme ve üç eksenli basınç deneyleridir.

2.5.1.1 Serbest basınç deneyi

Kayma direncinin en basit yolla belirlenmesi, zemin numunesine düşey basınç uygulanarak kırılmasıyla yapılır. Silindirik zemin numunesinin yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabii tutulması serbest basınç deneyinde gerçekleşir. Bu deneyde, numuneye kırılma gerçekleşene kadar giderek artan eksenel yük uygulanır. Yük drenajsız koşulların geçerli olması için oldukça hızlı uygulanır. Serbest basınç deneyinde eksenel yük artışları altında, numunenin boyunun kısalması yani eksenel şekil değiştirmesi ölçülmekte ve gerilme şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Eksenel gerilmenin maksimum değeri veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri zeminin serbest basınç direnci (q_u) değerini verir.

Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanal destek olmadan kendiliğinden dik olarak ayakta durabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde yani sadece killi

zeminler üzerinde uygulanabilen bir deney yöntemidir. Şekil 2.6’da İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan serbest basınç deney aletinin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2. 6: Serbest basınç deney aleti (İTÜ)

Drenaj koşulları deney sırasında kontrol edilmediği için, zeminin drenajsız kayma direncinin hızlı yükleme yapılarak elde edildiği kabul edilir. Belirtilen olumsuz yönlerine rağmen, serbest basınç deneyi ucuz ve basit olma avantajına sahiptir. Bu deney zeminlerin drenajsız kayma direncini belirlemede en çok kullanılan deney yöntemlerinden bir tanesidir. Serbest basınç deneyi ile drenajsız kayma direnci, c_u ;

$$\tau = c_u = \frac{q_u}{2} \quad (2.4)$$

bağıntısı yardımıyla bulunabilmektedir. Bu ifadede “ q_u ” zeminin serbest basınç direnci değeridir. Killerin kıvamına bağlı olarak serbest basınç direnci tahmin edilebilir.

2.5.1.2 Kesme kutusu deneyi

Laboratuvar deney yöntemleri ile zeminlerin kayma direncinin ölçümü ilk olarak 1846’da Fransız mühendis Alexandre Collin tarafından yapılmıştır (Head, 1982). Collin’in kullandığı deney aleti günümüzde kullanılan kesme kutusu deney aletine benzemektedir. Günümüzde kullanılan kesme kutusu deney aleti (ASTM D3080) yirminci yüzyılın ilk yarısında son şeklini almıştır.

Şekil 2.7’de kesme kutusu deney aletinin genel görünümü verilmiştir. Kesme kutusu dikdörtgen kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutudur. Kesme kutusu içerisine yerleştirilen kare, dikdörtgen veya daire kesitli zemin numunesi, sabit düşey yük altında konsolide edilir. Uygulanan sabit bir kesme kuvveti altında kutunun üst parçası sabit tutulurken alt bölümü yatay bir düzlem üzerinde hareket ederek numunenin ortasından geçen düzlem boyunca kesilmeye ya da diğer bir ifadeyle kaymaya zorlamaktadır. Uygulanan bu kesme kuvveti bir kesme gerilmesine neden olur. Drenajlı koşulları korumak amacıyla kesme kuvveti killi zeminlerde yeteri kadar yavaş uygulanmaktadır. Bununla birlikte kumlarda gerekli yükleme hızı, yenilme birkaç saat içinde olacak şekilde uygulanmaktadır. Bu işlem, değişik düşey yükler için tekrarlanarak zeminin kayma direnci parametreleri elde edilir.



Şekil 2.7: Kesme kutusu deney aleti

Kesme kutusu deneyinde tipik olarak kare veya dikdörtgen kesitli numune kullanılır ve numuneye düşey bir yük uygulanır. Kil numuneleri, suya doymun halde tutmak için kesme kutusu içerisine su doldurulur. Numunenin bu yük altında konsolide olmasına izin verilir. Numune tamamen konsolide olduğu zaman kesme kuvveti belirli bir hızda uygulanır. Bu kesme kuvveti bir kesme gerilmesine neden olur, kayma yerdeğiştirmesine karşı kayma gerilmeleri çizilir. Daha sonra bu işlem farklı büyüklüklerde düşey yük kullanılarak aynı özelliklere sahip, özdeş numuneler üzerinde tekrarlanır.

Kesme kutusu deneyinde numuneyi kesme hızı, zeminin arazideki drenaj şartlarına göre seçilir. Yüksek geçirimsizliğe sahip olan kum ve çakıl gibi (iri daneli) zeminler,

özel durumlar (deprem yükleri gibi) haricinde uygulamalarda, drenajın sağlanması ile boşluk suyu basınçlarının oluşmayacağı kabul edilmektedir. Düşük permeabiliteye sahip olan kil ve silt gibi zeminlerde kısa zamanlı stabilite analizlerinde toplam gerilmelere göre, drenajın sağlanacağı kabul edilerek uzun süreli stabilite analizlerinde ise efektif gerilmelere göre çalışılmalıdır (Mitchell, 1993).

Kesme kutusu deneyi özellikle kumlu zeminlerin drenajlı dayanımını elde etmede kullanılan basit ve ucuz bir yöntemdir. Killerde de kullanılabilirse de daha az güvenilir sonuçlar verir. Çünkü numuneyi tamamen doyurmak zordur ve drenaj koşullarını, deney hızını değiştirmeden başka kontrol etme yolu yoktur. Ayrıca amaç konsolidasyonlu - drenajsız koşullarda deney yapmak ise yine zemin numunesi hangi hızla kesilirse kesilsin drenaj tamamen önlenememektedir. Bu durum, gerçek anlamda konsolidasyonlu-drenajsız (CU) deneyinin gerçekleşmeyeceği anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra kesme kutusu deneyinde boşluk suyu basıncıda ölçülememektedir. Göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması da kesme kutusu deneyinin sakıncalarından biridir. Kesme kutusunun diğer bir sakıncası ise kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmamasıdır. Kesme işlemi sırasında zorlanan kayma yüzeyinin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmama ihtimali kesme kutusu deneyinin diğer bir sakıncalı yanıdır. Bütün bu sakıncalı yanlarına karşın kesme kutusu deneyi bilinen en eski ve günümüzde de çok yaygın olarak kullanılan laboratuvar deney yöntemidir.

2.5.1.3 Basit kesme deneyi

Kesme kutusunda numunenin deney aletinin yapısı nedeniyle belirli bir düzlemden kesilmesi sakıncasını gidermek için üst üste dizilmiş metal halkaların içine yerleştirilen silindir biçimli numunenin öne itilmesi yoluyla kesilmesi ilk olarak 1940'lı yıllarda gündeme gelmiştir. Daha sonra halkaların yerine bir kauçuk kılıfla kaplanmış bir tel sargılı membrana almıştır. Böylece numunede değişmez kesit ve üniform gerilme dağılımı sağlanır. Bu deney yöntemine basit kesme deneyi denilmektedir. Basit kesme deney yönteminin İsveç, Norveç ve Cambridge modelleri olmak üzere üç çeşit modeli bulunmaktadır. İsveç modelinde numunenin çevresi üst üste dizilen ince çelik halkalar, Norveç modelinde kauçuk kılıfın içinde tel sargı, Cambridge modelinde ise numune çevresinde rijit plaklar kullanılmaktadır. Basit

kesme deneyi drenaj, boy ve hacim kontrolü yanında statik ve dinamik yüklerle yapılabilmesi ve kayma düzlemi kenarlarında olası gerilme yığınlarını önlemesi nedeniyle tercih edilmektedir. Böylece, numuneler tam drenajsız koşullarda üniform olarak kesildiği gibi oluşan boşluk suyu basınçlarının ölçümü de sağlanmaktadır. Şekil 2.8’de bir basit kesme deney aletinin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 2. 8: Basit kesme deney aleti (GCTS web sayfası)

2.5.1.4 Üç eksenli basınç deneyi

Zemin mekaniğinde laboratuvarında kayma direncinin belirlenmesi için kullanılan ilk ve en eski deney kesme kutusu deneyidir. 1930’larda A. Casagrande doğrudan kesme deneyinde karşılaşılan önemli dezavantajları ortadan kaldırmak için silindirik örnekler üzerinde basınç deneyleri konusunda araştırmalara başlamıştır. Bu deney yöntemi, kesme kutusu deney yöntemine göre çok daha karmaşık olmasına rağmen, laboratuvarında kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan en gelişmiş deney yöntemi olarak bilinmektedir. Bunun nedeni, üç eksenli deneyde arazi koşullarının laboratuvarında en benzer şekilde modellenilebilmesidir. Böylece kayma direnci parametreleri gerçeğe yakın olarak belirlenebilir.

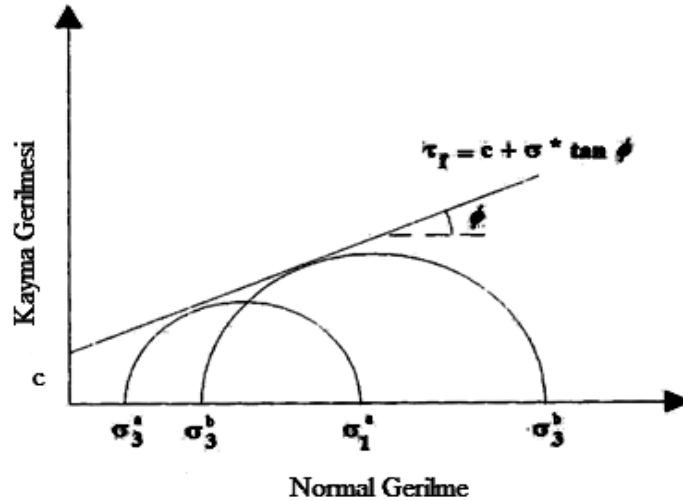
Üç eksenli deney yönteminde, bir hücre içerisine, silindir biçimindeki, çap/boy oranı 1/2 olan su geçirmez membran ile sarılmış zemin numunesi yerleştirilir. Deneyde, ilk olarak hücredeki numune üzerine sıvı veya hava yardımı ile hidrostatik (çevre) basınç uygulanır. Arazideki koşullara bağlı olarak konsolidasyonlu-konsolidasyonsuz, drenajlı-drenajsız olarak eksenel yükleme yapılarak zemin numunesi kesilir. Numune etrafında bulunan membran, zemin numunesinin suyla

temasını önler ve zemin numunesinin içine ters basınç uygulanmasını sağlar. Şekil 2.9’da üç eksenli deney hücresi görülmektedir.



Şekil 2.9: Üç eksenli deney hücresi (İTÜ)

Şekilde görüldüğü gibi eksenel gerilme, numune üzerindeki başlığa temas eden bir piston yardımı ile numune üzerine uygulanır. Drenaj numune alt ve üst başlıklarına bağlı halde bulunan kanallar yardımı ile kontrol edilebilmektedir (Özaydın, 2007). Üç eksenli deney yönteminde göçme zarfı, kırılma anındaki asal gerilmelere göre çizilen Mohr dairelerinden elde edilir. Şekil 2.10’da görülen grafikteki Mohr dairelerine göre çizilen teğet yardımıyla kayma direnci denklemi elde edilir.



Şekil 2.10: Üç eksenli deney yöntemi için Mohr dairesi

Üç eksenli deneyde, arazi koşullarına bağlı olarak drenajsız veya drenajlı koşullar sağlanır ve üç çeşit üç eksenli deney yöntemi bulunur. Konsolidasyonsuz-drenajsız

üç eksenli basınç (UU) deneyinde hücre basıncı uygulamasında ve eksenel yükleme yapılması sırasında zemin suyunun numuneden dışarı çıkmasına yani drenajına ve gerilmeler altında konsolidasyonuna izin verilmez. Konsolidasyonsuz–drenajsız üç eksenli basınç deneyinde boşluk suyu basıncı en yüksek düzeyde kalır Numune yenilene kadar hızlı bir şekilde yüklenir. Bu nedenle bu tip üç eksenli deney “hızlı üç eksenli deney” olarak da nitelendirilir. Yumuşak kil tabakası üzerine hızlı dolgu yapımı, kil zemin üzerine hızla yapılan temeller konsolidasyonsuz-drenajsız kesme problemlerine örnektir.

Konsolidasyonlu-drenajsız üç eksenli (CU) basınç deneyinde, deneye başlamadan önce numune, arazi şartlarında bulunduğu çevre gerilmesine eşdeğer bir basınca tabii tutularak konsolide olması sağlanır. Daha sonra eksenel yükleme yapılması sırasında numune içindeki suyun dışarı çıkmasına yani drenaja izin verilmez, konsolidasyonlu-drenajsız deneylerde kesme işlemi sırasında boşluk suyu basıncıda ölçülebilmektedir. Böylece efektif gerilmelere göre kayma direnci parametreleri hesaplanabilir. Bu deney yöntemi arazi yüzeyine dolgu yapılmadan doğal kilin yerinde drenajsız kayma direncini, su seviyesinde ani düşüş olmadan sürekli sızıntı altında konsolide olmuş barajların kil çekirdeğinin kayma direncini, kil dolgularda konsolide olduktan sonraki kilin kayma direncini bulmak için kullanılır

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç (CD) deneyinde, konsolidasyonlu–drenajsız üç eksenli deneyde olduğu gibi numune kesme işleminden önce öngörülen basınçta konsolide edilir ve konsolide tamamlandıktan sonra da drenaj koşulları tümüyle sağlanarak, uygulanan kesme gerilmelerinin boşluk suyu basıncını arttırmaması için numune yeterince düşük hızda kesilmektedir. Böylece elde edilecek kayma gerilmesi parametreleri sadece efektif gerilme türünden olacaktır. Tabakalar halinde yavaş yükselen dolgu altında yumuşak kilin kayma direncinin belirlenmesi, sürekli sızıntı kuvvetleri etkisindeki barajların kil çekirdeğinin kayma direncinin elde edilmesi ve kilde kazı veya doğal yamaçta drenajlı kayma direncinin bulunması gibi problemlerde üç eksenli konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli deneyi kullanılabilir.

2.5.2 Arazi deneyleri

Kayma direncini arazide yerinde belirleyebilmek için çeşitli deney yöntemleri vardır ve bu deneyler genellikle muayene çukurları veya sondaj kuyuları içerisinde gerçekleştirilirler. Kumlu zeminlerden ve yumuşak killerden örselenmemiş numune

almanın zor olması arazi deneylerinin sonuçlarından yararlanmayı faydalı kılacaktır. Kumlu zeminlerde yapılan arazi deneylerinde kumun kayma direnci açısı ile arazi ölçümleri arasında amprik korelasyonlardan yararlanırken, killi zeminlerde drenajsız kayma direnci doğrudan ölçülerek ya da korelasyon yolu ile belirlenmektedir.

Örselenmemiş numune almanın çok zor olduğu yumuşak killer ve siltli killerde drenajsız kayma direncinin belirlenmesinde hızlı sonuç veren kanatlı kesici (vane) deneyi İskandinav ülkelerinde geliştirilmiştir. Kanatlı kesici deneyi, yumuşak killi zeminlerin içerisine sokulan kanatlı kesicinin döndürülmesi ve kanatların dönmesine karşı zeminin gösterdiği direncin ölçülmesi ilkesini esas almaktadır. Kanatlı kesici alet, deneyin yapılacağı derinliğe kılıfı içinde itilir ve kılıftan çıkartıldıktan 5 dakika sonra yüzeyde çubuğuna uygulanan burulma ile dakikada 12° den hızlı olmamak üzere çevrilir. Buradan drenajsız kayma direnci ölçüldükten sonra istenirse kesici 25 kez daha döndürülerek çevredeki kilin yoğrulması sağlandıktan sonra bu kez yoğrulmuş kayma direnci ölçülebilir.

Arazide kayma direnci belirlemek için kullanılan bir diğer deney yöntemi statik sonda deneyi olarak da bilinen koni penetrasyon deneyidir (CPT). Koni penetrasyon deneyi ilk olarak 1940'larda Hollanda'da 60° uçlu ve 10 cm² konik kesitli çelik penetrometrenin zemine 2 cm/s itilmesi ile uygulanmıştır, konik uç zemine itilirken uç direnci ve çevre sürtünmesi ölçülmektedir. Koni penetrasyon deneyinde numune alınamadığından drenajsız kayma direnci ölçülen zeminin türü, çevre sürtünmesi/uç direnci oranından (f_s) tahmin edilmektedir. Bu deney kum ve siltlerde en iyi sonucu verir. Ancak günümüzde çakıllar ve bloklu zeminler dışında her tür zeminde uygulanmaktadır.

Kayma direnci parametrelerini belirlemek için arazide uygulanan standart penetrasyon deneyi (SPT) dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de genellikle daneli bazen de kohezyonlu zeminlerin geoteknik araştırma ve incelemelerinde en yaygın olarak kullanılan deneylerdendir. Standart Penetrasyon deneyinde standart bir numune alıcı 76 cm yükseklikten düşen 63.5 kg'lık bir çekiç ile zemine sokulur. Numune alıcıyı zemine 30 cm çakmak için gerekli darbe sayısına standart penetrasyon direnci denir. Bu penetrometrede zeminin drenajsız kayma direnci darbe sayısının bir fonksiyonu olarak geliştirilen korelasyonlar yardımı ile bulunabilmektedir.

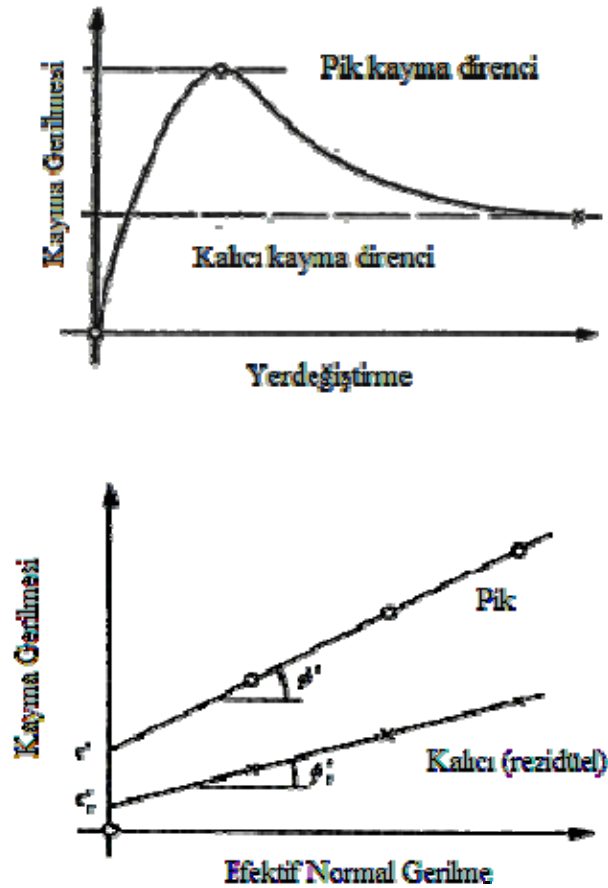
3. ZEMİNLERDE KALICI KAYMA DİRENCİ

Kalıcı kayma direnci, aşırı konsolide veya aşırı konsolidasyon oranı yüksek, bazı nedenlerle belirgin ve sistematik süreksizlikler içeren fisürlü killer için geçerli olan kavramdır. Geçmişte yapılmış olan çalışmalarda, pik kayma direnci değerlerine göre yapılan uzun süreli stabilite analizlerinde güvenli olduğu düşünülen şevlerin belirli bir zaman sonra göçtüğü gözlemlenmiştir ve göçmenin meydana gelmiş olduğu şevler üzerinde ortalama bir kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir. Belirlenmiş olan ortalama değerin tasarım sırasında kullanılan pik kayma direnci değerinden küçük olduğu görülmüştür. Bundan dolayı sonraki çalışmalarda laboratuvar deneyleri pik kayma direncinin bulunması ile durdurulmamış ve deneylere devam edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, kayma gerilmesinin deformasyonun artmasıyla aslında önce bir pik değere ulaştığı sonrasında ise azalmaya başladığı gözlemlenmiş ve belirli bir deformasyon değerinden sonra artan deformasyon ile değişmeyen sabit bir değer aldığı belirlenmiştir. Kayma gerilmesinin pik değerden sonra azalmasının nedenlerinden biri zemin numunesinde kesilen yüzeye suyun girmesi ve kesilen yüzeyleri ıslatarak cilalanma etkisi yaratarak daneler arası kuvvetleri azaltması. Diğer bir neden ise zemin danelerinin kesilme işlemi sırasında birbirlerine paralel olacak şekilde yönelimidir. Daneler, numune aynı doğrultuda kesilmeye devam edildikçe kesme yüzeyine paralel olacak şekilde yönelmeye başlar. Bu nedenlerden dolayı kayma gerilmesi artan kayma yerdeğiştirmesiyle azalır. Belirli bir noktadan sonra kesilme işlemine devam edilse de kayma gerilmesi artık yer değişimiyle değişmeyen sabit bir değere ulaşır. Bu sabit değere kalıcı kayma direnci denilmektedir (Skempton, 1964). Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde kayma direncinin zamanla azalarak kalıcı değere ulaşması ani göçmelere neden olabilmektedir (Mitchell, 1993). Bu tür zemin yapısının ülkemizde en çok rastlanan tür olması hem uzun süreli şev stabilite analizlerinde hem de bu tür şevler üzerinde inşaa edilecek mühendislik yapılarının tasarımında kalıcı kayma direncinin önemini artırmaktadır.

3.1 Kalıcı Kayma Direncinin Tanımı

Kalıcı kayma direnci, aşırı konsolide-fisürlü kil zeminlerde kayma gerilmesiyle kayma deformasyonu arasındaki ilişki incelendiğinde görülmektedir. Kayma gerilmesi deformasyonla birlikte göçme gerilmesine ulaşmaya kadar artarak bir pik yapar. Pike ulaşmasından sonra düşüşe geçen kayma gerilmesi, göçme durumundan sonra belirli bir seviyede artan deformasyonla da değişmeyen sabit bir değer alır. Kayma gerilmesinin almış olduğu bu sabit değere kalıcı veya rezidüel kayma direnci denilir.

İki ya da daha fazla zemin numunesi üzerinde yapılan kalıcı kayma direnci deneyleri sonucu Mohr-Coulomb kırılma zarfı pik ve kalıcı kayma gerilmeleri koşulları için çizilebilir. Şekil 3.1’de kayma gerilmesi kayma yerdeğiştirmesi grafiğı ile pik ve kalıcı kayma gerilmeleri zarfları verilmiştir.



Şekil 3.1: Pik ve kalıcı kayma direnci zarfları ve kayma dirençleri, (Head, 2006)

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kayma gerilmesi artan deformasyon ile birlikte önce artarak pik yapmaktadır, pik kayma gerilmesi değerinden sonra artan deformasyon ile kayma gerilmesi azalmakta ve daha sonra artan deformasyon ile de değişmeyen sabit bir değer almaktadır, bu kayma gerilmesine kalıcı (rezidüel) kayma gerilmesi denilmektedir. Ayrıca kayma direnci zarfları incelendiğinde pik kayma direnci parametrelerinin kalıcı kayma direnci parametrelerinden büyük olduğu, kalıcı kayma direnci için çizilen kırılma zarfında kohezyonun sıfıra yaklaştığı görülmektedir.

Pik kayma direnci için denklem;

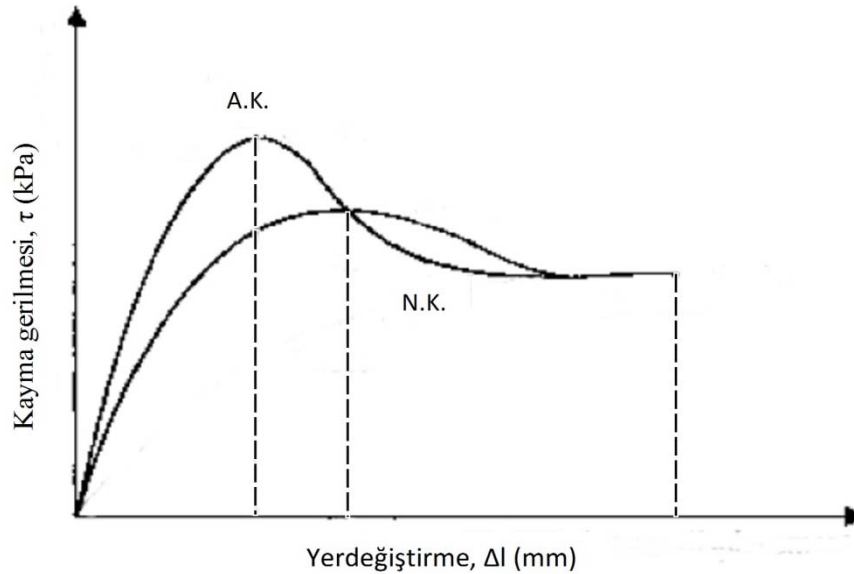
$$\tau_p = c_p + \sigma \times \tan \phi_p \quad (3.1)$$

Kalıcı kayma direnci için denklem;

$$\tau_r = c_r + \tan \phi_r \quad (3.2)$$

olarak belirtilmektedir. Bu denklemlerde bulunan ifadeler, drenajlı laboratuvar deneyleri ile elde edilen efektif direnç parametre değerleridir. Bağntı (3.1)’de pik kohezyon (c_p) ve pik kayma direnci açısı (ϕ_p) değerleri, (3.2) nolu bağntıda ise kalıcı kohezyon (c_r) ve kalıcı kayma direnci açısı (ϕ_r) değerleri kullanılır (Head, 2006).

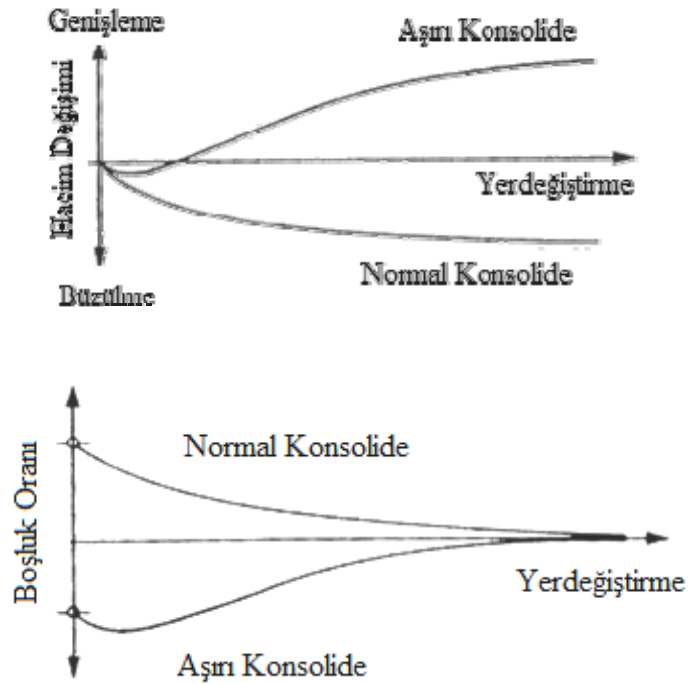
Şekil 3.2’de kayma direnci ile kayma deformasyonu ilişkisi üzerindeki aşırı konsolidasyonun etkisi verilmiştir.



Şekil 3.2: Aşırı konsolidasyonun kayma gerilmesi ile kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi üzerindeki etkisi (Head, 2006)

Zeminlerin pik ve kalıcı direnç değerleri arasındaki fark, aşırı konsolide olan zeminlerde büyük olmasına rağmen bu fark normal konsolide zeminlerde küçüktür. Aşırı konsolide zeminler, normal konsolide zeminlerle karşılaştırıldığında küçük yerdeğiştirme değerlerinde daha büyük pik dirence sahiptir ve daha sonra direnç belirgin bir azalma göstererek kalıcı değere ulaşır.

Kesme işlemi sırasında hacimdeki ve boşluk oranındaki değişim Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekil 3.3’de görüldüğü gibi aşırı konsolide zeminlerde hacim öncelikle artan yerdeğiştirme ile azalmakta yani büzülme. Daha sonra kesme işleminin devamında hacim genişlemeye başlar. Bu durum kumların daha önce tanımlanan davranışına benzemektedir. Normal konsolide killerin davranışı gevşek kumlara, aşırı konsolide killerininki de sıkı kumlara benzemektedir. Normal konsolide zeminlerde ise kesme işleminin tamamında hacimde azalma veya büzülme görülmektedir. Bunun nedeni aşırı konsolide zeminlerde önkonsolidasyon gerilmesinin uygulanmakta olan normal gerilmeden daha büyük olması, normal konsolide zeminlerde ise bu koşulun söz konusu olmamasıdır. Bu duruma bağlı olarak normal konsolide zeminlerde yerdeğiştirmenin artmasıyla boşluk oranı azalmakta, aşırı konsolide zeminlerde ise boşluk oranı artmaktadır ve Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3: Kesme işlemi sırasında hacimdeki ve kesme boşluk oranındaki değişim (Head, 2006)

Normal ve aşırı konsolide zeminler için kırılma zarfları Şekil 3.4’de düz çizgi ile kalıcı direnç zarfı ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Görüldüğü gibi normal ve aşırı konsolide zeminlerin pik kayma gerilmesi zarfları paralel olmasına karşın normal konsolide zeminlerde genelde kohezyon oluşmaktadır. Aynı normal gerilme altında aşırı konsolide zeminlerin pik kayma direnci açısı normal konsolide zeminlerin pik kayma direnci açısından büyüktür. Kalıcı direnç zarfına bakıldığında ise kohezyon değerinin olmadığı ve aynı normal gerilme altında normal konsolide zeminlerin pik değerinden düşük bir değere sahip olduğu görülmektedir (Das, 2006).



Kil numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda, sabit efektif normal gerilmeler altında kayma direncinin değişimi incelenmiştir. Bu çalışmalarda Skempton (1985), yüksek kil yüzdesine sahip olan numuneler üzerinde yapılan deneylerde kayma direncinin aşırı konsolide killer için iki kademedede düştüğünü gözlemlemiştir. İlk düşüş kademesi küçük deplasman değerlerinde su muhtevastaki artıştan, ikinci kademe ise meydana gelen deplasmanların büyük olması sonucu yassı kil minerallerinin kayma yüzeyine paralel bir şekilde dane yönelimi oluşturmamasından dolayı meydana gelmektedir. Düşük kil yüzdeli zeminlerde kayma direncinin dane yönelimine bağlı olarak bir düşüş gösterdiği genelde görülmemektedir. Kısacası, kayma yüzeyi boyunca su muhtevastaki artış ve dane yönelimi zeminlerde kayma gerilmesinin kalıcı değere düşmesine neden olmaktadır.

3.2 Geoteknik Mühendisliğinde Kalıcı Kayma Direncinin Önemi

İnce daneli zeminlerde kayma direncinin büyük kayma deformasyonlarından sonraki değişimi ilk olarak 1930’lu yılların başlarında incelenmeye başlanılmış ve bu yöndeki çalışmalar günümüze kadar gelmiştir. Kalıcı kayma direncinin tanımı ve zeminlerdeki önemi ilk kez 1960’lı yılların başlarında ortaya konulmuştur. Geçmişte yapılan uygulamalarda kil şevlerin stabilite analizleri sırasında kayma yüzeyi olduğu düşünülen bölgeden alınan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen drenajlı kayma direnci deneyleri sonucunda elde edilen pik direnç değerleri zeminin kayma direnci parametrelerini oluşturmaktaydı. Fakat, belirtilen bu yöntemle güvenli olduğu düşünülen aşırı konsolide veya fisürlü kil şevlerde aniden göçme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Skempton (1964)’nın yaptığı geri analizlerde göçme yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesinin, laboratuvar deneyleri ile bulunan pik kayma gerilmesine göre oldukça küçük olduğunu belirlemiştir. Pik kayma gerilmesinin belirlenmesinden sonra durdurulan deneylere devam edilerek kayma gerilmesinin artan şekil değiştirme ile azaldığı görülmüştür. Belirli bir deformasyona ulaşıldıktan sonra ise kayma gerilmesinin sabit bir değer aldığı gözlemlenmiştir. Bu sabit kayma gerilmesi, zeminin kalıcı kayma direnci olarak tanımlanmıştır.

Önceden göçmenin yaşanmış olduğu kayma yüzeyleri içeren şevlerdeki direnç değerinin kalıcı kayma direnç değeri olduğunu ($\tau \approx \tau_r$), ilk kez göçmenin meydana geldiği fisürsüz kil şevlerde ise göçme anındaki kayma direncinin pik değerde olduğunu ($\tau \approx \tau_p$) Skempton (1985) yapmış olduğu çalışmalar sonucunda ortaya

koymuştur. Ayrıca, Skempton fisürlü kil şevlerde göçmeye yol açan kayma gerilmesinin pik ile kalıcı kayma direnci arasında olduğunu ($\tau_r < \tau_f < \tau_p$) kabul etmiştir.

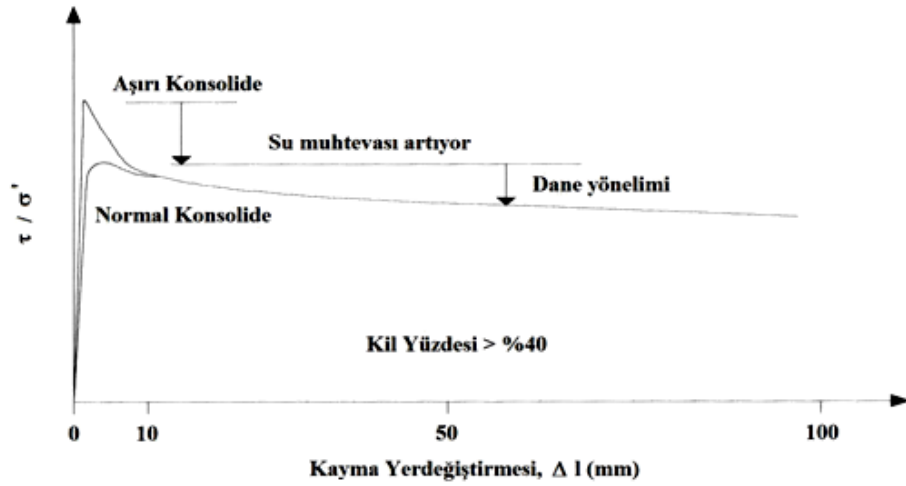
Aşırı konsolide veya fisürlü kil şevlerin stabilite analizlerinde kayma direnci değerinin zamanla azalarak kalıcı kayma direnç değerine düştüğü ve bunun ani göçmelere neden olabileceği bilinmeli, göçme yüzeilerindeki kayma direnci değerinin meydana gelen büyük kayma deformasyonları ile gittikçe kalıcı değere yaklaştığı yapılacak her türlü stabilite analizleri ve tasarımlar sırasında dikkate alınmalıdır (Mitchell, 1993). Normal konsolide veya gevşek kum zeminlerde kayma direnci ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki incelendiğinde ise gerilme-deformasyon eğrisinin belirli bir pik değer aldığı görülmemektedir. Fakat artan deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin yönlenmiş olduğu değer yine kalıcı kayma direnci olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

Bugüne kadar yapılan gelişmelere rağmen, şevlerin duraylılığının değerlendirilmesi günümüzde de ele alınması zor konulardan biridir. Yapılan çalışmalar sonucu anlaşılmıştır ki kalıcı kayma direnci heyelanların neden olduğu sahalarda kayma yüzeilerini değerlendirirken büyük öneme sahiptir. Bir geoteknik mühendisinin mevcut heyelanlarının duraylılığını değerlendirirken ve onarım ile stabilizasyonu tasarlariken kalıcı kayma direncini bilmesi gerekir. Ülkemizde diğer doğal afetler gibi heyelanlarda önemli yer tutmaktadır. Heyelanlar hemen her yıl başta Karadeniz Bölgemiz olmak üzere ülkemizin pek çok yerinde görülmekte, büyük can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Heyelanlardan kaynaklanan can ve mal kaybını önlemek için kalıcı kayma direnci büyük öneme sahiptir. Bu nedenle kalıcı kayma direncinin doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir.

Ülkemizde diğer doğal afetler gibi heyelanlarda önemli yer tutmaktadır. Heyelanlar hemen her yıl başta Karadeniz Bölgemiz olmak üzere ülkemizin pek çok yerinde görülmekte, büyük can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. 2010 senesi içerisinde kuvvetli yağışlardan dolayı Rize’de heyelanlar meydana gelmiş onlarca insan hayatını kaybetmiştir. Heyelanlardan kaynaklanan can ve mal kaybını önlemek için kalıcı kayma direnci büyük öneme sahiptir ve doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

3.3 Kalıcı Kayma Direnci Mekanizması

Kil yüzdesi yüksek olan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde, normal konsolide zeminlerin kayma direncindeki düşüşün tek kademedenden, fisürlü veya aşırı konsolide zeminlerin kayma direncindeki düşüşün ise iki kademedenden oluştuğu belirtilmektedir (Skempton, 1985). Belirtilen bu durum Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



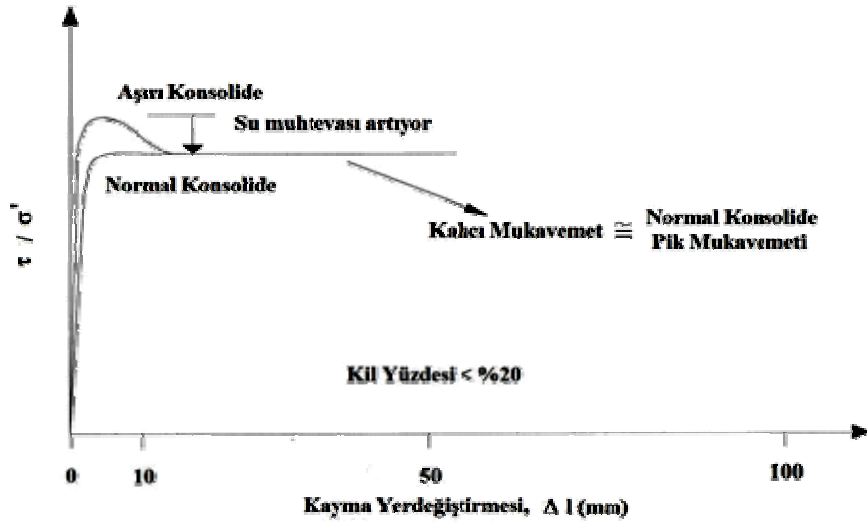
Şekil 3.5: Kil yüzdesi yüksek zeminlerin normal gerilme altında kayma gerilmeleri (Skempton, 1985)

Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerin kayma direncindeki iki kademe halinde gerçekleşen düşüşlerden ilk kademesi küçük deplasmanlarda su muhtevasında meydana gelen artıştan dolayı oluşmaktadır. Buradaki su miktarındaki artış mevcut suyun kesilen yüzeylere girmesi ile oluşmaktadır. Su, kesilmiş yüzeyleri ıslatarak cilalanma etkisi yaratmakta ve bu etki nedeniyle kayma direncinde ilk kademedeki düşüş oluşmaktadır. İkinci kademe ise meydana gelen deplasmanların büyük olması sonucu yassı kil minerallerinin kayma yüzeyine paralel olarak dane yönelimi oluşturmasıyla meydana gelir. Dane yönelimi kesilmekte olan yüzeyler arasındaki sürtünme gerilmesini azaltır. Böylece kayma direncinde ikinci kademedeki azalma görülür. Daha sonrasında kayma gerilmesi kayma deformasyonu ile değişmeyen sabit bir değer alır.

Dane yönelmesi (reorientation), yassı-yaprak şekilli kil minerallerinde ve %20-%25 üzerinde kil içeren zeminlerde oluşmaktadır. Kil yüzdesinin yaklaşık %20-%25 arasında değişen ve yassı şekildeki kil minerallerine sahip zeminlerde dane

yönlenmesi gerçekleşmektedir.yaklaşık %50 kil yüzdesine sahip zeminlerde kalıcı kayma direnci kil danelerinin kayma sürtünmesi tarafından kontrol edilmektedir. Bu kil yüzdesinin artması durumunda etki daha az olur (Skempton, 1985).

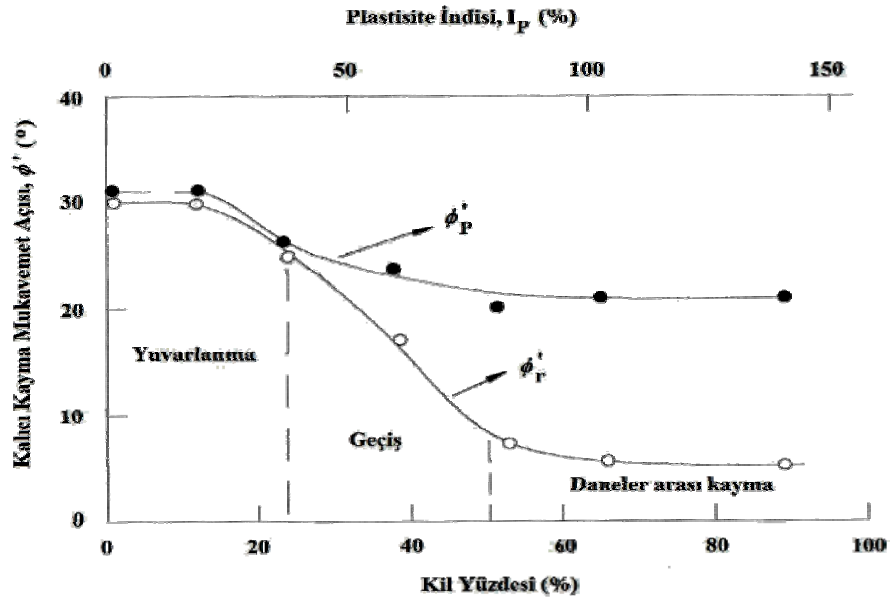
Zeminlerde kil yüzdesinin düşük değerlerde olması ya da başka bir deyişle zeminlerin kil yüzdesi %20-%25 değerlerinden daha az bir değere sahip olması durumunda ikinci kademe mümkün olduğunca dikkate alınmaz. Bu durumda kayma direnci silt ve kum daneleri tarafından kontrol edilmektedir. Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde pik kayma direncinden kalıcı değere kadar meydana gelen düşüşün sebebi kesilmiş yüzeylerdeki su muhtevasında meydana gelen artış olmaktadır. Dane yöneliminden kaynaklanan ikinci kademe nadiren olaya dahil edilmektedir. Normal konsolide kil zeminlerde kayma deformasyonu ile artış gösteren kayma gerilmesinde belirgin bir pik değer görülmemektedir. Bu tür zeminlerde büyük deformasyonlardan sonraki direnciyle yani kalıcı kayma direnciyle pik direnç arasındaki fark çok küçük değerlerdedir. Açıklanan bu durum Şekil 3.6'da gösterilmektedir (Skempton, 1985).



Şekil 3.6: Kil yüzdesi düşük zeminlerin normal gerilme altında kayma dirençleri (Skempton, 1985)

Daneler arası sürtünmeye ve baskın olan dane yapısına bağlı olarak kalıcı kayma direncinin davranışı incelenmiş ve üç tip farklı davranış şekli Lupini ve diğerleri tarafından belirlenmiştir. Bunlar, yuvarlanma tipi, geçiş tipi ve kayma tipi davranışlardır. Yuvarlanma tipi davranış baskın olarak hacimli, yuvarlak ve dolgun danelerden oluşan zeminler için, geçiş davranışı belirli bir dane yapısının olmadığı

durumlarda, kayma tipi davranış ise yüksek oranda yassı şekilli daneler içeren zeminler için geçerlidir. Yuvarlanma tipi davranışa sahip zeminlerde dane yönelimi oluşmamaktadır. Ayrıca bu tip zeminlerde kalıcı kayma direnç değeri yüksektir ve kalıcı kayma direnci açısı daneler arasındaki sürtünme katsayısına bağlı değil, iri danelerin yapısına ve bağlanmalarına bağlı olmaktadır. Geçiş davranışı, kayma yüzeyinin farklı bölümlerinde kayma ve yuvarlanma tipi davranışlarını birlikte içermektedir. Kalıcı kayma direncinde zeminin özellikleri yuvarlanma tipinden kayma tipine doğru geçiş şeklindedir. Bu tür zemin davranışında kalıcı kayma direnci açısı zemin derecelenmesindeki küçük değişikliklere karşı son derece hassas olmaktadır. Kayma tipi davranışa sahip zeminlerde kalıcı kayma direnci açısı, daneler arası sürtünme katsayısına ve mineralojiye bağlıdır. Ayrıca, kayma tipi davranış ilk kayma yüzeyi oluştuktan sonra meydana gelen gerilme durumundan fazla etkilenmemektedir. Gevreklik özelliği ilk kayma yüzeyi oluşumu sırasında birincil olarak baskın dane yapısının yönelimine bağlıdır (Lupini ve diğ. 1981). Bu durum, aşağıdaki Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Pik ve kalıcı kayma direnci açıları ile kil yüzdesi ve plastisite indisi arasındaki ilişki (Lupini, 1981)

İri daneli veya kohezyonsuz zeminlerde pik ile kalıcı sürtünme açıları arasındaki fark küçüktür. Bunun nedeni kohezyonsuz zeminlerin kalıcı sürtünme açısının daneler arasında meydana gelen kaymadan çok, danelerin birbirleri üzerinden yuvarlanması ile meydana gelen yeni dizilimlerinden etkilenmesidir. Kum ve silt daneleri, kil yüzdesinin yüksek olması durumunda yuvarlanarak yeniden dizilimi önemsiz hale

getirmektedir. Kaymanın sebebi kil daneleri arasındaki sürtünmedir. Fakat kil yüzdesi %50'den fazla olan volkanik kökenli yüksek plastisiteli kil zeminler aynı zamanda yüksek oranda allophane gibi yassı olmayan kil mineralleri içermektedir. Bu durum kalıcı kayma direnci açısının yüksek değerde olmasına neden olur. Böylece bu tür volkanik kökenli zeminler bu duruma uymamaktadırlar (Mitchell, 1991).

3.4 Kalıcı Kayma Direncinin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi

Bir zeminin kayma direncini ölçmek amacıyla bilinen en eski çalışma Fransız mühendis Alexandre Collin (1846)'e aittir. En eski ölçümler İngiltere'de günümüzde gelişmiş halde bulunan kesme kutusu aletinin ilkel halini yapmış olan Bell (1915) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Bell, ilk kez değişik zemin tipleri üzerinde kesme kutusu deneyi yapmış ve bu deneylerin sonucunu yayımlamış bir bilim adamıdır (Skempton, 1958). Kesme kutusuna günümüzdeki modern halini 1932 yılında A. Casagrande Harvard(USA)'da vermiştir. Fakat detayları yayınlanmamıştır. Günümüzde, kesme kutusu deney aleti çok geniş aralıkta yerdeğiştirme hızına sahiptir. Hız, dakikada birkaç milimetreden 10000 kat daha yavaş olacak şekle kadar değişebilmektedir.

Kil zeminlerden oluşan doğal şev yüzeyleri üzerinde Walton's Wood heyelanıyla alakalı kayma direnci parametrelerini belirleyebilmek için yapılan ilk kesme kutusu deneyinin 1963 yılında gerçekleştirildiğini Early ve Skempton (1972) belirtmişlerdir. Aynı zamanda bu çalışma, killerin kalıcı kayma direncini belirleyebilmek için yapılmış bilinen en eski tekrarlı kesme kutusu deneyini de içermektedir. Batı Pakistan'da Mangla barajı projesinden alınan tektonik kayma zonunda bulunan aşırı konsolide Siwalik killeri üzerinde 1963 ile 1966 yılları arasında benzer deneyler yapıldığı Binnie ve diğerleri (1967) tarafından ifade edilmiştir (Head, 2006).

Zeminlerin kayma direnci parametrelerini bulmaya yarayan laboratuvar deneyleri benzer şekilde kullanılarak aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerin büyük kayma deformasyonlarından sonra meydana gelen kalıcı kayma direnci parametreleri bulunabilmektedir. Kesme kutusu, halka kesme ve üç eksenli basınç deneyleri, zeminlerin kalıcı kayma dirençlerini belirlemede kullanılan başlıca laboratuvar deney yöntemleridir (Önalp, 2007).

3.4.1 Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde kesilme işlemi sırasında ilave boşluk suyu basıncı oluşumuna müsaade edilmediği için, ölçülen toplam gerilme değerleri efektif gerilme değerine eşittir. Üç eksenli basınç deneyinde sınırlayıcı drenaj şartları gerçek arazi şartlarının laboratuvarında uygun şekilde modellenebilmesini sağlar. Boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde çok yavaş hızda yapılan drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde, en büyük kayma gerilmesine ulaşıldıktan sonra numuneye uygulanabilir şekil değiştirmeler sınırlı kalmaktadır. Yükseklik/çap oranının iki olduğu numuneler üzerinde yapılan deneyler çok uzun zaman almakta, ancak drenaj kontrol edilebilmekte ve boşluk suyu basıncı ölçülebilmektedir. (Head, 1985)

Aşırı konsolide zeminlerin kayma gerilmeleri, drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde artan deformasyonla birlikte önce artma eğilimi göstererek bir pik değere ulaşır ve ardından gerilme düşüş eğilimi göstererek azalır. Ancak, drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan zemin numunesine uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırının bulunması sınırlayıcı faktör olarak görülmektedir. Çünkü zeminlerin kalıcı kayma direnci büyük kayma deformasyonlarından sonra belirlenebilmektedir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde, belirli bir hücre basıncı altında numune konsolide edilmekte, konsolidasyon tamamlandıktan sonra, uygulanan eksenel yük ile zemin numunesi kesilmektedir. Deney değişik hücre basınçları altında tekrarlanarak Mohr-Coulomb'a göre kalıcı kayma direnci parametrelerini elde etmek mümkün olmaktadır. Şekil 3.8'de konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aleti görülmektedir.

Doygun numuneler üzerinde yapılan üç eksenli deneylerde boşluk suyu basıncının ölçülmesi mümkündür. Doygun olmayan zeminlerde boşluk hacminde su ile birlikte hava da bulunduğu için ve hava basıncının ölçümü klasik üç eksenli deneylerde mümkün olmadığı için, kısmen doymuş zeminler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi uygulanamaz. Bu zeminlerde; üç eksenli deney yapılmadan önce numune doymuş hale getirilir ve doymuşluk kontrolü yapıldıktan sonra deneye başlanır. Numuneyi doymuş hale getirmek için hücre basıncı ile birlikte numuneye ters basınç uygulanmaktadır. Ters basınç daima hücre basıncından küçük tutulmalıdır.



Şekil 3.8: Üç eksenli drenajlı deney aleti (İTÜ)

Kısmen doymuş bir numunenin doymuş hale geldiği Skempton parametreleri ile anlaşılmaktadır. Skempton'nun A ve B parametreleri konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde belirlenebilmektedir. Skempton'nun B parametresi, numuneye çevre basıncının uygulanması sırasında belirlenmektedir. Konsolidasyonunu tamamlamış numunenin doymuş hale gelip gelmediğini anlamak için B parametresi hesaplanır. Konsolidasyonlu-drenajlı deneyde B parametresini belirlenmek için drenajlar kapalı iken çevre basıncında yapılan artıma karşılık boşluk suyu basıncında ki artım gözlemlenmelidir. A parametresi ise numuneye deviatör gerilme uygulanması aşamasında belirlenmektedir. Skempton'un B ve A parametreleri (3.3) ve (3.4) bağıntıları ile hesaplanabilmektedir (Skempton, 1964).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.3)$$

$$A = \frac{\Delta u}{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)} \quad (3.4)$$

Tipik bir üç eksenli deneyinde deney süresi boyunca hücre basıncı sabit tutulduğundan $\Delta \sigma_3=0$ ve $\Delta \sigma_1= \sigma_1-\sigma_3$ dir.

Numunenin doymun hale gelmesi için gerekli zaman; doymunluk için uygulanan ters basıncı ile numunenin başlangıçtaki doymunluk derecesine bağlıdır. Zaman faktörü Black ve Lee tarafından 71mm çaplı kum numune üzerinde yapılan deneylerle araştırılmaya başlanılmıştır, Black ve Lee kil numuneler üzerinde de deneyler yapmışlar ve benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Black ve Lee doymunluk derecesi %75-85 arasında olan numuneleri doymun hale getirmek için daha uzun bir sreye gerek duyulduğunu deney sonuçlarından elde etmişlerdir. Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerde doymunluğa erişme süresi 1 günde sürebilir birkaç haftada.

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı gibi $B=100$ olması pek mümkün değildir. Doymunluk alışmaları sonucu Black ve Lee zeminleri çok yumuşak, yumuşak normal konsolide killeri, orta sıkı zeminler, sıkışmış kil ve siltler, aşırı konsolide killeri ve çok sıkı zeminler, çok sıkı istiflenmiş killeri, çok sıkı kumlar, yüksek efektif gerilmede konsolide olmuş killeri olmak üzere kategorilere ayırmışlardır.

Yukarıda belirtilen doymunluk kriterlerine ilave olarak, pratik amaçlar için %100'den daha az doymunluk derecelerinde, hücre basıncı artışlarında aynı B değeri elde ediliyorsa, numune doymuş kabul edilebilir. Numune doymun olduğu için hücre basıncı artırılsa da efektif gerilme sabit kalır. Eğer boşluk suyu basıncı ilave hücre basıncı ile değişiyorsa numune doymamış olarak kabul edilir. Bir diğer kontrol yöntemi ise drene olan su hacmi ile numunenin hacmindeki değişimin kıyaslanmasıdır, bu iki değeri eşit ise numune doymun demektir. (Head, 1985)

Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerde drenaj borularındaki havanın çözülmesi için gerekli olan zaman borunun çapına ve uzunluğuna bağlıdır. Numuneye uygulanan ters basıncın birçok avantajı vardır, bu avantajlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- a) Numune tamamen doymunluğa ulaştığı zaman, numunenin içindeki hava çözülür ve suyun hacmi numunedeki boşluk hacmine eşit olur. Böylece doğru boşluk suyu basıncı ölçümleri alınabilir
- b) Ters basıncı uygulanması ile sadece numunenin içindeki hava değil, membran ve numune arasındaki sıkışmış havanın da çözülmesi sağlanır
- c) Kayma boyunca şişen numunede, drenajlı deney boyunca su serbest bir şekilde, havanın numunenin içine girmesine müsaade edilmeden drene edilir.

3.4.2 Tekrarlı kesme kutusu deneyi

Kesme kutusu deneyi uzun yıllardan beri kullanılmakta olan en eski laboratuvar deney yöntemlerinden biridir. Ayrıca diğer deneylere göre anlaşılması kolay ve karmaşık olmayan bir deneydir. Kesme kutusu deneyinde, belirli bir normal gerilme altında, uygulanan kesme kuvveti ile zemin numunesi üst parçası sabit, alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket edebilen ve numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca kayma direnci belirleninceye kadar ileri geri olacak şekilde kesilmektedir. Deney değişik normal gerilmeler altında tekrarlanarak zemin numunesinin direnç zarfını elde etmek mümkün olmaktadır. Böylece zeminin kalıcı kayma direnci parametreleri bu zarf yardımıyla belirlenebilmektedir. Tekrarlı kesme kutusu deneyi, aşırı konsolide killerin kalıcı kayma direncini belirlemek amacıyla yapılmaktadır, bu deney ile kalıcı kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi için gereken deformasyona ancak numunenin ileri – geri kesilmesiyle ulaşılabilmektedir. Buna bağlı olarak, yassı kil danelerinin tümünün kayma doğrultusuna paralel olarak yönelimi elde edilememektedir (Bromhead). Değişik normal gerilmeler altında yeterli çevrimler yapıldıktan sonra zeminin direnç zarfı belirlenebilir. Kesme kutusu deney aleti Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9: Kesme kutusu deney aleti (İTÜ)

Tekrarlı kesme kutusu deneyi kalıcı kayma direncinin belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan deney yöntemlerinden biri olmasına rağmen, deneyin bazı sınırlayıcı yanları da bulunmaktadır. Kesilmeye zorlanan yüzeyin zeminin en zayıf yüzeyi olmayabileceği, kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının ölçülememesi,

göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının düzgün yayılı olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır. Ayrıca, Bromhead ve Curtis (1983), kesme kutusu deneyinde numune sürekli aynı yönde değil, ileri geri kesilmesinden dolayı kayma yüzeyini oluşturması beklenen yassı kil danelerinin tamamının kayma yüzeyine paralel doğrultuda dane yönelimi oluşturmalarının mümkün olmadığını savunmaktadırlar.

3.4.3 Halka kesme deneyi

Tekrarlı kesme kutusu deneyindeki bu dezavantajlar ve farklı düşey gerilmeler altında da gerçekleştirilen deneylerin tamamlanmasının uzun sürmesi araştırmacıları farklı deney yöntemleri ve düzenekleri araştırmaya yönlendirmiştir. Bu yöntemlerden en bilineni halka kesme deneyidir. İlk halka kesme aleti Casagrande tarafından tasarlanmış ve Hvorslev (1939) tarafından anlatılmıştır. Halka kesme aletinde sistemin izin verdiği hız ile halka şeklindeki zemin numunesi, tekrarlı kesme kutusu deneyindeki gibi uygulanan sabit bir normal gerilme altında deney aletinin üst kısmı sabit tutularak alt kısmının döndürülmesi ile numune üzerinde sınırsız kayma hareketi oluşturulmakta ve numune kesilmektedir. Böylece bütün kil danelerinin kayma yönüne paralel olarak yönelimi sağlanmakta ve kalıcı kayma direncinin elde edilmesi kısa sürede gerçekleşmektedir. Ayrıca kayma yüzeyi kesme işlemi süresince sabit en kesit alanına sahip olmaktadır (Stark, 1994). Kesme kuvvetindeki, düşey sürtünme kuvvetindeki, düşey deplasman değerlerindeki ve düşey gerilme değerlerindeki değişim deney süresince amplifikatörden gözlemlenebilmektedir. Çeşitli korelasyonlar yardımıyla gerçek değerler elde edilir. Kesme kutusundaki gibi farklı normal gerilmeler altında deney tekrarlanarak zemin numunesinin direnç zarfı elde edilir. Böylece deneyi gerçekleştirilen zeminin kalıcı kayma direnci parametreleri bulunabilmektedir. Deney sonuçları öncelikli olarak heyelan yüzeyleri ve faylar gibi önceden oluşmuş kayma yüzeyi içeren şevlerin kayma direncini belirlemede kullanılmaktadır (ASTM D-6467, 2000). Şekil 3.10'da halka kesme deney aleti görülmektedir.

Halka kesme deneyinin diğer yöntemler göre iki temel üstünlüğü bulunmaktadır. Bunlar deneyin sınırsız kayma yerdeğiştirmesine olanak sağlaması ve zeminlerde görülen rotasyonel kaymayı en gerçekçi şekilde modellemesidir. Ancak halka kesme

deneyi için gerekli numune ϕ apının büyük olması ve sondajlardan alınan numunelerin çoğunlukla yeterli büyüklükte olmaması nedeniyle örselenmemiş numuneler için bu deneyin kullanılabilirliği çok pratik olamamaktadır. Kesme kutusu deneyinin; uzun süreli olması ve yukarıda sayıldığı gibi birçok dezavantaja sahip olmasına rağmen, numune ϕ apının halka kesme deneyi için gerekli numune ϕ apı ile kıyaslandığında çok daha küçük olması deneyi fisürlü killerin kayma direnci ölçümünde daha tercih edilir yapmaktadır (Önalp, 2007).



Şekil 3.10: Halka kesme deney aleti (İTÜ)

Tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile halka kesme deney yöntemi Skempton (1985) tarafından detaylı olarak incelendiğinde halka kesme deneylerinden elde edilen kayma direnci değerlerinin, geri analiz ile elde edilen değerlerden daha küçük değerlerde olduğu ve hataların daha az oranda olduğu belirlenmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde yaptığı çalışmada ise sonucun gerçek değerlerden ortalama 0.5° daha büyük kalıcı direnç değerleri verdiğini bulmuştur. Yapılan karşılaştırmalar sonucu halka kesme deneyinin tekrarlı kesme kutusu deneyinden daha avantajlı bir deneydir ve kalıcı kayma direnci ile ilgili bir alt limit vermesi açısından büyük öneme sahiptir.

3.5 Kayma Deformasyonu ile Kalıcı Kayma Direncinin Değişimi

Yapılan çalışmalarda, zeminlerin kalıcı kayma direncine ulaşılması için büyük yer değiştirmeler gerektiğini Kamai (1998) başta olmak üzere birçok araştırmacı belirtmiştir. Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki incelendiğinde, kayma gerilmesinin pik değerden kalıcı duruma geçtiğinde kayma gerilmesindeki değişimler sabit kalmaktadır. Bunun sonucunda efektif gerilmenin kalıcı haldeki değeri elde edilebilir. Kayma direncinin kalıcı duruma geçtiği anda kil minerallerinin dane yönelimi sonucunda pürüzlü olan kayma yüzeyinde kayma başlar.

Geçmişte, zeminlerin kayma dirençlerinin kayma deformasyonu ile değişimini gözlemlemek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Zemin numuneleri üzerinde tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapılarak kayma gerilmesinin deformasyon ile değişimi incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan halka kesme deney sonuçlarına göre zeminlerin kayma direncinin kalıcı kayma direnci değerine genelde 100 mm'yi aşan yer değiştirmeler sonucunda ve bazen 500 mm'yi aşan yer değiştirmelerden sonra ulaşıldığı Skempton (1985) tarafından belirlenmiştir. Çizelge 3.1'de kil yüzdesi %30'dan fazla olan ve 600 kPa değerinden daha düşük efektif normal gerilmelerde kesilen zeminlerin, pik ve kalıcı kayma direnci açılarının belirlenmesi için gerekli kayma yer değiştirmesi değerleri verilmiştir (Skempton, 1985).

Çizelge 3.1: Pik ve kalıcı kayma dirençlerinin belirlendiği deplasman değerleri (Skempton, 1985)

Kayma Direnci Açısı (°)	Deplasman (mm)	
	Aşırı Konsolide	Normal Konsolide
ϕ_p' (Pik)	0.5-3	3-6
$\phi_r' + 1$ (Kalıcı Dirence yaklaşan değer)	30-200	
ϕ_r' (Kalıcı)	100-500	

Sinclair ve Broker (1967) yaptıkları çalışmalarda, yüksek efektif normal gerilmeler altında kesilen kil numunelerin kalıcı kayma direncine daha küçük yer değiştirmeler sonucunda ulaşıldığını belirtmektedir. Uygulanan efektif normal gerilmenin 100 kPa olduğu bir deneyde kalıcı kayma direncine 50 mm'den büyük yer değiştirmelerle

ulaşılmasına rağmen bu değer 200 kPa'lık bir gerilmenin uygulandığı deneyde yaklaşık 25 mm'ye düşmektedir.

Zeminlerin kalıcı kayma direncine yaklaşan direnç değerleri (Çizelge 3.1'de gösterilen $\phi_r' + 1$ değeri gibi), yaklaşık %20-%50 arasında değişen deplasmanlar sonucu belirlenebilmektedir (Lupini, 1980).

Kesme kutusu veya halka kesme deneylerinde normal konsolide killerde pik kayma dirençleri daha büyük kayma hareketleri sonucunda oluşmaktadır. Su muhtevassından dolayı oluşan kayma gerilmesindeki düşüş genelde 5-10 mm yerdeğiştirmeler sonucu tamamlanmaktadır. Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerin pik kayma dirençleri ise ortalama 1 mm mertebesindeki yerdeğiştirmeler sonucu belirlenebilmektedir.

3.6 Kalıcı Kayma Direncini Etkileyen Faktörler

Zeminlerin kalıcı kayma direnci parametrelerini etkileyen başlıca faktörler; minerolojik yapı, efektif normal gerilme seviyesi, kesme hızı ve zemin yapısı olarak sıralanabilmektedir. Bunların yanı sıra pik kayma gerilmesini etkileyen zemin yapısının kalıcı kayma direncine etkisi bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

La Gatta (1970), örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde yapmış olduğu deneylerde, numune hazırlama yönteminin kalıcı kayma direncini etkilemediğini belirlemiştir. Tiwari ve diğ. (2005) benzer iklim koşullarında ve jeohidrolojik durumlarda oluşan 6 farklı zemin kaymasını incelemişlerdir. Farklı derinliklerden alınan numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yapmışlar ve örselenmemiş ve yoğrulmuş durumlardaki kalıcı kayma direnci parametrelerinin oldukça yakın olduğu ve örselenmemiş numunenin pik kayma gerilmesinin yoğrulmuş numuneye göre daha büyük olduğu ve yoğrulmuş numunenin kalıcı duruma daha küçük deformasyonla ulaştığını deney sonuçlarından elde etmişlerdir.

3.6.1 Mineralojinin etkisi

Doğal zeminleri oluşturan daneler kayaların mekanik ve kimyasal ayrışma sonucu küçük parçalara bölünmesi ile oluşmaktadır. Daneleri oluşturan kayaların birbirinden çok farklı minerolojik yapıya sahip olmaları ve ayrışmaya yol açan faktörlerin çok çeşitli olması nedeni ile doğal zeminler içinde farklı boyutlarda ve biçimlerde daneler yer almaktadır. Kayalar içindeki daha duraylı mineraller ayrışma sonucu iri daneli

mineralleri meydana getirirken, daha az duraylı mineraller kimyasal ayrışma sonucu ikinci minerallere dönüşmektedir. Kırılgan ve plakalı bir yapıya sahip bu mineraller çok küçük parçalara bölünerek ince daneleri oluşturmaktadır (Özaydın,2000).

Zeminlerde danelerin boyutlarında meydana gelen azalma danelerde yassılığı arttırmaktadır. Danelerin yassılığının artmasıyla, daneler gelişigüzel dizilmiş olsalar bile daneler arası yüzey-yüzey etkileşimi etkin olmaktadır. Zeminlerdeki yassı şekilli danelerin sayısı arttıkça kalıcı (rezidüel) kayma direnci de azalmaktadır. Kaolinit, illit, montmorillonit gibi kil minerallerinin yassı şekillerde olması kalıcı kayma direnci ile aralarında ilişki kurulmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu kil minerallerinin en önemli özelliklerinden biri ise minerallerin su ile temas etmesi halinde plastiklik özelliği göstermeleridir.

Killi zeminlerin danelerini oluşturan minerallerin ince plakalardan oluşan bir kristal yapıya sahip oldukları bilinmektedir. Kil danelerinin yüzeyinde ve su molekülleri ile kimyasal maddelerde birbirinden farklı elektriksel yüklerin mevcut olması sonucu aralarında elektriksel çekim ve itki kuvveti oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin şiddeti büyük ölçüde danelerin mineral yapısına bağlıdır. Su molekülleri, kil danelerinin yüzeyine elektriksel çekim kuvvetleri sonucu yapışmaktadır. Böylece dane yüzeylerinin absorbe su olarak tanımlanan su tabakası ile kaplanmasına sebep olmaktadır. Daneler arasında, absorbe su tabakaları ile zeminin düşük su muhtevasına sahip olduğu durumlarda temas meydana gelmektedir. Ayrıca, su tabakalarının yüksek viskoziteye sahip olmasından dolayı danelerin birbirlerine göre hareketi zorlaşmaktadır. Daneler, zeminin su muhtevasının artış göstermesi durumunda birbirlerinden uzaklaşmakta ve absorbe su tabakaları arasında bağlantı veya temas ortadan kalkmaktadır. Kil yüzdeleri, likit limitleri ya da plastisite indisleri ile kalıcı kayma direnci açısı aralarında bir ilişki ya da bir bağıntı belirlenmek isteniyor ise bu etmenlerin aralarında ortak olan ya da olmayan temel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Mersi ve Cepeda-Diaz, 1986).

Kalıcı duruma ancak büyük deformasyonlar sonucunda ulaşılabildiğinden danelerin başlangıçtaki konumlarının kalıcı kayma direncine etkisi olmadığı, örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde yapılan deneyler ile gösterilmiştir (Bishop, 1971; Tiwari ve Marui, 2004).

3.6.2 Kıvam limitlerinin etkisi

Boşluklardaki suyun varlığı özellikle ince daneli zeminlerin mühendislik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Atterberg killerin kıvamında su muhtevasına bağlı olarak meydana gelen değişimleri deneysel olarak saptayabilmek için bazı sınır su muhtevası değerleri tanımlanmıştır. Atterberg limitlerine göre zeminin su içeriğinin nerede olduğu bilinirse onun mühendislik davranışı hakkında birçok şey tahmin edilebilmektedir. Zeminlerde başlıca likit limit, plastik limit ve büzülme (rötre) limiti olmak üzere üç farklı kıvam limiti kullanılmaktadır.

Likit limit, zeminlerin plastik bir kıvamdan viskoz bir sıvıya dönüştüğü su muhtevası olarak bilinmektedir. Aynı zamanda likit limit, zemin bileşiminin suyu tutma kabiliyetinin de bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Zeminin sahip olduğu su muhtevası eğer likit limit değerinden daha büyük bir değere sahipse, bu durum zeminin bir sıvı gibi akışkan olmasına neden olmaktadır. Dane boyutunun azalması yani özgül yüzeyin artması ile likit limitinde artması beklenmektedir. Bu nedenle, kil mineralojisi ile likit limit arasında bir ilişki olması beklenir.

İnce daneli bir zemine kırılmalara yol açmadan, yoğrularak istenilen şekil verilebiliyor ise o zeminin plastik bir kıvamda olduğu kabul edilmektedir ve zeminin plastik özelliğini koruduğu en düşük su muhtevasına da plastik limit adı verilmektedir. Plastisite indisi ise zeminin likit limiti ile plastik limiti değerleri arasındaki farka eşittir, plastisite indisi zeminin plastik olduğu durumdaki su muhtevası aralığını tanımlayan bir kavramdır. İfade edilen bu kavramlar, killerin su muhtevasına bağlı olarak kıvamlarında meydana gelen değişimleri belirleyebilmek için Atterberg'in tanımladığı sınır su muhtevası değerleridir. Aktivite ise plastisite indisi ile kil yüzdesi arasındaki orantıdır. Aktivitesi 1 civarında olan killer ($0.75 < A < 1.25$) normal, $A < 0.75$ killer pasif, ve $A > 1.25$ olanlar da aktif olarak sınıflandırılmaktadır (Das, 2002).

Özgül yüzey; yüzey alanının, ağırlığa veya hacme oranı olarak belirtilmektedir. Dane boyutları azalırken yani özgül yüzey artarken zeminin likit limitinin de artması beklenmektedir. Dolayısıyla, kil mineralojisi ile likit limit arasında bir ilişkinin olması gerekmektedir. Bunun nedeni, her ikisinin de dane büyüklüğü faktörü bulunmaktadır. Çizelge 3.2'de genel kil minerallerinin boyut-özgül yüzey değerleri verilmiştir (Bardet, 1997).

Çizelge 3.2: Bazı kil minerallerinin ortalama kalınlık-çap ve özgül yüzey değerleri (Bardet, 1997)

Mineral	Çap (µm)	Kalınlık (µm)	Özgül Yüzey (m ² /gr)
Kaolinit	0.3-4	0.05-2	15
Montmorillonit	0.1-1	0.003	800
İllit ve Klorit	10	0.03	80

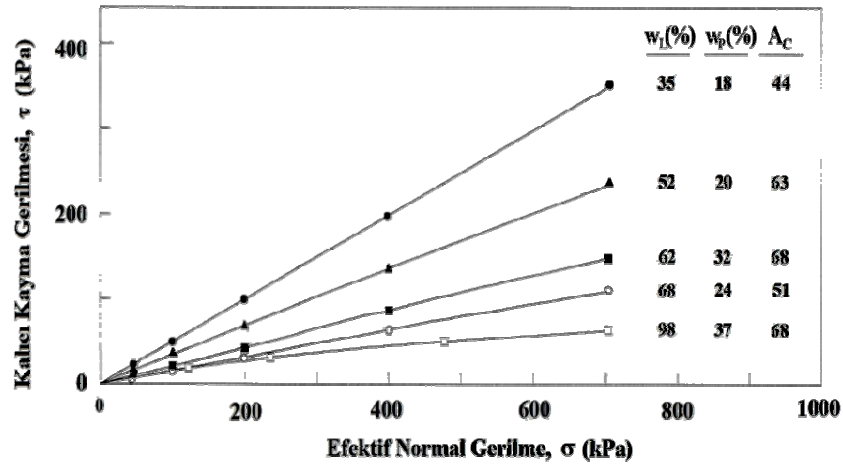
Dane boyutunun artması özgül yüzeyin azalmasına neden olur. Zeminlerde özgül yüzey hesabı, danelerin yüzeyleri herhangi bir geometrik şekle sahip olmamasından dolayı pratikte hesaplanamamaktadır. Fakat, aynı hacmi dolduran iri daneli zeminlerin özgül yüzeyi ile ince daneli zeminlerin özgül yüzeyleri karşılaştırıldığında ince daneli zeminlerin özgül yüzeyi daha fazla olmaktadır.

Kil minerallerinin dane boyutunun artması, yassılığı azaltmaktadır. Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), dane boyutu ile yassılık arasında böyle bir ilişkinin bulunmasına karşın dane şekli ve su tutma kapasitesi yani likit limit arasında bir ilişki kurulamayacağını belirtmişlerdir. Bir kil minerali olan attapulgitin iğnemsî şekiline rağmen likit limitinin %345 gibi bir değer alabileceği yine Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) tarafından örnek olarak verilmiştir. Çizelge 3.3’de kil minerallerinden bazılarının likit limit, plastik limit ve aktivite değerleri belirtilmektedir (Das, 2002).

Çizelge 3.3: Çeşitli kil mineralleri ve likit limit (w_L), plastik limit (w_p) ve aktivite (A) değerleri (Das, 2002)

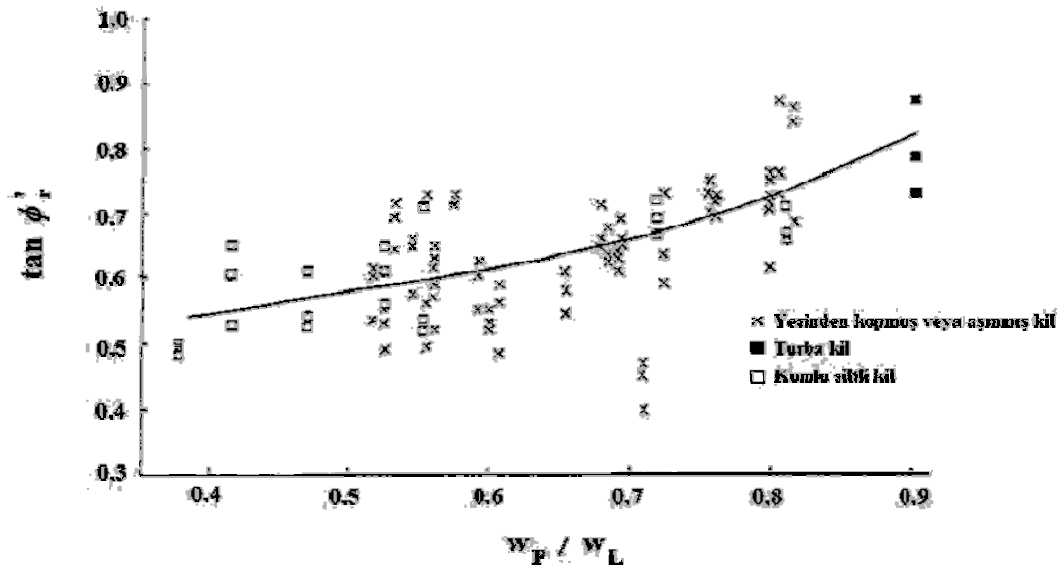
Mineral	w_L (%)	w_p (%)	A
İllit	60-120	35-60	0.5-1.2
Kaolinit	35-100	20-40	0.3-0.5
Montmoillonit	100-900	50-100	1.5-7
Halloysit(Hidrathlı)	50-70	40-60	0.1-0.2
Halloysit(Hidratsız)	40-55	30-45	0.4-0.6
Attapulgit	150-250	100-125	0.4-1.3
Allophan	200-250	120-150	0.4-1.3

Zeminin likit limiti ve aktivitesinin artmasıyla kalıcı kayma direnci Şekil 3.11’de görüldüğü üzere azalmaktadır. Stark (1994) yapmış olduğu çalışmada, zeminlerin likit limit ve aktivite değerlerinin kil mineralleri çeşitlerine birer gösterge olduğunu ve bu nedenle dane şekli ve boyutu için de birer gösterge halini aldığını belirtmiştir.



Şekil 3.11: Kıl mineralojisinin kalıcı kayma direncine etkisi (Stark, 1994)

R.E. Gibson (1953), T.C. Kenney (1959 ve 1967), B. Voight (1973), P.K. De ve B. Furdas (1973), J.K. Mitchell (1976), R.D Holtz ve W.D Kovacs (1985) ve A.W. Skempton (1985), zeminlerin drenajlı koşulları için plastisite indisi ile kalıcı kayma direnci açısı arasında bağıntı kurulabileceğini yapmış oldukları çalışmalarla ifade etmişlerdir. Bu çalışmalardan en önemlisi De ve Furdas (1973) tarafından gerçekleştirilmiştir. Güney Galler'den gelen aşırı konsolide zeminler üzerine yapılan çalışmalarda plasitik limitin likit limite oranı (w_p/w_L) ile kalıcı kayma direnci açısı arasında bağıntı geliştirilmiştir. Şekil 3.12'de De ve Furdas'ın bağıntısı görülebilmektedir.



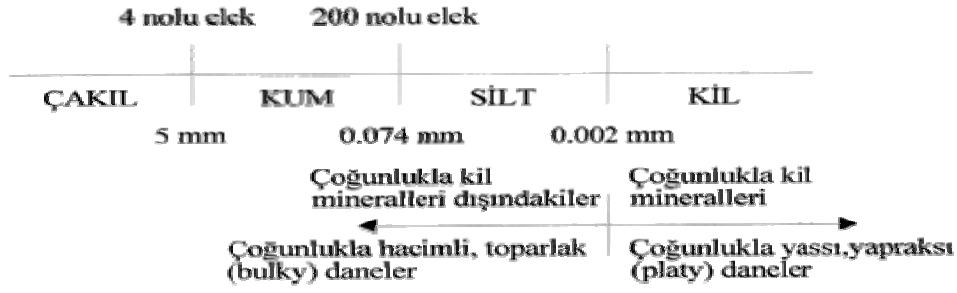
Şekil 3.12: Güney Galler aşırı konsolide zeminlerinin w_p/w_L ile kalıcı direnç açısı arasındaki bağıntı (De ve Furdas, 1973)

Şekil 3.12’de görüldüğü üzere datalar geniş olarak dağılıma sahiptir. Fakat, De ve Furdas (1973), Güney Galler aşırı konsolide zeminleri için kalıcı kayma direnç açısını ortalama 29° - 31° olarak önermişlerdir. Ancak plastisite indisi ile kalıcı direnç açısı arasındaki ilişkiyi belirleyen bu çalışmalarda, ortalama değerler baz alındığı, drenajlı koşullar altında pik kayma direnci ve kalıcı kayma direnci için sürtünme direnci unsurları karıştırıldığı, Voight (1973)’un çalışması haricinde, diğer çalışmalarda farklı kil mineralojisine sahip zeminlerin direnç dataları birleştirildiği, Voight (1973) sadece montmorillonit kil zeminler üzerinde çalıştığı için yanlış sonuçlara sebep olabilir.

Olson (1974), bu çalışmalara ek olarak nispeten saf kaolin, illite ve montmorillonit numuneler üzerinde deneyler yaparak kayma direnci değerlerini belirlemiştir. Yaptığı çalışmalarda kaolinin en yüksek dirence, montmorillonitin en düşük dirence sahip olduğunu ifade etmiştir. Olson (1974)’un çalışmalarına göre illite ise kaolinden düşük, montmorillonitten yüksek dirence sahiptir.

3.6.3 Kil yüzdesinin etkisi

İnce daneli zeminlerin özellikle kil minerallerinin kalınlıkları diğer boyutlarına göre çok küçük olan ince plakalar halinde oldukları bilinmektedir. Bu daneler çok küçük oldukları için biçimleri ancak mikroskop altında incelenebilir. Kil yüzdesi ile kil içeriği ifadelerinin ayrı anlamlar taşıdığı bilinmelidir. Bunun nedenini Mitchell (1993), her ne kadar killer, dane çapı 0.002 mm’den yani $2\mu\text{m}$ ’dan ufak daneler olarak bilinse de bütün kil minerallerinin 0.002 mm’den küçük olmadığını ve her kil olmayan minerallerinin de 0.002 mm’den daha büyük olduğu ifade edilse de bütün kil olmayan minerallerin 0.002 mm’den büyük olmadığını belirtmiştir. Yani, plastik özelliği göstermeyen ve 0.002 mm’den küçük boyutlarda olan danelerin bulunabileceğini ifade etmiştir. Kil minerallerinin zemindeki miktarını kil yüzdesiyle yani 0.002 mm’den daha küçük çaplı dane yüzdesiyle verildiğini ve bunun sebebinin, kil minerallerinin genellikle 0.002 mm’den daha küçük olduğunu Mitchell (1993) belirtmiştir. Ayrıca kil içeriği ifadesinin ise dane boyutu gözetmeksizin zeminde bulunmakta olan kil mineralini ifade ettiğini belirtmiştir. Mitchell (1993)’in dane şekli ile dane çapı arasındaki ilişkiyi vermek için yapmış olduğu grafik Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13: Dane şekli ile dane çapı arasındaki ilişki (Mitchell, 1993)

Şekil 3.13'de görüldüğü üzere 0.002 mm'den büyük çaplı danelerin genellikle kil mineralleri olmayıp hacimli ve toparlak danelerden oluştuğu ve 0.002 mm'den küçük çaplı danelerin ise genelde kil mineralleri olduğu ve minerallerin yassı şekilli oldukları görülmektedir.

Efektif normal gerilme seviyesi, kalıcı dirençleri pik dirençlerinden farklı olan genel kil minerallerini etkiler. 0.002 mm'den küçük çaplı ve montmorillonit, illit ve kaolinit gibi yassı şekilli kil minerallerinin kalıcı kayma direnç açıları ifade edilmesi gerekirse yaklaşık olarak 5, 10, 15 derece olarak sıralanabilir. 0.002 mm'den daha küçük olmasına rağmen attapulgit, allophane ve halloysite gibi kil minerallerinin yassı şekilli olmamasından dolayı kalıcı kayma direnç açıları daha büyük değerlere sahiptir. Ayrıca bu tür kil mineralleri iğnemsî veya boru şekilli danelerden oluşmaktadır. Kuvars, feldispat ve kalsit gibi kil mineralleri dışındaki minerallerin kalıcı kayma dirençleri pik dirençlerinden farklı olmamakta ve yaklaşık aynı değerleri almaktadır ($\phi' \approx 35$). Ayrıca efektif normal gerilmelerden önemli ölçüde etkilenmemektedir (Mitchell, 1993).

Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), yassılık ile kil yüzdesi arasında bir ilişki varsa illite, montmorillonit ve kaolin gibi genel kil mineralleri için olan yassılık-dane boyutu arasındaki ilişkiden doğan dolaylı bir ilişki olabileceğini ifade etmişlerdir. Bunun yanında Hawkins ve Privett (1985), aynı kil yüzdesine sahip zeminlerin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip farklı kil minerallerinden oluşabileceğini, bununla kayma direnci parametrelerini önemli derecede etkilediğini, kil yüzdesiyle yapılan korelasyonlarda unutulmaması gerektiğini belirtmişlerdir.

3.6.4 Efektif normal gerilmenin etkisi

Kil yüzdesi yüksek olan zeminlerde, Hawkins ve Privett (1985)'in yapmış oldukları çalışmalarda göçme zarflarında eğrilikler olduğu bulunmuştur. Ayrıca Hawkins ve Privett (1985), zeminlerin kalıcı kayma direncinin plastisite indisi veya kil yüzdesi gibi diğer parametrelerle ilişkilendirilen bağıntıların, sadece aynı efektif normal gerilmelerde göz önüne alınırsa ve bu gerilme düzeyi söz konusu olan problemlerle alakalı ise anlam taşıdığını ifade etmişlerdir. Az miktarda ince kil içeriğine sahip olan zeminlerde göçme zarflarında daha büyük eğrilik görülmesine karşın bu eğriliğin sebebi tam olarak belirlenememiştir. Yüksek normal gerilmelerde, kenar-yüzey etkileşimlerinden yüzey-yüzey etkileşimlerine dönüşüm daha fazla olmaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma direnci, temas alanı arttığında azalmaktadır. Böylece kalıcı göçme zarfı doğrusal olmamaktadır (Hawkins ve Privett, 1985).

Yüksek kil yüzdesine sahip olan zeminlerin göçme zarfındaki eğriliğin 200 kPa efektif normal gerilme değerinde meydana geldiği görülmüştür. Bu çalışmalarla elde edilen sonuçlar efektif normal gerilme ile zeminlerin kalıcı kayma direnci açıları arasında doğrusal bir ilişkinin bulunduğunu göstermektedir. Bu doğrusal ilişkinin ancak 200 kPa efektif normal gerilme değerine kadar geçerli olduğu ve 200 kPa'dan daha yüksek gerilme değerlerinde, kalıcı kayma direnci açısının efektif normal gerilmeden bağımsız olduğu belirlenmiştir (Mitchell, 1993). Yapılmış olan başka bir çalışmada da Stark (1994), likit limiti %60-%220 arasında olan ve kil yüzdesi %50'den daha fazla olan zeminlerde kalıcı göçme zarfında eğriliğin olabileceğini ifade etmiştir.

3.6.5 Kesme hızının etkisi

Kesme hızı, kalıcı kayma direncini etkileyen bir diğer faktördür. Diğer bir deyişle kesme veya kayma hızının etkisinin bilinmesi kalıcı kayma direnci çalışmalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Çünkü, zeminlerde oluşması muhtemel kayma yüzeyleri çok farklı hızlardaki kesme etkisine maruz kalabilmektedir. Zeminler depremlerle uyarılan çok hızlı hareketlerden veya deprem yükleri altında çok yüksek kayma hızlarının etkisinden, heyelanlardaki çok yavaş hareketlere veya heyelanlardaki düşük kayma hızlarına kadar değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalar hızlı ve yavaş kesme hızı etkisini belirlemek amacıyla

yapılmıştır. Lemos (1985 ve 2003), Suzuki ve diğ. (2001) ve Skempton (1985) yaptıkları çalışmalarla kesme hızının etkilerini incelemişlerdir.

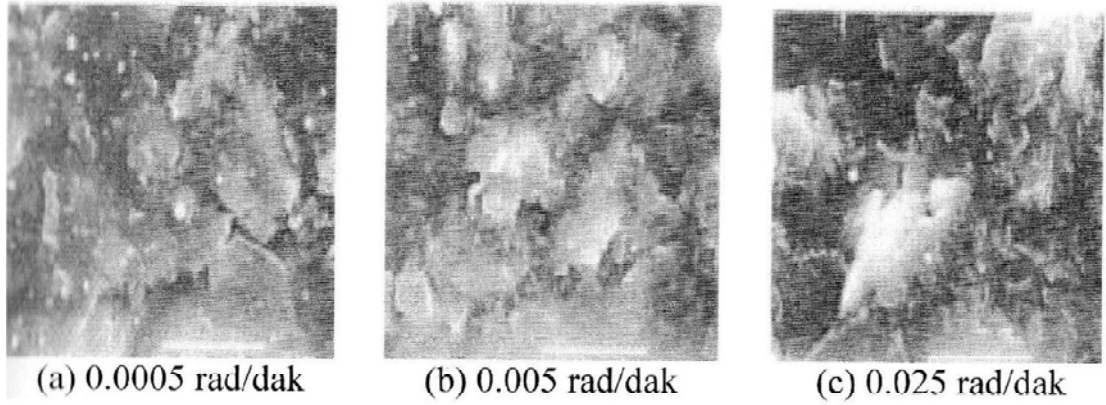
Farklı kil yüzdesine sahip zeminler üzerinde Lemos (1985) yaptığı deneylerle yüksek kesme hızlarının kalıcı kayma direncine etkisini incelemiş ve kil yüzdesine bağlı olarak kesme hızının üç farklı etki gösterdiğini ifade etmiştir. Kil yüzdesi %25'den daha az olan zeminlerde, normal gerilme seviyesine bağlı olarak kalıcı kayma direnç açısı kesme hızı arttıkça azalır (negatif hız etkisi) veya değişmez (nötr hız etkisi). Kil yüzdesi %25-50 arasında olan zeminlerde kalıcı kayma direnci açısı kesme hızı arttıkça azalmaktadır (negatif hız etkisi). Kil yüzdesi %50'den daha fazla olan zeminlerde kalıcı kayma direnç açısı kesme hızı arttıkça artar (pozitif hız etkisi) veya azalır (negatif hız etkisi) (Lemos, 1985).

100-400 mm/dak arasındaki yüksek kesme hızlarında Lemos (2003) yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda üç çeşit hızlı kalıcı kayma direnç değişimleri olduğunu belirtmiştir. Bunlar negatif, nötr ve pozitif hız etkileri olarak sıralanabilmektedir. Nötr veya negatif hız etkisi genellikle yuvarlanma tipi kayma davranışına sahip zeminlerde görülebilmektedir. Bu tür zeminler kil yüzdesinde meydana gelen değişimlere karşı çok hassastır. Ayrıca normal gerilmeye bağlı olarak her iki hız etkisini de gösterebilirler. Geçiş tipi kayma davranışı gösteren zeminlerde negatif hız etkisi altındadırlar. Diğer bir davranış olan kayma tipi davranış gösteren zeminlerde ise negatif veya pozitif hız etkisi görülmektedir. Negatif hız etkisinin nedenleri hakkında Lemos (2003) yapmış olduğu çeşitli araştırmalar sonucu bir mekanizma belirlemiştir. Kayma yüzeylerinde meydana gelen su muhtevastaki ve boşluk oranındaki artışa, numunelerin hızla kesilmesinin neden olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle zemin numunelerinde kayma direncinde kalıcı düşmeler meydana geldiğini ifade etmiştir. Ayrıca kritik değerden daha yüksek yer değiştirmelerde oluşan düşük kayma direnci değerinin sürtünmeye veya büzülmeye bağlı oluşan efektif gerilmelere bağlı olmadığını ve sabit bir değer aldığını tanımlamıştır. Lemos (2003), hızlı kesme işlemi uygulanan kayma yüzeylerinde, yavaş hızda kesme işlemi uygulandığı zaman veya kesme işlemi durdurulduğu zaman danelerin büzülme eğilimine girdiğini ve aşırı boşluk suyu basıncı oluştuğunu belirtmiştir. Ancak kayma yüzeyindeki düşük direnç bu etkene önemli olacak şekilde bağlı olmamaktadır. Hızlı kesme evresinin ardından devam etmekte olan yavaş kesme hızlarında da kayma yüzeyindeki düşük direnç aşırı boşluk suyu basıncı

ortadan kalkana kadar devam etmektedir. Serbest suyun kayma yüzeyine girişi negatif hız etkisinin görülebilmesi için önkoşul olmaktadır (Lemos, 2003).

Suzuki ve diğ. (2001) kaolin ve çamurtaşı numuneleri üzerinde 0.02 ile 2 mm/dak arasında değişen kesme hızlarında gerçekleştirdikleri halka kesme deneyleri ile, hızın kalıcı kayma direncine etkisini incelemişler ve hız etki katsayısını (α) belirlemişlerdir. Çamurtaşının ve kaolinin kalıcı kayma direncinin kayma yerdeğiştirmesi hızına bağlı olduğunu gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarla göstermişlerdir. Böylece kesme hızının zeminlerin kalıcı kayma direncine olan etkisini değerlendirmelerde hız etki katsayısının çok önemli bir etken olduğunu ortaya koymuşlardır. Suzuki ve diğ. (2001), kalıcı kayma direncinde kesme hızının oluşturduğu değişimlerin kil minerallerinin çeşidine ve yapısına bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir.

Kaolin numunesi üzerinde 0.0005-0.005 ve 0.025 rad/dak değerlerindeki kesme hızlarında yapılan deneysel çalışmalarda hız arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Bundan dolayı, kesme hızı ile kalıcı kayma direncinin değişiminin kayma yüzey pürüzlülüğü ile alakalı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.14: Farklı kesme hızlarında kaolinin belirlenen kalıcı durumları için elektron mikroskopundan görünümü

Skempton (1985), yavaş ve hızlı olacak şekilde değişik kesme hızlarından zemin numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri yaparak kesme hızının kalıcı kayma direncine olan etkisini incelemiştir. Yaptığı düşük hızlı (0.002-0.01 mm/dak) deneylerde direnç değişimlerinin dikkate alınmayacak değerlerde olduğunu belirlemiş ve kesme hızının kalıcı kayma direncine önemli derece de etkisinin olmadığını ifade etmiştir. Bilindiği üzere aktif halde bulunan zemin kaymalarında en

düşük ortalama hızın 5 cm/yıl, en yüksek ortalama hızın 50 cm/gün değerleri civarındadır.

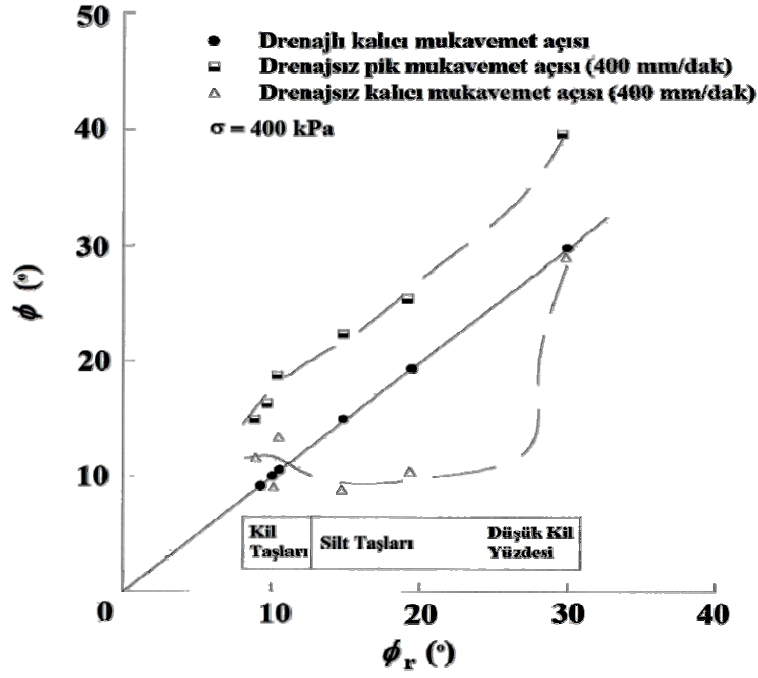
Çizelge 3.4: Geri analiz ve laboratuvar kalıcı kayma dirençlerinin karşılaştırılması (Skempton, 1985)

Hız Değişimi	Hız Değeri	Kalıcı Kayma Direnç Oranı (arazi/laboratuvar)
En düşük arazi	5 cm/yıl = 0.0001 mm/dak	0.97
Genel (yavaş) laboratuvar	0.005 mm/dak	1.00
En yüksek arazi	50 cm/gün = 0.35 mm/dak	1.05

Standart laboratuvar hızı 0.005 mm/dak olarak alınırsa Çizelge 3.4’de görüldüğü üzere tüm bu aralıkta dirençte meydana gelen sapmalar -%3 ile +%5 arasında bulunmaktadır. Bundan dolayı tüm bu aralıkta değişen hızlardaki kalıcı kayma direnci değeri olarak yavaş laboratuvar hızı ile elde edilen direnç değeri alınabilir ve geri analiz ile laboratuvar direnç değerleri doğrudan kıyaslanabilir.

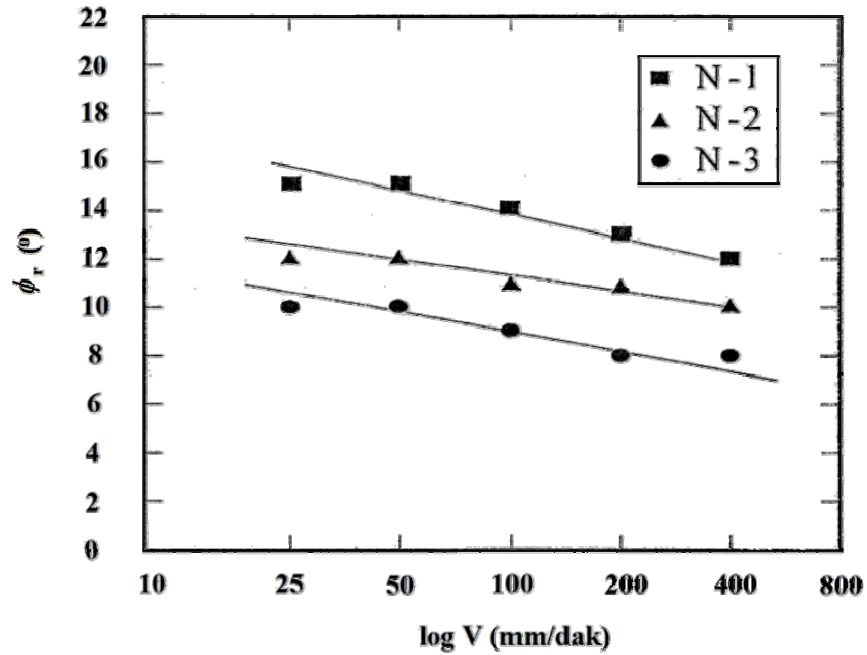
Skempton (1985), yüksek kesme hızlarının etkisini inceleyebilmek için 0.01 mm/dak kesme hızıyla zeminin kalıcı kayma direncini belirledikten sonra kesme hızını 100 mm/dak’ya yükseltmiş ve düzgün bir konum elde edilene kadar tutmuştur. Boşluk suyu basıncı sönümleninceye kadar yeterince beklemiş ve 0.01 mm/dak’lık hızı yeniden uygulamıştır. Skempton (1985) daha sonra hızı başka bir hız değeri olan 400 mm/dak’ya yükseltmiştir. Bu yöntem ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda kalıcı kayma direncindeki göz önüne alınması gereken değişimlerin 100 mm/dak kesme hızını aşan değerlerde oluştuğunu belirlemiştir.

25, 50, 100, 200 ve 400 mm/dak kesme hızların ile dört farklı numune üzerinde Koltuk (2005), yapmış olduğu halka kesme deneyleri ile kalıcı kayma direnci parametrelerine olan etkisini incelemiştir. Kohezyonlu zemin numunelerinde hız değişimlerinin kayma gerilmelerini etkilediğini deneyler sonucunda belirlemiştir. Bu değişim, numuneyi kesme esnasında kayma yüzeyinde oluşan boşluk suyu basıncından meydana gelmektedir. Zemin numunesinde yüksek kesme hızından dolayı suyun geçişine yani hacim değişimine izin verilmemektedir. Bundan dolayı kesme yüzeyi boyunca boşluk suyu basıncı oluşmaktadır.



Şekil 3.15: 400 mm/dak değerindeki kesme hızının kalıcı kayma direncine etkisi(Skempton, 1985)

Koltuk (2005)'un yapmış olduğu farklı kesme hızları altındaki deneysel çalışmalar sonucunda elde etmiş olduğu kalıcı kayma direnç açısı değerlerinin kesme hızı ile değişimi N-1, N-2 ve N-3 numuneleri için Şekil 3.16'da incelenmiştir. Görüldüğü üzere kalıcı kayma direnç açısı kesme hızı arttıkça 2-3° azalmaktadır.



Şekil 3.16: Kalıcı kayma direnç açısına kesme hızının etkisi (Koltuk, 2005)

3.6.6 Zemin yapısının etkisi

Zeminlerin yapısı kalıcı kayma direncini etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir. Burada zemin yapısı olarak kullanılan kavram aslında zemin daneleri arası kuvvetler ve zemin dokusu olarak tanımlanan danelerin geometrik olarak dizilimleridir. Zemin yapısında, yapı ve doku olarak iki kavramdan söz edilebilir. Doku kavramı, kohezyonsuz veya iri daneli zeminler için daneler arası kuvvetlerin, yerçekimi kuvveti yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olmasından dolayı yapı kavramının yerine kullanılmaktadır. Yapı kavramı ise kohezyonlu zeminlerde doku ifadesine ilave anlam katmaktadır.

Büyük deformasyonlar sonucunda kalıcı duruma ulaşılmasından dolayı zemin danelerinin başlangıçtaki konumlarının kalıcı kayma direncine etkisinin olmadığı doğrulanmış ve örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile gösterilmiştir (Bishop, 1971; Tiwari ve Marui, 2004). Garga (1970), La Gatta (1970) ve Bishop (1971)'da yapmış oldukları çalışmalarla aynı sonuçlara ulaşmışlardır. Bishop (1971), zemin yapısının kalıcı durumda zeminin kayma direncini, kayma düzlemine paralel olarak yönelen yassı biçimli daneler arasındaki sürtünme direnci meydana getirdiğinden kalıcı kayma direncine etkisinin olmadığını belirtmiştir.

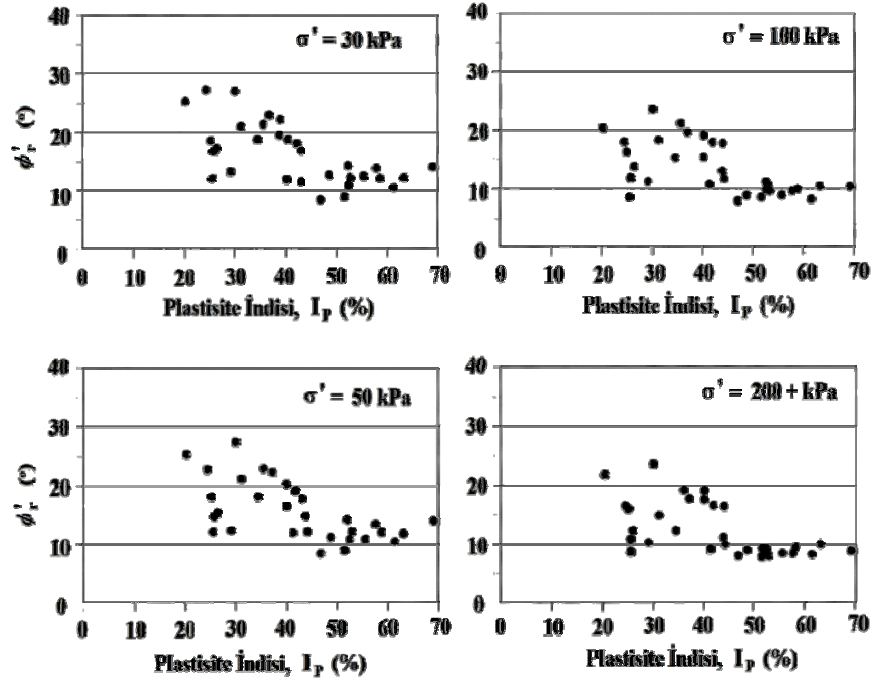
Zeminlerin kalıcı kayma direncinin, artmakta olan deformasyonlar sonucu zeminlerin normal konsolide veya aşırı konsolide olmasına bağlı olmadan yaklaşık aynı değeri aldığı görülmüştür. Bu nedenden dolayı, belirli bir zemin için diğer bütün şartlar (efektif normal gerilme gibi) değişmemesi koşuluyla aşırı konsolidasyon oranının (AKO) zeminin kalıcı kayma direncine etkisinin olmadığı belirtilmektedir (Skempton, 1985). Kil yüzdesi yüksek olan aşırı konsolide kil zeminlerde pik ile kalıcı kayma dirençleri arasındaki farkın oldukça büyük olması kalıcı kayma direnci değerinin önemini daha fazla arttırmaktadır. Aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ile pik direnci arasında doğru bir orantı bulunmaktadır. Aşırı konsolidasyon oranı arttıkça kil zeminlerin en büyük kayma gerilmesi değerleri artmakta, artan deformasyonla kayma gerilmesinin yöneldiği değer yine kalıcı kayma direnci olmaktadır. Bundan dolayı, aşırı konsolidasyon oranı arttıkça pik direnç ile kalıcı kayma direnci arasındaki fark aşırı konsolide kil zeminler için daha fazla olacaktır. Böylece, her ne kadar aşırı konsolidasyon oranının artması kalıcı kayma direnci değerini değiştirmese de önemi artacaktır.

3.7 Zeminlerin Kalıcı Kayma Direnci Açısı İle Endeks Özellikleri Arasındaki İlişki

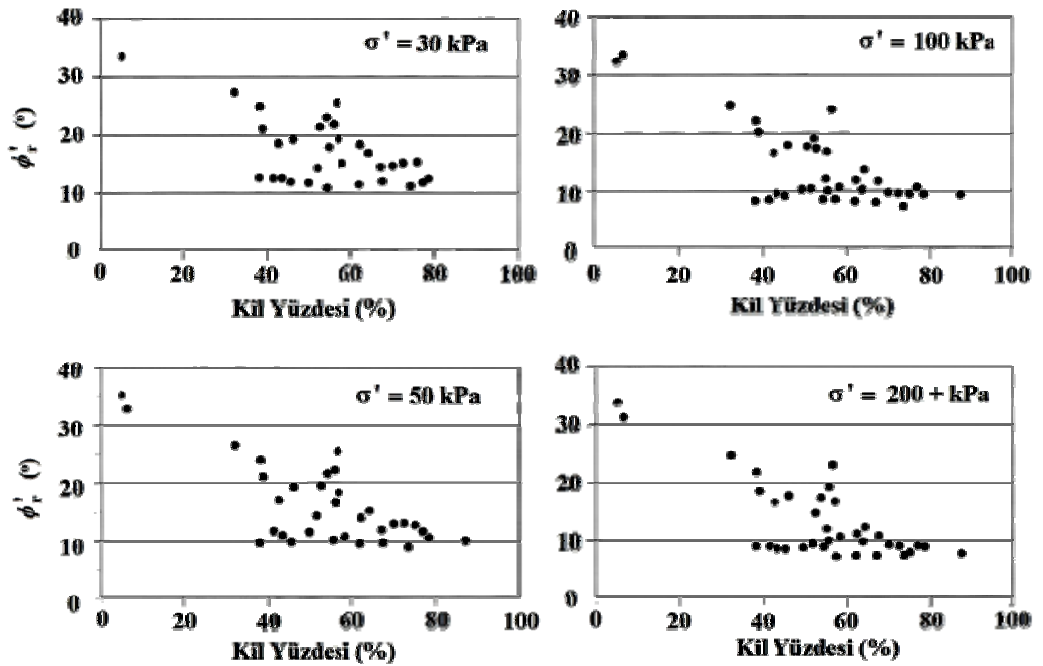
Zeminlerin kalıcı kayma direnci açısı (ϕ_r) ile kıvam limitleri veya kil yüzdesi arasında birçok araştırmacı tarafından araştırmalar yapılmış ve çeşitli ampirik bağıntılar önerilmiştir. Bu çalışmalar ilk olarak 1964 yılında Skempton tarafından başlatılmış ve sırasıyla Lupini (1981), Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), Collotta (1989), Stark (1994), Wesley (2003), Suzuki ve diğ. (2005), İyisan ve diğ. (2006, 2009) gibi bilim adamları çalışmalarıyla katkıda bulunmuşlardır. Bu araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılar, laboratuvar da deneysel çalışma yapmak için numune almanın mümkün olmadığı, zamanın kısıtlı olduğu veya yeterli imkânların olmadığı durumlarda kalıcı kayma direncinin belirlenmesinde faydalı olmaktadır (Tiwari ve Marui, 2005). Bu bölümde bu güne kadar yapılan çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir.

İlk çalışmayı 1964 yılında gerçekleştiren Skempton, kalıcı kayma direnci açısının dört farklı efektif normal gerilme için, plastisite indisi ve kil yüzdesi ile değişimini incelemiştir. Deneylerde kullanılan zeminlerin çoğu kilce zengindir ve plastisite indisi %20'den büyüktür. Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de Skempton (1964)'ın yapmış olduğu çalışmayla ilgili olarak plastisite indisi ve kil yüzdesi ile drenajlı kalıcı kayma direnci açısının değişimini gösteren grafikler bulunmaktadır. Grafikler incelendiğinde kalıcı kayma direnci açısının artan plastisite indisi, kil yüzdesi ve uygulanan efektif gerilme değeri ile kalıcı kayma direnci açısının azaldığı görülmektedir.

Skempton (1964)'ın yapmış olduğu bu çalışmadan da anlaşılacağı üzere plastisite indisi %45'den büyük veya kil yüzdesi %60'dan fazla olan zeminlerin kalıcı kayma direnci açıları düşük değerlerdedir ve genelde geniş bir dağılım göstermezler. Plastisite indisi %25-45 arasında ve/veya kil yüzdesi %35-60 arasında olan zeminlerle mühendislik uygulamalarında çokça karşılaşılır. Bu tür plastisite indisi ve kil yüzdesine sahip olan zeminler geniş bir kalıcı direnç dağılımı göstermektedirler. Bundan dolayı, korelasyonların bu zeminlerde uygun olmadığı görülebilir.



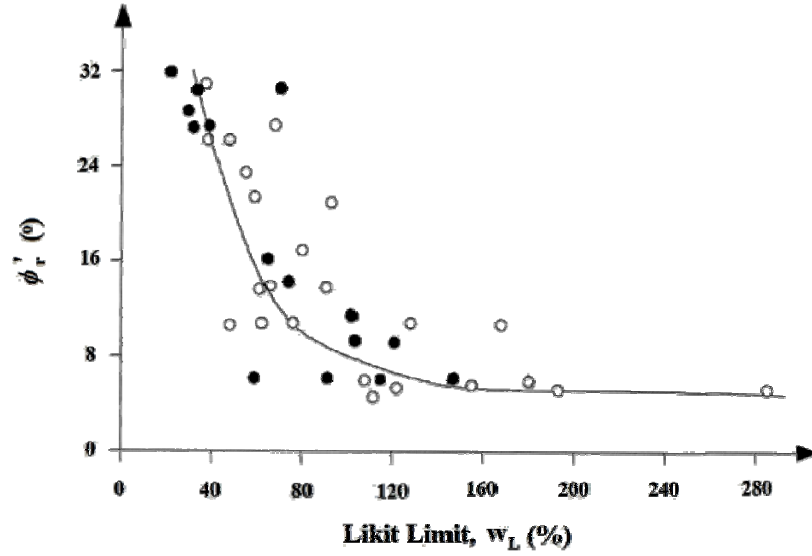
Şekil 3.17: Plastisite indisi ile kalıcı kayma direncinin değişimi (Skempton, 1964)



Şekil 3.18: Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direncinin değişimi (Skempton, 1964)

Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) 0.0005 mm/dak'lık kesme hızında aşırı konsolide kil şeyller üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yaparak, kalıcı kayma direnci ile likit limit arasında bir ilişki elde etmişlerdir. Bu ilişki Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Bu çalışmada da likit limit ve kalıcı kayma direnci ilişki incelendiğinde kalıcı kayma direncinin artan likit limit değeri ile azaldığı görülebilir. Ayrıca Mesri ve Cepeda-

Diaz (1986), %160'dan daha büyük likit limit değerin kalıcı kayma direnci açısından önemli bir azalmaya sebep olmadığını ifade etmişlerdir.



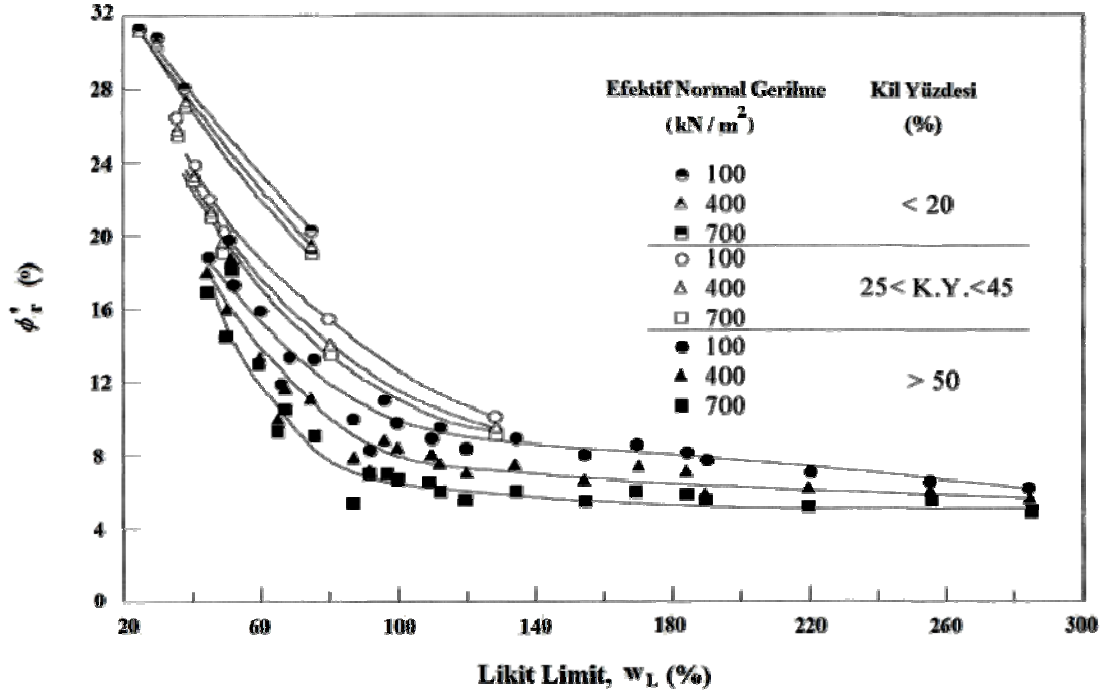
Şekil 3.19: Likit limit ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki (Mesri, 1986)

Mesri ve Cepeda Diaz (1986) yaptıkları çalışmalara 1994 yılında T.D.Stark kil yüzdesi, likit limit ve efektif normal gerilme ile zeminlerin kalıcı kayma direnci açısı arasında bir ilişki belirleyerek katkıda bulunmuştur. Bu ilişkiyi belirleyebilmek için zemin numuneleri üzerinde 0.018 mm/dak hızında halka kesme deneyleri yapmışlardır.

Şekil 3.20'de kil yüzdesi, likit limit ve efektif normal gerilme ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Kohezyonlu zeminler için belirli bir efektif normal gerilme altında kalıcı kayma direnci açıları Şekil 3.20 yardımıyla belirlenebilmektedir. Stark(1994)'ın yapmış olduğu bu çalışmayla 100-400 ve 700 kPa efektif normal gerilme değerlerindeki kalıcı kayma direnci açıları belirlenerek bu değerlere karşılık gelen kayma gerilmeleri belirlenir ve kayma gerilmesi-normal gerilme grafiği çizilerek doğrusal olmayan kalıcı göçme zarfı elde edilebilir.

Stark (1994), kalıcı kayma direnci açısı hesaplanırken likit limit ve kil yüzdesinin beraber kullanılmasının önemini vurgulayabilmek ve açıklayabilmek amacıyla elde etmiş olduğu korelasyonları Gardiner Barajı (Kanada'nın batısında) ve Portekiz Bendi (Los Angeles, California yakınlarında) heyelanlarına uygulamış, korelasyonları karşılaştırmıştır ve bölgelerden alınan numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yapmıştır. Buna göre önerilen yöntemle Gardiner Dam ve Portuguese Bend heyelanları için güvenlik sayıları sırasıyla 1.02 ve 1.04 olarak elde

edilmiştir, halka kesme deney sonuçlarına göre ise Gardiner Dam ve Portuguese Bend heyelanları için güvenlik sayıları sırasıyla 1.01 ve 1.02 olarak bulunmuştur. Sadece kil yüzdesine, plastisite indisine veya likit limite göre elde edilen korelasyonların çelişkili sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

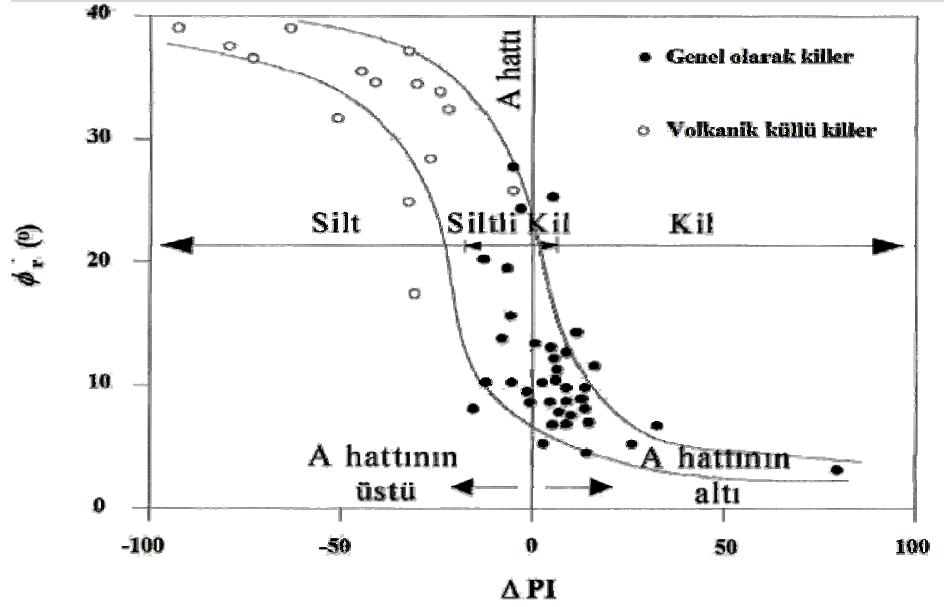


Şekil 3.20: Likit limit, kil yüzdesi ve efektif gerilme ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki (Stark, 1994)

Yapılmış bu çalışmaları, L.D.Wesley (2003) eleştirerek ince daneli zeminlerin özelliklerinin plastisite indisine veya likit limitten birinin olmadığı bir bağıntı ile ifade edilemeyeceğini belirtmiştir. Wesley (2003), Casagrande'nin yapmış olduğu ve bu yüzden Casagrande kartı olarak bilinen kohezyonlu zeminlerin benzer mühendislik özelliklerine göre sınıflandırılmasında kullanılan plastisite kartını örnek göstermiş ve eleştirisinin doğruluğunu belirtmiştir. Casagrande kartı incelendiğinde aynı plastisite indisine veya aynı likit limite sahip zeminlerin çok değişik özellikler gösterebileceği ve bundan dolayı farklı gruplarda yer alabileceği bilinmektedir. Ayrıca farklı likit limit ve farklı plastisite indisine sahip zeminlerin ise aynı grupta olabilecekleri bilinmektedir.

Kalıcı kayma direnci açısı değerinin, likit limit değerinin %50'den büyük olduğu zeminler için, A hattı ile alakalı olarak Casagrande kartındaki yerine çok bağlı olduğunu Wesley (2003) belirtmiştir. Ayrıca Wesley (2003), kalıcı kayma direnci

açısının A hattının üstündeki ve altındaki mesafeye yani ΔPI 'ya karşı değişimini incelemiştir. ΔPI 'daki ve likit limitteki meydana gelen artışların kalıcı kayma direncini düşürdüğü Wesley (2003) tarafından gözlemlenmiştir. Bu ilişki Şekil 3.21'de gösterilmiş ve formül olarak (3.5)'de ve (3.6)'da belirtilmiştir.



Şekil 3.21: Kalıcı kayma direnci açısının ΔPI ile değişimi (Wesley, 2003)

$$\Delta PI = I_p - 0.73 \times (w_L - 20) \quad (3.5)$$

$$\phi_r = 322.04 \times (w_L \pm \Delta PI)^{-0.782} \quad (3.6)$$

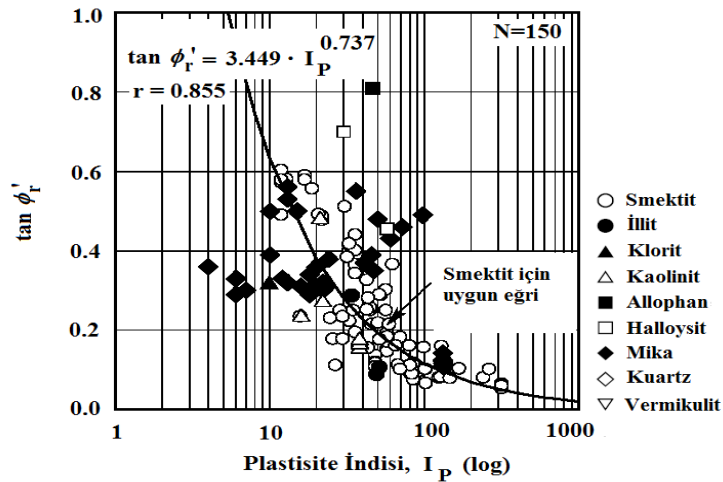
Şekil 3.21'de görüldüğü üzere A hattının çok altında kalan zeminlerin kalıcı kayma direnci açısı değeri düşük, çok üstünde kalanların ise kalıcı kayma direnci açısı değeri yüksek olması beklenmektedir. Ayrıca, Şekil 3.21'de silt ve kil gibi kavramlar, silt veya kil özelliği gösteren zeminler için kullanılmış, dane boyutuna göre kullanılmamıştır.

Suzuki ve diğ. (2005) farklı çalışmalarda kullanılan zemin numunelerinin endeks özellikleri ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişkileri çeşitli istatistiksel yöntemler kullanarak incelemiştir. Çizelge 3.5'de Suzuki ve diğ. (2005)'nin bu çalışmalarda kullanmış oldukları zemin numunelerinin içerdikleri kil mineralleri, veri sayıları ve sembolleri verilmiştir.

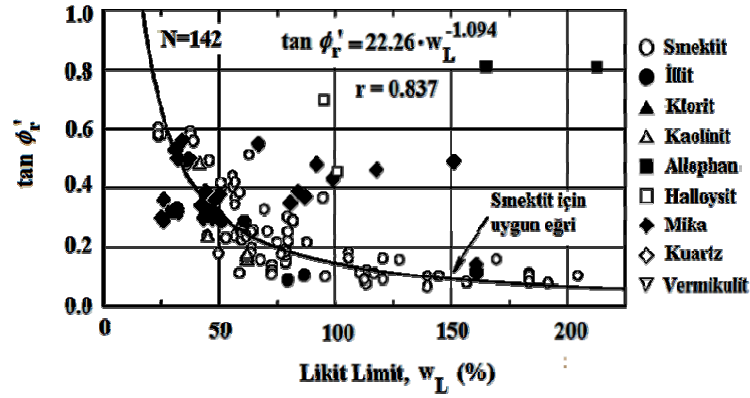
Çizelge 3.5: Bazı kil mineralleri ve data sayıları (Suzuki ve diğ., 2005)

Kil Mineralleri	Veri Sayısı	Sembol
Smektit	323	○
İllit	3	●
Klorit	1	▲
Kaolinit	9	△
Allophan	2	□
Halloysit	2	■
Mika	37	◆
Kuartz	1	◇
Vermikulit	1	▽

Çizelge 3.6’da görülen mika, halloysit ve allophan içeren zemin numuneleri üzerinde Suzuki ve diğ. (2005)’nin yaptıkları çalışmalar sonucu belirli bir bağıntı elde edilememiştir. Yapılan analizler ile smektit içeren kil numunelerinde ise kalıcı kayma direnci ile endeks özellikleri ve kil yüzdesi ile yüksek korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı bulunmuştur. Bu çalışmalar göz önünde bulundurularak zemin numunelerinin kalıcı kayma direnci ile plastisite indisleri arasındaki ilişki Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Kalıcı kayma direnci ile likit limit arasındaki ilişki Şekil 3.23’de, plastik limit/likit limit oranı ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki ise Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22: Kalıcı direnç ile plastisite indisi arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)

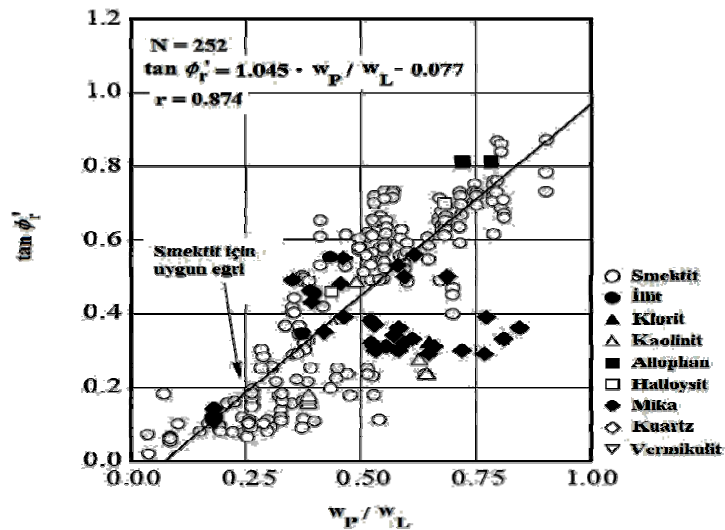


Şekil 3.23: Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)

Şekillerde görülmekte olan “N” ifadesi kullanılan veri sayılarını, “ I_p ” plastisite indisini, “ ϕ_r ” kalıcı kayma direnci açısını, “ w_L ” likit limiti, “ w_p/w_L ” plastik limit ile likit limit arasındaki oranı, “r” ise korelasyon katsayısını göstermektedir.

Suzuki (2005)’in yapmış olduğu çalışmada farklı kil mineralleri üzerinde gerçekleşen deneyleri göz önüne almış ve plastisite indisiyle kalıcı kayma direnci arasında bir ilişki belirlemiştir, %86 korelasyon katsayısına sahip olan ilişkinin bağıntısı (3.7)’de verilmiştir.

Suzuki (2005)’in kalıcı kayma direnci ile likit limit arasında yapmış olduğu inceleme sonucunda %84 korelasyon katsayısına sahip bir ilişki belirlemiştir. Bu ilişkinin denklem olarak ifadesi (3.8)’de verilmektedir. Suzuki (2005), gerçekleştirilmiş olan 252 adet deneyi göz önünde bulundurarak Şekil 3.24’de görülmekte olan kalıcı kayma direnci açıları ile plastik limit/likit limit oranı arasındaki ilişkiyi belirlemiştir.



Şekil 3.24: Kalıcı direnç ile w_p/w_L oranı arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)

İçerisinde yoğun miktarda smektit kil minerali içeren zemin numunelerinin kalıcı kayma direnci ile plastisite indisleri, w_p/w_L oranları ve likit limitleri arasında bağıntılar elde etmişlerdir. Suzuki ve diğ. (2005), yaptıkları çalışma sonucu plastik limit/likit limit oranı ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişkinin en yüksek korelasyon katsayısına ($r=0.874$) sahip olduğunu bulmuşlardır. Bağntı (3.9)'da verilmektedir.

$$\tan\phi_r = 3.449 \times I_p^{-0.73} \quad (3.7)$$

$$\tan\phi_r = 22.26 \times w_L^{-1.094} \quad (3.8)$$

$$\tan\phi_r = 1.045 \times \left(\frac{w_p}{w_L}\right)^{-0.77} \quad (3.9)$$

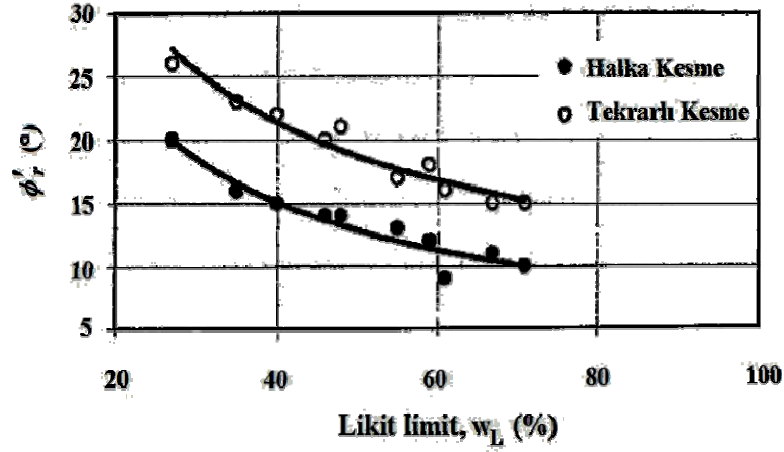
İyisan ve diğ. (2006) farklı geoteknik özelliklere sahip numuneler üzerinde üç farklı normal gerilme altında halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yaparak, kalıcı kayma direnci açısının likit limit ve plastisite indisi ile değişimini incelemişlerdir. Likit limitleri %27 ve %70 arasında olan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kalıcı kayma direnci açısı (ϕ_r) ile likit limit (w_L) arasında $R^2=0.93$ korelasyon katsayısına sahip bir denklem elde edilmiştir.

$$\phi_r = 201 \times w_L^{-0.605} \quad (3.10)$$

Yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasında regresyon analizi sonucunda $R^2=0.87$ korelasyon katsayısına sahip olan bir bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 213 \times w_L^{-0.718} \quad (3.11)$$

Yılmaz (2006)'ın gerçekleştirdikleri tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri sonucu elde edilen bağıntılarda likit limit değerinin artması ile kalıcı kayma direnci açısının azaldığı, fakat bu deney yöntemleri ile elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 3.25'de iki farklı deney yöntemi için kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki görülmektedir.



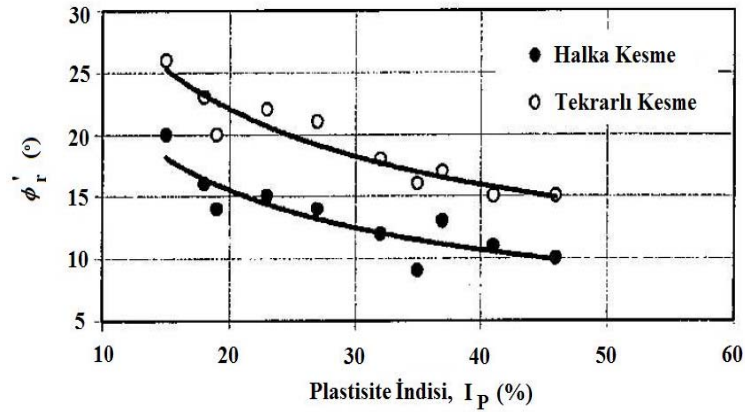
Şekil 3. 25: Halka kesme ve tekrarlı kesme deneylerine göre Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit ilişkisi (Yılmaz, 2006)

Şekil 3.25’de belirtilen kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki için iki ayrı denklem elde edilmiştir. Halka kesme deneyi ile elde edilen bağıntı (3.12)’de, kesme kutusu deneyinden elde edilen denklem ise (3.13)’de verilmiştir. Halka kesme deneyi bağıntısının korelasyon katsayısı %87 iken tekrarlı kesme kutusu deneyi bağıntısı korelasyon katsayısı ise %93’dür.

$$\phi_r = 213 \times w_L^{-0.718} \quad (3.12)$$

$$\phi_r = 20 \times w_L^{-0.6} \quad (3.13)$$

Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri ile elde edilen kalıcı kayma direnci açılarının plastisite indisi ile değişimi Şekil 3.26’da verilmiştir. Kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi, kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki değişime benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 3.26: Kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisi ilişkisi (Yılmaz, 2006)

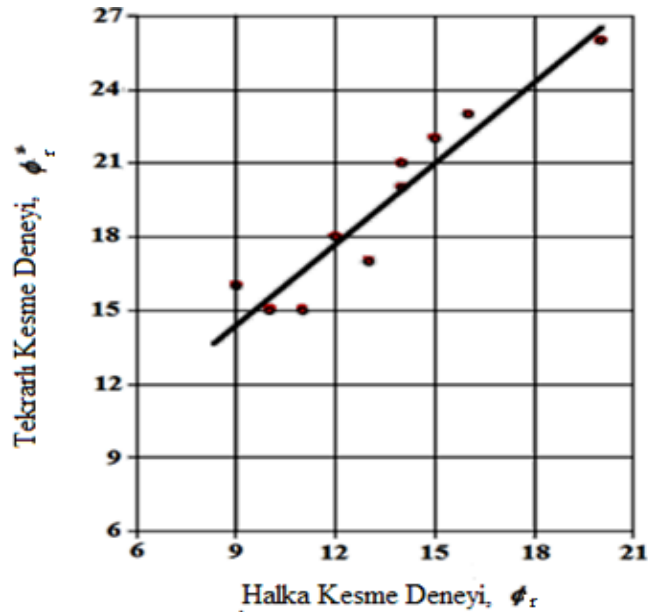
İyisan ve diğ. (2006) ayrıca plastisite indisleri %15 ve %46 arasında değişmekte olan zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri ile kalıcı kayma direnci açıları elde etmiş, kalıcı kayma direnci açıları ve plastisite indisleri kullanarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda halka kesme deneyi için %78 korelasyon katsayısına sahip olan bağıntı (3.14) ve tekrarlı kesme kutusu için ise %90 korelasyon katsayısına sahip olan bağıntı (3.15) belirlenmiştir.

$$\phi_r = 78 \times I_p^{-0.539} \quad (3.14)$$

$$\phi_r = 90 \times I_p^{-0.471} \quad (3.15)$$

Bu bağıntılardan ve korelasyon katsayılarından görüldüğü üzere tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma direnci ile likit limit arasındaki ilişkinin korelasyon katsayıları, halka kesme deneyi ile elde edilen korelasyon katsayılarından daha büyüktür. Böylece bu çalışma sonucunda tekrarlı kesme kutusu deneyinin daha doğru sonuç verdiği görülmektedir.

İyisan ve diğ. (2006)'nin gerçekleştirdikleri bu çalışmada aynı zamanda tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile belirlenen kalıcı kayma direnci açısının (ϕ_r^*) halka kesme deneyleri ile elde edilen kalıcı kayma direnci açısı (ϕ_r) ile değişimi incelenmiştir ve bu değişim Şekil 3.27'de verilmiştir.

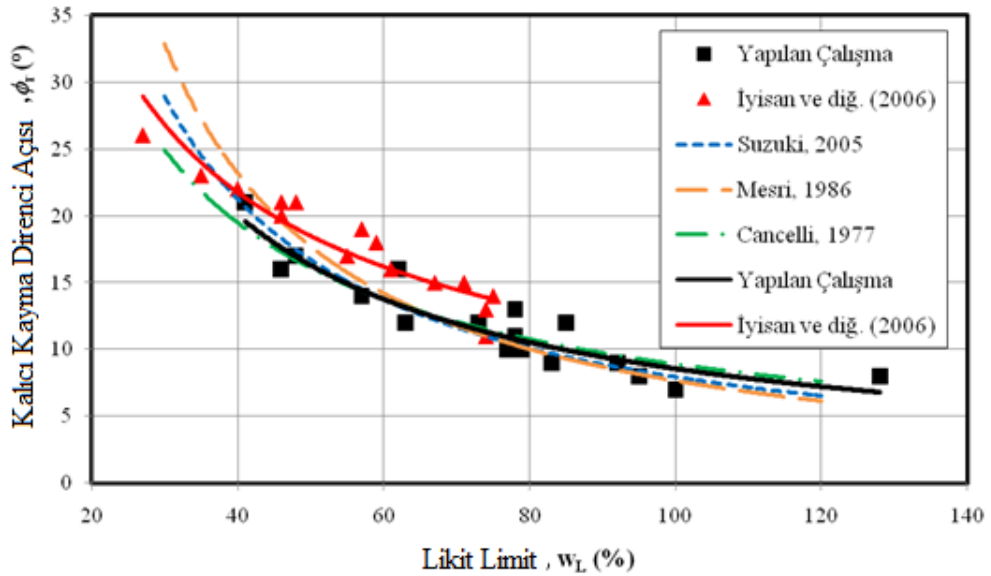


Şekil 3.27: Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (İyisan ve diğ., 2006)

Şekil 3.27’de tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direncinin artması ile halka kesme deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma direncinin de arttığı görülmüştür. Elde edilen bu ilişki lineer bir ilişkidir ve denklem olarak ifadesi (3.16)’da verilmiştir. Korelasyon katsayısı ise yaklaşık olarak %90’dır.

$$\phi_r^* = 1.2\phi_r + 3 \quad (3.16)$$

Ürkmez (2009) farklı likit limit ve kil yüzdelere sahip numuneler üzerinde üç değişik normal gerilme altında tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları ile likit limit arasındaki ilişkiler Suzuki (2005), Mesri (1986) ve Cancelli (1977)’nin yaptıkları çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca İyisan ve diğ. (2006)’ın yaptığı çalışmaların sonuçlarıyla da karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.28’de Ürkmez (2009)’in yaptığı çalışma ile geçmişte yapılmış çalışmaların karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 3.28: Kalıcı kayma direnci ile likit limit arasındaki ilişkinin yapılan çalışmalarda karşılaştırılması (Ürkmez, 2009)

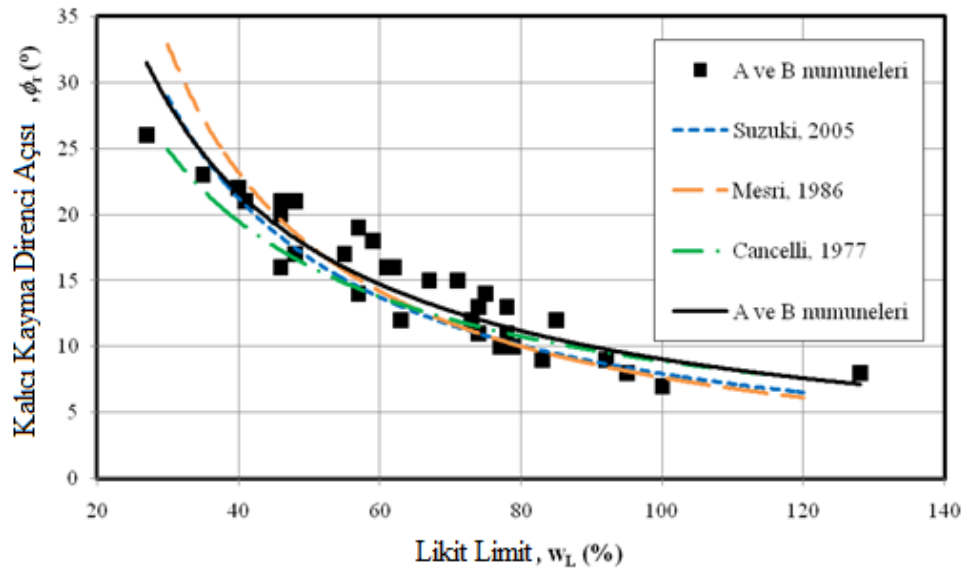
Şekil 3.28’den görüldüğü gibi Ürkmez (2009)’in yaptıkları çalışma sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları, numune hazırlama yöntemleri ve deney yöntemleri farklı olmasına rağmen, Suzuki (2005), Mesri (1986) ve Cancelli (1977) tarafından önerilen değerle benzerlik göstermektedir. İyisan ve diğ. (2006)’nin yaptıkları tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları elde edilen kalıcı kayma direnci açısı Ürkmez (2009)’nin yaptıkları çalışmanın üzerinde yer almaktadır. Bunun nedeni, numune hazırlama yönteminin farklı olması olarak açıklanmaktadır. İyisan

ve diğ. (2006)'nin B numuneleri üzerinde yapmış oldukları tekrarlı kesme kutusu çalışmaları ile Ürkmez (2009)'in A numuneleri üzerinde yaptıkları tekrarlı kesme kutusu çalışmaları birleştirilmiş ve Şekil 3.29'daki grafik elde edilmiştir.

Ürkmez (2009)'in Şekil 3.29'da A ve B olarak isimlendirdikleri numuneler üzerinde yaptıkları tekrarlı kesme kutusu deney sonucu, kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasında (3.17) nolu bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 723.97(w_L)^{-0.95} \quad (3.17)$$

Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki %85 korelasyon katsayısına sahiptir.



Şekil 3.29: A ve B numunelerinin birleştirilerek geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması (Ürkmez, 2009)

Ayrıca Ürkmez (2009)'in yaptığı çalışmada, zemin numunelerinin kalıcı kayma direnci açılarıyla plastisite indisi, pik kayma direnci açıları arasında bir bağıntı belirlemişlerdir. Bu ilişkilerin denklem olarak ifadeleri (3.18)'de görülmektedir.

$$\phi_r = 1.25 \times I_p^{-0.59} \times \phi_p^{0.63} \quad (3.18)$$

Gerçekleştirilen incelemeler sonucunda kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit, arasında oldukça yüksek korelasyon katsayılarına sahip olan bir ilişki elde edilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için yapılmış olan çalışmalarda tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deney yöntemleri tercih edilmiştir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için kullanılabilinecek bir diğer yöntemdir. Bu çalışmada zeminlerin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için numuneler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Ayrıca çalışma da farklı deney yöntemlerin kalıcı kayma direncine etkisini araştırmak için seçilen numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyide yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısının zeminlerin likit limit (w_L), plastik limit (w_P) ve plastisite indisi (I_p) gibi endeks özellikleri ile değişimi incelenmiştir.

Deneylerde kullanılan numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek için laboratuvarında gerekli deneyler yapılmıştır. Numunelerin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek amacıyla farklı zemin numuneleri üzerinde, farklı normal gerilmeler altında, 0.035 mm/dak deformasyon hızı ile konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde, iki farklı hücre basıncı altında kesilen iki numune bir seti oluşturmuştur. Tekrarlı kesme kutusu deneyinde ise üç farklı normal gerilme altında kesilen üç numune bir seti oluşturmaktadır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri her normal gerilme altında 5 çevrim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri hazırlanırken gerekli numune sayısı deneylerden birinin tekrarlanma ihtimali göz önünde bulundurularak bir adet fazla hazırlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları ile, zeminlerin geoteknik özellikleri ile olan ilişkileri incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda kalıcı kayma direnci açısının zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olarak kolayca tahmin edilebilmesi amacıyla korelasyonlar geliştirilmiştir. Ayrıca iki farklı deney yöntemi ile belirlenen kalıcı kayma direnci açıları karşılaştırılmıştır. Son olarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

4.1 Kullanılan Numunelerinin Geoteknik Özellikleri

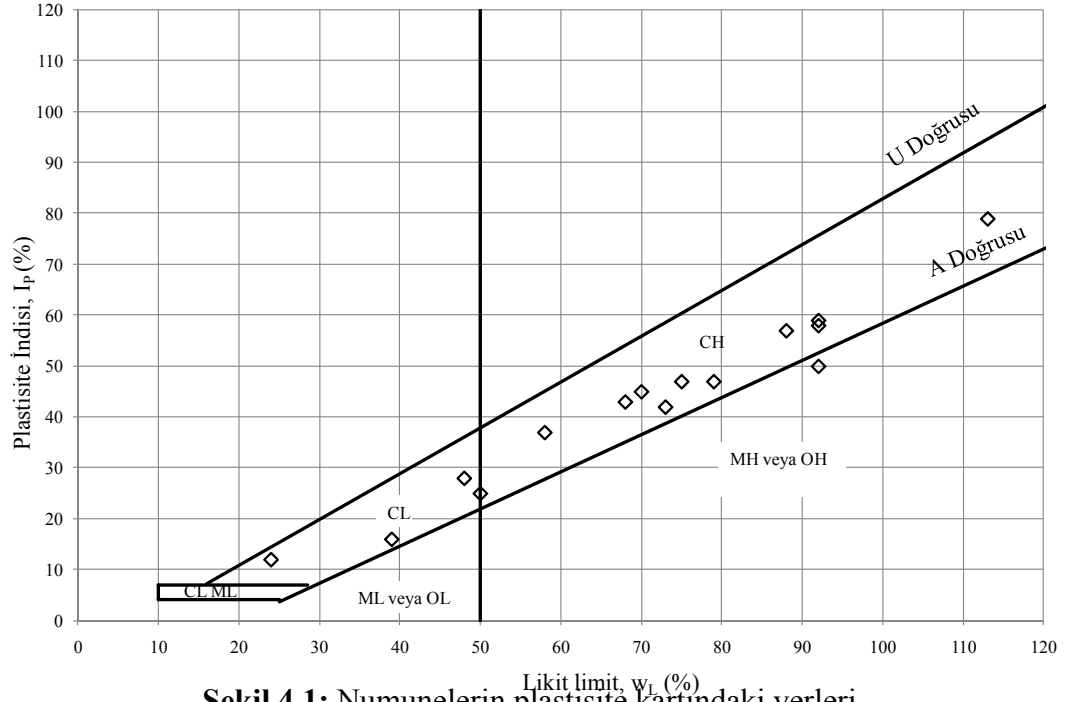
Deneysel çalışmada kullanılan numuneler İstanbul Teknik Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan örselenmiş numunelerdir. Numunelerin dane çapı dağılımını, ince dane oranını ve kil yüzdeleri belirlemek için ıslak elek ve hidrometre analizleri, kıvam limitlerini belirlemek için Casagrande ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Ayrıca özgül ağırlığı belirlemek için piknometre deneyi de yapılmıştır.

Onbeş adet numune üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen, likit limit (w_L), plastik limit (w_p), plastisite indis (I_p), özgül birim hacim ağırlık (G_s), ince dane oranı (İDO) ve kil yüzde (KY) değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde ve tekrarlı kesme kutusu deneyinde kullanılan numuneler AYS numuneleri olarak isimlendirilmiştir. Yapılan kıvam limit deney sonuçlarına göre numunelerin likit limitlerinin %24 ile %113 arasında, plastik limitlerinin %12 ile %42 arasında, plastisite indislerinin ise %12 ile %79 arasında değiştiği belirlenmiştir. Numunelerin ince dane oranları %100 ile %75 arasında kil yüzdeleri ise %69 ile %6 arasında değişmektedir. Yapılan piknometre deneyi sonucu numunelerin özgül ağırlıkları 2.45 ile 2.76 arasında değiştiği bulunmuştur. Çalışmada kullanılacak numuneler seçilirken likit limitlerinin ve plastisite indislerinin geniş bir aralıkta değişmesine dikkat edilmiştir.

Yapılan sınıflandırma deneyleri sonucu, numuneler Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırılmış, üç tanesinin düşük plastisiteli kil (CL), bir numunenin yüksek plastisiteli organik kil (OH), bir numunenin orta plastisiteli kil (CL-CH) ve on numunenin ise yüksek plastisiteli kil (CH) olduğu belirlenmiştir. Numunelerin plastisite kartındaki yerleri Şekil 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1: Deney numunelerinin geoteknik özellikleri

Numune Adı	w _L (%)	w _P (%)	I _p (%)	İ.D.O (%)	Kil Yüzdesi (%)	G _s	Zemin Sınıfı
AYS-1	92	42	50	100	69	2.73	OH
AYS-2	39	23	16	78	7	2.71	CL
AYS-3	48	20	28	88	27	2.76	CL
AYS-4	68	25	43	98	32	2.74	CH
AYS-5	79	32	47	99	48	2.71	CH
AYS-6	50	25	25	97	30	2.71	CH-CL
AYS-7	75	28	47	100	20	2.71	CH
AYS-8	92	33	59	97	50	2.76	CH
AYS-9	70	25	45	97	34	2.72	CH
AYS-10	73	31	42	98	26	2.75	CH
AYS-11	113	34	79	100	26	2.75	CH
AYS-12	58	21	37	76	32	2.73	CH
AYS-13	24	12	12	75	6	2.45	CL
AYS-14	92	34	58	100	31	2.74	CH
AYS-15	88	31	57	98	39	2.72	CH



Şekil 4.1: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri

Numunelerin plastisite kartındaki yerlerinden görüldüğü gibi deneysel çalışmada kullanılan numunelerden üç tanesi düşük plastisiteli kil, bir tanesi orta plastisiteli kil, diğerleri ise yüksek plastisiteli kildir.

Bu çalışma kapsamında kalıcı kayma direnci parametrelerinin başta likit limit ve plastik limit olmak üzere zeminlerin geoteknik özellikleri ile değişiminin incelenmesi amaçlandığından, numunelerin likit limitlerinin geniş bir aralıkta değişmesi amaçlanmış ve bu amaca yönelik olarak numuneler seçilmiştir.

4.2 Numune Hazırlama Yöntemi

Çalışma için gerekli olan numuneler, deneylerin sürekliliği ve aynı özellikte numunelere duyulan ihtiyaçtan dolayı ve numune hazırlamaya belirli bir standart getirmek için Standart Proktor Sıkılığında hazırlanmıştır. Etüvde kurutulan numuneler, ASTM 40 nolu elekten elenmiş ve elek altında kalan zemin optimum su muhtevasında hazırlanarak 15.2 cm çapında, 11.6 cm yüksekliğindeki proktor kalıbında standart proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneden, 10 cm yüksekliğindeki ve 5 cm çapındaki kalıplar yardımı ile konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve 36 cm² enkesit alanına sahip ve 2cm yüksekliğindeki kesme kutusu ringi ile tekrarlı kesme kutusu deneyleri için numuneler alınmıştır. Konsolidasyonlu-drenajlı deneyleri için gerekli numune sayısı iki dir. Fakat

deneylerden birinin tekrarlanma ya da numunelerin deney için hazırlanması sırasında zarar görmesi ihtimali düşünülerek bir set için numune sayısı üç olarak tutulmuştur. Tekrarlı kesme kutusu deneyi için ise üç numuneden oluşmaktadır, bu deneyde de deneylerden birinin tekrarlanabilme ihtimali düşünülerek bir adeti yedek olmak üzere her set için dört adet uygun boyutlarda numune hazırlanmıştır. Şekil 4.2’de proktor kalıbı, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyi için gerekli boyutlarda numune almaya yarayan kalıplar görülmektedir. Hazırlanan numuneler, su muhtevalarında bir değişiklik olmaması için desikatör içinde nem odasında muhafaza edilmiştir.



Şekil 4.2: Proktor kalıbı, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi için numune kalıpları

Kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde numuneler %25 deformasyona kadar kesilmiştir. 15 farklı numune içinden seçilen 6 farklı numune üzerinde ise kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek ve kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemede kullanılan deneysel yöntemleri karşılaştırmak için tekrarlı kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

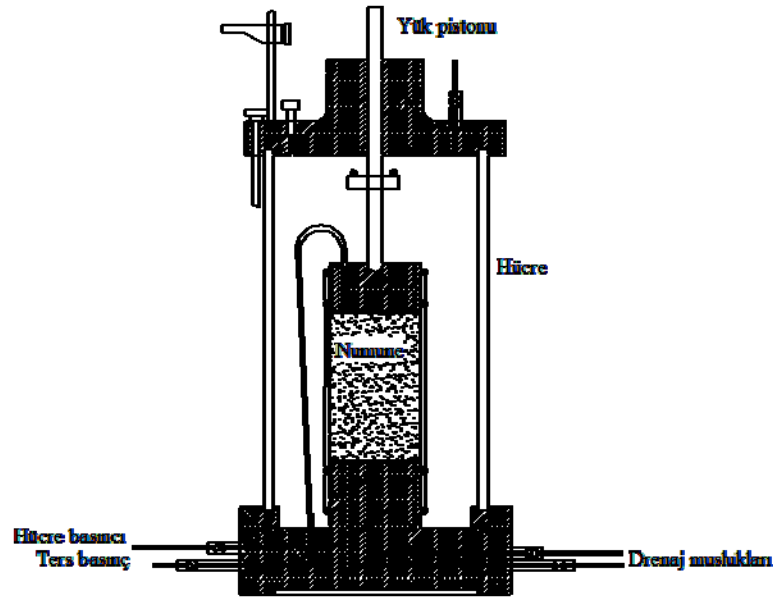
4.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Sistemi

Bu çalışmada kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için kullanılan deney yöntemlerinden biri konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemidir. Konsolidasyonlu-drenajlı deney ile kalıcı kayma direncinin belirlenmesi için gerekli olan sistemde bulunması gereken temel parçalar üç eksenli yükleme kolu, üç eksenli hücre, alt başlık ve üst başlık, yük ölçüm saati, deformasyon ölçüm saati, basınç hücreleri, boşluk suyu basıncı ölçüm sistemi, kauçuk membran, O ring membran, filtre kâğıdı ve poroz taşıdır. Üç eksenli konsolidasyonlu-drenajlı deney için gerekli sistemin genel görünüşü Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3: Üç eksenli basınç deney sistemi

Numunenin monte edildiği basınç tanklarına hücre denilmektedir. Farklı efektif gerilme deneyleri için farklı türden hücreler kullanılmaktadır. Hücresinin taban plakasına numune çapına uygun başlık vidalanır. Bu başlıkta bulunan drenaj kanalları yardımı ile konsolidasyon sırasında numune içindeki suyun dışarı çıkması sağlanır. Taban içerisinden geçen ikinci bir drenaj kanalı hücre basıncını sağlayan sıvının hücreye dolmasını sağlar. Şekil 4.4’de üç eksenli deney hücresinin şematik kesiti görülmektedir.



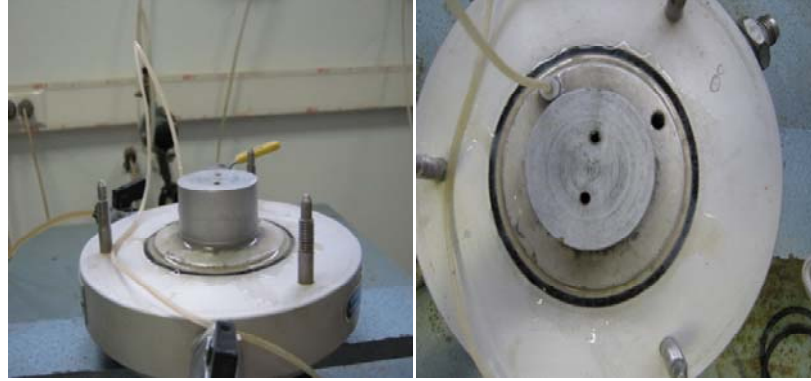
Şekil 4.4: Üç eksenli deney hücresi şematik kesiti

Üç eksenli hücreye, numuneye etkiyen çevre basıncı laboratuvar basınç sisteminden alınan basınçlı hava ile basınç hücresinden sağlanmaktadır. Numunenin hücre basıncı tesisi ile istenilen çevre basıncında konsolide olması sağlanmaktadır. Şekil 4.5’de çevre basıncı ve ters basınç hücreleri görülmektedir.



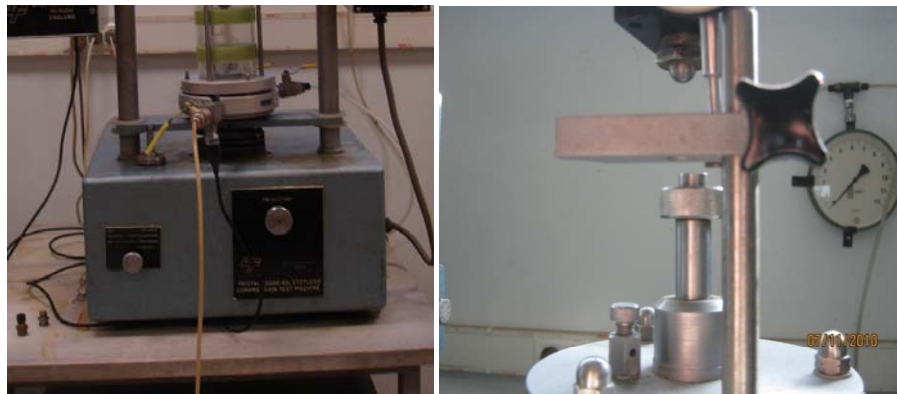
Şekil 4.5: Üç eksenli basınç deneyi ters basınç ve çevre basıncı hücresi

Standart üç eksenli hücre alt başlık, üst başlık, hücre gövdesi, çelik çubuklar ve yükleme pistonundan oluşmaktadır. Alt başlık ve üst başlık korozyona dayanıklı metalden ya da sert plastik materyalden olmalıdır. Alt başlıkta basınç ve drenaj bağlantıları için 3 drenaj kanalı girişi bulunmaktadır. Boşluk suyu basıncı genellikle numunenin tabanından ölçülmektedir, ayrıca numunenin tabanından drenajda gözlemlenebilir. Şekil 4.6’da üç eksenli hücreye ait alt başlık ve drenaj kanalları görülmektedir.



Şekil 4.6: Alt başlık ve drenaj kanalları

Hücrenin üst başlığında bulunan ve hücrenin içine giren eksenel yükleme kolu ile düşey bir yük (P) numuneye istenilen hızda uygulanır. İstanbul Teknik Üniversitesi üç eksenli basınç deney aletinde düşey yük, numuneyi sabit bir oranda deforme eden motorlu kriko ile uygulanır (sabit oranlı birim deformasyon deneyi olarak adlandırılır). Düşey yükün şiddetini ölçmek için yükleme çubuğunun üstüne eksenel yükü ölçmeye yarayan ring yerleştirilerek sistem sabitlenir. Yükleme basıncı ile tüm numuneler %25 eksenel deformasyona kadar 0,035 mm/dak’lık hızda yüklenmişlerdir. Şekil 4.7’de üç eksenli hücreye ait eksenel yükleme kolu ve deney aletine ait motorlu kriko görülmektedir.



Şekil 4.7: Üç eksenli hücreye ait eksenel yükleme kolu

Konsolidasyonlu-drenajlı deneylerde kesme işlemine başlamak için gerekli olan doyumluk değerine ulaşma süresi numuneye ters basınç uygulanarak kısaltılır. Ters basınç uygulanması ile drenaj hattındaki ve bağlantı noktalarındaki havanın da çözülmesi sağlanır.

4.3.1 Üç eksenli deney numunelerinin hazırlanması ve deney

Üç eksenli alette deneyler, 50 mm çaplı 100 mm yüksekliğindeki ve standart proktor sıkılığında hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Aynı zamanda ve aynı şartlarda hazırlanan 3 adet numune, yaklaşık aynı su muhtevalarında olup bir grubu oluşturmuştur (AASHTO T-234). Hazırlanan fazladan numuneler, su muhtevalarında bir değişiklik olmaması için desikatör içinde nem odasında korunmuştur.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneylerde kayma direnci parametrelerini elde etmek için farklı hücre basınçları altında iki numune üzerinde deney yapılmıştır ve bu deneyler sonucu elde edilen verilerle Mohr daireleri çizilip Mohr Coulomb kırılma hipotezine göre kalıcı kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. 50 mm çaplı 100 mm boyundaki silindir numuneler ile yapılan deneylerde önce belirli bir çevre basıncı altında numunenin konsolidasyonunu tamamlanması sağlanır. Daha sonra B kontrolü yapılmaktadır, konsolidasyonunu tamamlamış doyumluk kazanmış numuneye istenen sabit çevre basıncında eksenel yük uygulanarak kesme işlemi gerçekleştirilir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri uzun süren deney olduğundan ekipmanlar deney öncesi kontrol edilmelidir. Bağlantı yerlerinde çok az bir sızma meydana gelmesi gibi küçük bir hata dahi deney sonuçlarını geçersiz kılmaktadır. Özellikle boşluk suyu basıncı sisteminin dikkatli bir şekilde kalibre edilmesi gerekir. Deney, drenajlı deney olduğu için boşluk suyu basıncı ölçümleri ne kadar doğru alınırse deney sonuçları o kadar güvenilirlerdir. Deney başlatılmadan önce boşluk suyu basıncı sistemi dikkatli bir şekilde kontrol edilmiştir.

Hücre alt başlığından numune üst kısmına esnek bir şekilde bağlanan ters basınç hattında hava ve suyun akışına engel olacak herhangi bir şey olmamalı, bu kontrol sadece numunenin kurulmasında değil, deney başlangıcında da yapılmalıdır. Başlangıçta numune doyum değilse uygulanan basınç altında suda çözülen hava ters basınç sistemi içinde drene olur.

Deney ekipmanlarının kontrolü yapıldıktan sonra Şekil 4.8’de görüldüğü gibi numune deney hücresine yerleştirilir. Hazırlanan üç eksenli deney numuneleri tartıldıktan sonra drenajı hızlandırmak için ince filtre kâğıtları ile sarılmıştır. Numunenin alt kısmından su çıkışına izin vermek için başlık üzerine, damıtık suda bekletilmiş, en az 10 dakika kaynatılarak havası alınmış poroz taş yerleştirilir, poroz taş yerleştirilirken arada hava kalmasına meydan vermeyecek şekilde alt başlığa konulmalı, üzerine su ile sürüklenen zemin daneciklerinin poroz taşa bulunan gözenekleri kapatmasını önlemek için aynı çapta kesilmiş filtre kâğıdı konulur. Poroz taş ve filtre kâğıdının üzerine, hücre içinde numunelerin sudan etkilenmesini önlemek için membran içine alınan numune yerleştirilir. Membran numunenin üzerine bir membran geçirici kılıf yardımı ile sarılmıştır. Numunenin üst kısmına da filtre kâğıdı ve poroz taş yerleştirilir ve üst başlık konulur. Numune O ringlerle alt ve üst başlıklara sabitlenir.



Şekil 4.8: Üç eksenli deney numunesinin hazırlanması

Son olarak numune hücresi yerine yerleştirilmiş ve tabana vidalanmış, yükleme kolu numune hücresi üst başlığına yerleştirilmiştir. Gerekli hücre basıncının sağlanması için hücre su ile doldurulmuş, sonra numuneye ters basınçta uygulanmıştır. Hücre basıncı ile ters basınç arasındaki fark konsolidasyon basıncını vermektedir. Örneğin

numuneye uygulanan hücre basıncı $\sigma_3=600$ kPa ve ters basınç $\sigma_t=200$ kPa ise $\sigma_{c0}=\sigma_3-\sigma_t=400$ kPa'dır. Numune drenaj vanaları açık durumda iken belirlenen konsolidasyon basıncı altında AKO=2 olacak şekilde konsolidasyona bırakılmıştır. AKO bağıntı (4.1) ile hesaplanır

$$AKO = \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_c} \quad (4.1)$$

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. Bir numunenin konsolide olması 3-5 gün arasında değişmiştir. Konsolidasyonun tamamlandığına karar verildikten sonra AKO=2 olduğu için hücre basıncı sabit tutularak ters basınç arttırılmıştır.

Numune, kesme işlemine başlanılmadan önce konsolidasyonunu tamamlamış ve suya doymun hale gelmiş olmalıdır. Drenajlar kapalı iken çevre basıncında yapılan artıma karşılık boşluk suyu basıncında da eşdeğer artım gözlemlenmelidir. Kısaca;

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = \frac{u_1 - u_0}{\Delta \sigma_3} \quad (4.2)$$

eşitliğinden yararlanarak Skempton'nun B parametresi hesaplanmıştır. Burada $\Delta \sigma_3$ çevre basıncındaki artım, Δu ise boşluk suyu basıncındaki artımdır. B değeri minimum 0.95 olmalıdır. Numunelerin doymun hale gelmesi 3 gün ve 1 hafta arasında değişmiştir. B parametresinin hesaplanması için çevre basıncı ne kadar artırıldı ise, hücre basıncının aynı kalabilmesi için ters basınç da aynı değerde yükseltilmiştir. Drenajlar açılarak tekrar boşluk suyu basıncının sönümlenmesi beklenir. Bu süre yaklaşık 20-30 dakika kadar tutulmuştur.

Konsolidasyonunu tamamlamış ve doymunluk kazanmış numune 0.035 mm/dak. kesme hızı ile kesilmeye başlanmıştır. Belirtilen bu hızda yapılan CD deneylerinde kaydedilen boşluk suyu basıncı ölçümleri ile numunede ilave boşluk suyu basıncının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Kesme işlemine numunede %25 deformasyon meydana gelene kadar devam edilmiştir ve bir numuneyi kesme işlemi 2 gün sürmüştür. Üç eksenli basınç deneyinde numuneye uygulanabilir şekil değiştirme sınırlıdır. Bu nedenle yapılan deneylerde numune daha fazla deforme edilememiştir. Kesme işlemi sırasında kuvvet halkasından ve boşluk suyu basıncı transdüserinden belirli düşey

deplasman aralıklarında okumalar alınmıştır. Şekil 4.9'da üç eksenli deney ile kesilmiş bir numune görülmektedir.



Şekil 4.9: Üç eksenli deney hücresinde kesilmiş numune

Bir numuneyi konsolide etme, doygunluk kazandırma ve kesme işlemi yaklaşık 10 gün sürmüştür. Bir setin iki numuneden oluştuğu düşünülürse bir numunenin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için gerekli üç eksenli deney süresi 20 gündür.

Kesme işlemi tamamlandıktan sonra çevre ve ters basınç vanaları ile basınçlar sıfırlanmış, bu sırada numunenin içine su girmemesi için drenaj vanası kapatılmıştır. Numune hücresinin içindeki su vakum ile boşaltılmış ve numune hücreden çıkartılmış, deney sonu su muhtevası belirlenmiştir.

4.3.2 Hesaplamalar

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneyde, belirli bir düşey deformasyona karşılık, yük saatinden düşey yük değerleri (P) ve boşluk suyu basıncı transdüserinden boşluk suyu basıncı değerleri okunmuştur (u). Düşey yük ve deformasyon saatleri 1/100 duyarlılığındadır. Çizelge 4.2'de 150 kPa çevre basıncı altında AYS-2 numunesine ait üç eksenli deney sırasında %4 düşey deformasyona kadar alınan okumalar verilmektedir. Düşey yük saatinden okunan değer ring çarpanı ile çarpılıp kg cinsinden düşey yük elde edilir, boşluk suyu basıncı transdüserinden alınan okuma ise boşluk suyu basıncı çarpanı ile çarpılıp kg/cm^2 cinsinden boşluk suyu basıncı elde edilir. Fakat çizelgede verilen birimler KN ve kPa cinsindedir.

Çizelge 4.2: AYS-2 numunesine ait 200 kPa çevre basıncı altında deney sırasında alınan okumalar

CD DENEYİ AYS-2 NUMUNESİ							
<u>Başlangıç</u>							
H : 100mm							
D : 50 mm							
W: 407.3 gr							
γ_n : 20.74 KN/m ³							
Toplam Çevre B.:	550 kPa	<u>DENEY BAŞI</u>				<u>DENEY SONU</u>	
Ters Basınç :	400 kPa	YN+D=464.1gr				YN+D= 472.7 g	
Mutlak Çevre B.:	150 kPa	KN+D=393gr				KN+D= 401.2 g	
$A_o = 19.63 \text{ cm}^2$		Dara= 70gr				Dara= 67.6 g	
$V_o = 196.35 \text{ cm}^3$		$w_i = \%22$				$w_s = \%22.1$	
Depl. Sa.:0.01		Yük Fak.:0.1366 kg/div		Trans ç. : 0.533			
DüşeyDeplasman		DüşeyYük		Boşluk Suyu		ϵ (%)	$\Delta\sigma$
Okuma	mm	Okuma	kN	Okuma	kPa	%	kPa
0	0.00	0	0.000	1.502	0.000	0.00	0.00
5	0.05	15	0.020	1.501	-0.053	0.05	10.43
10	0.10	26	0.036	1.501	-0.053	0.10	18.07
15	0.15	34	0.046	1.501	-0.053	0.15	23.62
20	0.20	42	0.057	1.500	-0.107	0.20	29.16
25	0.25	71	0.097	1.500	-0.107	0.25	49.27
30	0.30	121	0.165	1.501	-0.053	0.30	83.93
40	0.40	176	0.240	1.503	0.053	0.40	121.95
50	0.50	210	0.287	1.502	0.000	0.50	145.37
75	0.75	258	0.352	1.501	-0.053	0.75	178.14
100	1.00	289	0.395	1.500	-0.107	1.00	199.05
125	1.25	316	0.432	1.500	-0.107	1.25	217.09
150	1.50	341	0.466	1.500	-0.107	1.50	233.67
175	1.75	365	0.499	1.502	0.000	1.75	249.49
200	2.00	386	0.527	1.501	-0.053	2.00	263.17
224	2.24	407	0.556	1.500	-0.107	2.24	276.81
262	2.62	437	0.597	1.499	-0.160	2.62	296.05
275	2.75	455	0.622	1.502	0.000	2.75	307.84
335	3.35	487	0.665	1.501	-0.053	3.35	327.46
355	3.55	496	0.678	1.500	-0.107	3.55	332.82
376	3.76	508	0.694	1.500	-0.107	3.76	340.13
400	4.00	527	0.720	1.499	-0.160	4.00	351.97

Ölçülen düşey yük düzeltilmiş numune alanına bölünerek deviatör gerilmeler elde edilir. Aşağıdaki denklemlerde deviatör gerilme ve düzeltilmiş alan formülü verilmektedir.

$$\Delta\sigma = \frac{P}{A_i}, \quad A_i = A_0 \frac{(1 - \frac{\Delta V}{V_0})}{(1 - \frac{\varepsilon}{100})} \quad (4.3)$$

Burada $\Delta\sigma$ deviatör gerilme değeri, P ilgili düşey deplasmana denk gelen düşey kuvvet, A_i düzeltilmiş alan, A_0 numunenin ilk kesit alanı, ε eksenel birim boy değişimi ve ΔV hacmi değişimi, V_0 numunenin ilk hacmidir. İstanbul Teknik Üniversitesi Laboratuvarındaki üç eksenli deney aletlerinde hacim değişimi ölçülemediği için alan düzeltmesinde sadece eksenel birim boy değişimi dikkate alınmıştır.

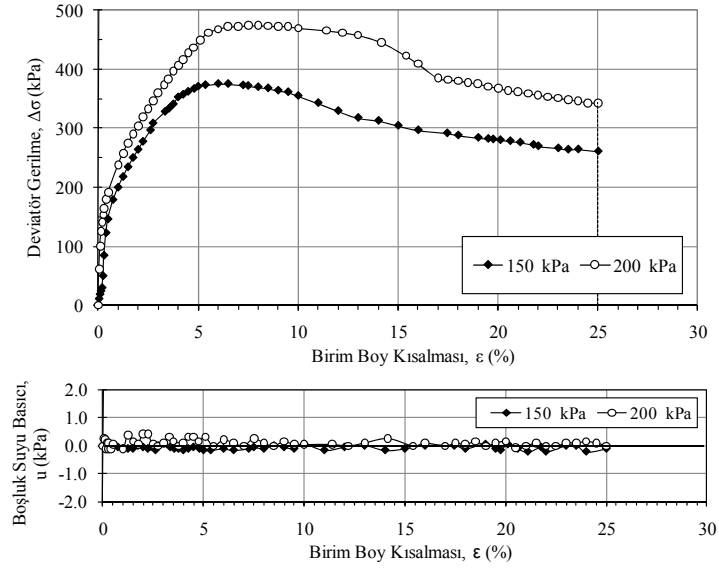
Deney sırasında alınan veriler yardımı ile numuneye ait birim boy kısalması (ε)–deviatör gerilme ($\Delta\sigma$) ve birim boy kısalması (ε)-boşluk suyu basıncı (u) değişim eğrileri çizilir. AYS-2 numunesine ait ε - $\Delta\sigma$ ve ε - u eğrisi Şekil 4.10’da görülmektedir.

Numune üzerine uygulanan asal düşey gerilmeyi elde etmek için, (4.4) nolu denklem de verildiği gibi hücre basıncı ve deviatör gerilme toplanır.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma \quad (4.4)$$

Konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli basınç deneyi bir efektif gerilme deneyi olduğu için kesme işlemi sırasında ilave boşluk suyu basıncının oluşmaması gerekir. Bunun kontrolü için kesme işlemi sırasında boşluk suyu basıncı ölçümleri de alınmıştır. Şekil 4.10’da AYS-2 numunesine ait boşluk suyu basıncı birim boy kısalma grafiği görülmektedir, görüldüğü gibi numuneyi kesme işlemi esnasında dikkate değer boşluk suyu basıncı değişimi olmamıştır.

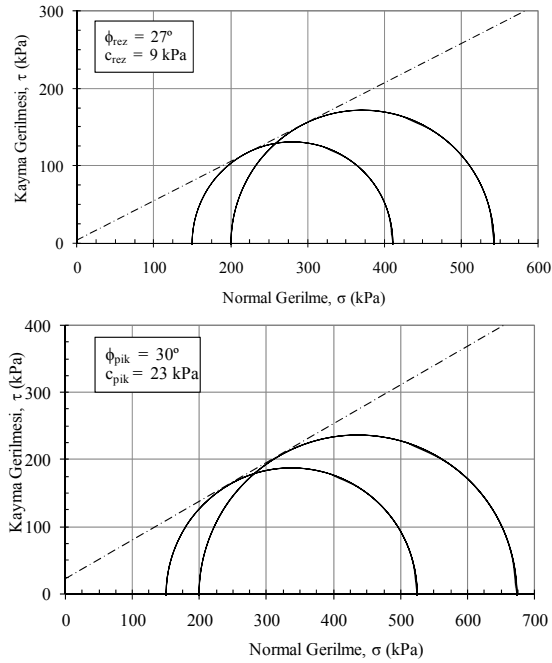
Birim boy kısalması–deviatör gerilme eğrisinden faydalanılarak numuneye ait Mohr daireleri çizilir. Çizelge 4.3’de AYS-2 numunesine ait hücre basınçları ve kesilme işlemi sırasında alınan en büyük ile %25 birim eksenel kısaltmaya karşılık gelen deviatör gerilmeler verilmiş, Şekil 4.11’de ise AYS-2 numunesine ait mohr daireleri görülmektedir.



Şekil 4.10: AYS-2 numunesi için ε - $\Delta\sigma$ ve ε - u eğrisi

Çizelge 4.3: AYS-2 numunesine ait çevre basınçları ve deviatör gerilme

	$\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$		$\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$	
	En büyük	Kalıcı	En büyük	Kalıcı
$\Delta\sigma \text{ (kPa)}$	374.81	260.37	495	342.81
$\sigma_1 \text{ (kPa)}$	524.81	410	695	542.81



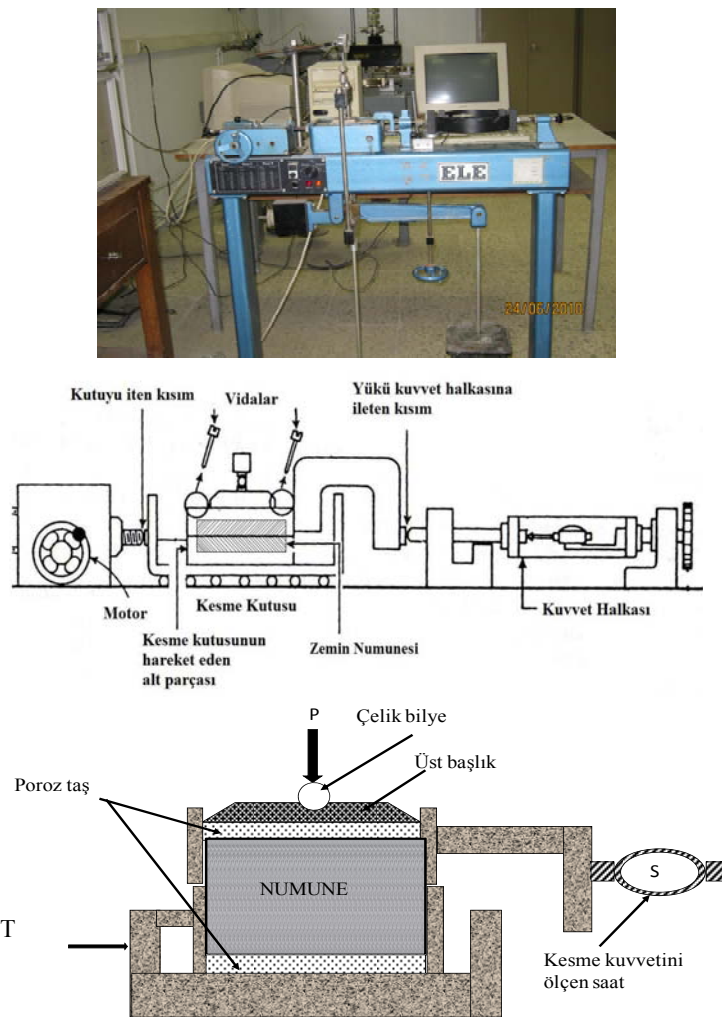
Şekil 4.11: AYS-2 numunesine ait kalıcı ve pik kayma direnci mohr daireleri

Şekil 4.11’de verilen mohr kırılma zarfından AYS-2 numunesinin kalıcı ve pik kayma direnci parametreleri belirlenebilmektedir.

4.4 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi

Deney yönteminin kalıcı kayma direncine etkisini incelemek ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucu bulunan parametreleri karşılaştırmak amacıyla seçilen altı adet numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

Kesme kutusu deneyi numunenin hazırlanması ve deneyin yapılması kolaylığı nedeni ile zeminlerin kalıcı kayma direncinin belirlenmesinde, en yaygın olarak kullanılan laboratuvar deney yöntemidir. Şekil 4.12’de bu çalışmada kullanılan kesme kutusu deney aletinin genel görünümü ve kesiti verilmiştir.



Şekil 4.12: Kesme kutusu deney aletinin genel görünümü ve kesme kutusu deney aletinin kesiti

Kesme kutusu deney aleti motor, kutuyu iten bir kısım, hareket eden alt parça, sabit üst parça, numunenin düzgün yerleştirilmesini sağlayan vidalar, kuvvet halkasından okuma alabilmek için yükü kuvvet halkasına iletmeye yarayan kol ve kuvvet

halkasından oluşmaktadır. Kesme kutusu iki parçadan oluşmaktadır kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay düzlem üzerinde hareket eder ve böylece numune ortasından geçen yatay bir düzlem boyunca kaymaya zorlanır.

Yapılan çalışmalarda, 6 cm x 6 cm en kesitli kesme kutusu deney aletleri kullanılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri AYS-2, AYS-6, AYS-9, AYS-10, AYS-11, AYS-12 numuneleri üzerinde 3 farklı normal gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi 0.035 mm/dak sabit deformasyon hızı ile yapılmış, kesme işlemine 12 mm yerdeğiştirme deformasyonuna kadar devam edilmiş, daha sonra kesme kutusu geri çekilerek, numunenin yeniden konsolide olması sağlandıktan sonra aynı yönde yeniden kesilmiştir. Çalışmada, tekrarlı kesme kutusu deneylerinde her bir numune için 5 çevrim yapılmıştır. Her çevrim sonunda numunenin düşey gerilme altında konsolidasyonunu sağlayabilmesi amacıyla yaklaşık 24 saat süre ile bekletilmiştir. Her numunenin belirli bir normal gerilme altında 5 çevrim olarak gerçekleştirilen kesme kutusu deneyi konsolidasyon ve kesme işlemleriyle yaklaşık bir hafta sürmüştür. Böylece bir numunenin 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altındaki tekrarlı kesme kutusu deney süresi yaklaşık 21 gün olmaktadır.

4.4.1 Tekrarlı kesme kutusu deney numunelerinin hazırlanması

Standart Proktor sıkılığında hazırlanmış numunelerden önceden ağırlıkları tartılarak belirlenmiş olan ringler yardımıyla 1 seti oluşturan 3 adet numune ve 1 adette yedek numune alınmıştır (AASHTO T-236). Alınan numunelerin kesme kutusuna yerleştirilmesi sırasında numunenin zarar görmemesi ve ringden kolayca çıkması için ringler önceden yağlanmıştır. Daha sonra ringin kenarlarından iyice bastırılarak, standart proktor sıkılığında hazırlanan numuneye sokulması sağlanmıştır. Gerekli boyutlarda numunenin alınması için, tel testere kullanılarak ringin etrafındaki fazla numune parçaları kesilmiş ve kesme kutusu deneyi için numune hazır hale getirilmiştir. Ring yardımıyla düzgün olarak hazırlanan kesme kutusu deney numunesi ve yerleştirilme işlemi Şekil 4.13’de görülmektedir. Numunenin yerleştirilmesi sırasında zarar görmemesi için ringin kenarları üst plakanın kenarları ile üst üste gelecek şekilde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde numunenin yerleşimi sırasında numune zarar görebilir ve deney için kullanılamaz hale gelebilir.

Numune kesme kutusuna yerleştirildikten sonra, konsol kol üzerine konulan yk yardımı ile istenilen normal gerilme altında bir gün konsolidasyona bırakılmıştır. Numunenin suya doygun olması amacıyla kesme kutusu içerisine su konulmuş ve bir gün konsolidasyona bırakılmıştır. 0.035 mm/dak. kesme hızında numune kesilme işlemi için hazır hale gelmiştir. Deney sırasında okumaların doğru olarak alınabilmesi için deneye başlamadan saatlerin göstergeleri sıfıra ayarlanmıştır.



şekil 4.13: Numunenin kesme kutusuna yerleştirilmesi, Kesme kutusu deneyinde konsol kol ve konsol kola yüklemenin yapılması

Numuneyi kesme işlemine, tekrarlı kesme kutusu deneyi yenilmeye karşılık gelen birim deformasyon değeri (%20) olan 12 mm yerdeğiştirme değerine kadar 0.035mm/dak. sabit hız ile devam edilmiş, bu da yaklaşık 7 saat sürmüştür. Kesme işlemi sırasında yatay ve düşey deformasyonlar ve kesme kuvveti takip edilmiş,

belirli aralıklarla yatay deformasyona karşılık gelen kuvvet halkasından okumalar alınmıştır. Deneyin bitmesiyle kesme kutusu deney aletinde boşluk geri çekilerek kesilme işlemi gerçekleştirilmeden önceki ilk haline getirilmiştir.

Numune deney düzeneğinden çıkarılmadan sanki ilk kez kesiliyormuş gibi saatler sıfırlanmış ve üzerindeki gerilme kaldırılmadan aynı yük altında 2. çevrim için konsolidasyona bırakılmıştır. Böylece 100 kPa normal gerilme altında 1. çevrim bitmiştir ve konsolidasyon tamamlandıktan sonra 2. çevrim de benzer şekilde gerçekleştirilmiştir, aynı işlemler sırasıyla tekrarlanarak 3. 4. ve 5. çevrimler de yapılmıştır. 5. çevrim sonunda geri sarma işlemi gerçekleştirilmemiştir. Böylece numunenin kesildiği yüzey rahatlıkla gözlemlenmiştir. Deney numunesini çıkarmak için öncelikle kesme kutusu hücresindeki su boşaltılmıştır, ardından normal gerilmeyi sağlayan konsol kol üzerindeki ağırlıklar alınmış ve konsol kol numune üzerinden kaldırılmıştır. Kesme kutusunun alt parçasının sistemden çıkabilmesi için vidalar gevşetilmiş, numune üst ve alt parçayla birlikte deney aletinden çıkartılmıştır. Numune dikkatlice alt ve üst parçalardan çıkartılıp deney sonu su muhtevası belirlenmiştir. 5. çevrim sonunda geri sarma işlemi yapılmadığından numunenin kesildiği yüzey Şekil 4.14’de verildiği gibi rahatlıkla gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14: Kesilmiş bir numunenin görünümü

200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler için numunelerin ring ile hazırlanması, deney sistemine yerleştirilmesi, deney sisteminin montajı ve bu gerilmeler altında gerekli olan çevrimlerin yapılması yukarıda anlatıldığı gibi yapılır. İşlemlerdeki tek değişim uygulanan normal gerilmenin farklı olmasıdır.

4.4.2 Hesaplamalar

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 okunmuştur. Yatay deformasyon saati 1/100 duyarlılıktadır. Saatin başlangıç değerinden belirli deformasyon değerlerine karşılık kuvvet halkasından okumalar alınmıştır, alınan okumalar ile ring faktörü çarpılarak kg biriminden kuvvet değeri elde edilmektedir (Kuvvet = Kuvvet okuması x Ring faktörü). Ring faktörü değeri kullanılan kesme kutusu deney aletine göre değişiklik göstermektedir. Kesme kutusu deneyi hesaplamaları düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alanlara göre iki şekilde gerçekleşir.

Düzeltilmiş alana göre yapılan hesaplamalar

Başlangıçtaki numune alanı $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} = 36 \text{ cm}^2$ dir. Kesme işlemi başladıktan sonraki düzeltilmiş alanlar ise (4.5) bağıntısı yardımı ile bulunmaktadır

$$A_i = 60 \times (60 - \Delta l) \text{ mm}^2 \quad (4.5)$$

Bağıntıdaki A_i düzeltilmiş alan Δl yatay deplasmandır.

Düzeltilmiş alan değerleri hesaplandıktan sonra kayma gerilmesi bağıntı (4.6) yardımı ile hesaplanmaktadır

$$\tau = \frac{\text{Yatay Kuvvet}}{\text{Düzeltilmiş Alan}} \quad (4.6)$$

Normal gerilme ise

$$\sigma = \frac{\text{Düzeltilmemiş Alan} \times \text{Uygulanan normal gerilme}}{\text{Düzeltilmiş alan}} \quad (4.7)$$

bağıntısı yardımı ile hesaplanmaktadır. Uygulanan normal gerilme, kesme kutusu deneyinde numunenin konsolidasyonu ve kesimi sırasındaki normal gerilmedir.

Düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamalar

Düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamalarda başlangıçtaki numune alanı ($6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} = 36 \text{ cm}^2$) sabit bir değer olarak alınmıştır ve hesaplama sırasında değiştirilmemiştir. Düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamalar da kayma gerilmesi bağıntı (4.8) ile hesaplanmaktadır

$$\tau = \frac{\text{Yatay Kuvvet}}{\text{Düzeltilmemiş Alan}} \quad (4.8)$$

Deney süresince normal gerilme ise alan düzeltilmesi yapılmadığı için değişmemekte ve başlangıçtaki normal gerilmeye eşit olarak alınmaktadır.

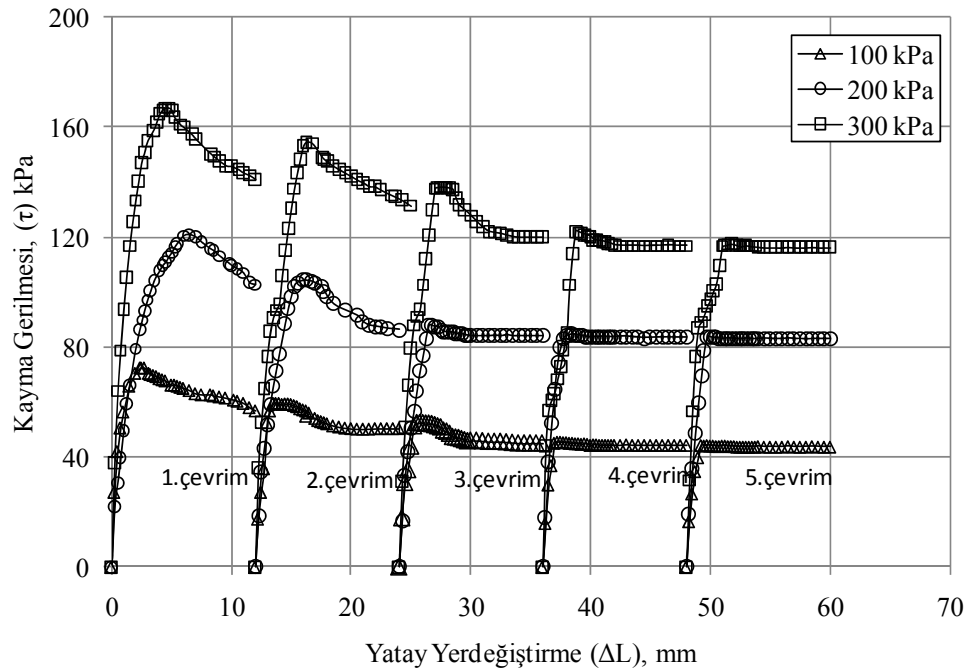
Açıklanan düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamalar için AYS-2 numunesinin 100 kPa gerilme altında 1. çevrimde, örnek olması amacıyla 4 mm yatay yerdeğiştirmeye kadar deney sırasında alınan yatay deformasyon ve kuvvet okumaları ile düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplar Çizelge 4.4’de verilmiştir

Çizelge 4.4: AYS-2 numunesi için deney sırasında alınan okumalar, düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamaları

				Düzeltilmiş			Düzeltilmemiş		
Y.D.	Y.D	Kuv.	Kuv.	A _i	τ	σ	A ₀	τ	σ
ΔL	ΔL	Ok	kg	cm ²	kPa	kPa	cm ²	kPa	kPa
(1/100)	mm	div							
mm									
0	0.00	0	0.0	36.0	0.0	100	36	0.0	100
25	0.25	70	9.8	35.8	27.2	100	36	27.1	100
50	0.50	108	15.1	35.7	42.2	101	36	41.8	100
75	0.75	130	18.2	35.5	51.0	101	36	50.3	100
100	1.00	145	20.2	35.4	57.1	102	36	56.1	100
125	1.25	157	21.9	35.2	62.1	102	36	60.8	100
150	1.50	169	23.6	35.1	67.1	103	36	65.4	100
175	1.75	175	24.4	34.9	69.8	103	36	67.8	100
200	2.00	181	25.2	34.8	72.5	103	36	70.1	100
225	2.25	186	25.9	34.6	75.0	104	36	72.1	100
250	2.50	186	25.9	34.5	75.1	104	36	72.0	100
275	2.75	186	25.9	34.3	75.5	105	36	72.0	100
300	3.00	183	25.5	34.2	73.9	105	36	70.1	100
325	3.25	180	25.1	34.1	73.7	106	36	69.7	100
350	3.50	179	24.9	33.9	73.6	106	36	69.3	100
375	3.75	178	24.8	33.7	73.5	107	36	68.9	100
400	4.00	176	24.5	33.6	73.0	107	36	68.1	100

Çizelge 4.4’de görüldüğü gibi deney sırasında belirli yatay deformasyon değişimi aralıklarında kuvvet okuması alınmaktadır. Alan düzeltmesi yapıldığında elde edilen kayma gerilmesi değerleri, alan düzeltmesiz elde edilen değerlerden daha büyüktür. Ayrıca normal gerilmenin de alan düzeltilmiş hesaplamalarda yatay deplasmanla arttığı görülebilir.

Kalıcı ve pik direnç zarfları her normal gerilme altındaki çevrimler sonucu elde edilen kayma gerilmelerine göre belirlenir. Kalıcı kayma direnci zarfı her bir normal gerilme için en son yapılan çevrim sonucu elde edilen en düşük, pik kayma direnci ise ilk çevrim sonucu elde edilen en büyük kayma gerilmesi değeridir. Çizelge 4.5’de pik kayma direnci ve kalıcı kayma direnci için AYS-2 numunesi üzerinden örnekler verilmiştir. AYS-2 numunesinde tekrarlı kesme kutusu deneyi belirli bir normal gerilme altında 5 çevrim olacak şekilde yapılmıştır. Deney sırasında her normal gerilme altında alınan okumalar ile elde edilen yatay yerdeğiştirme-kayma gerilmesi grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir.



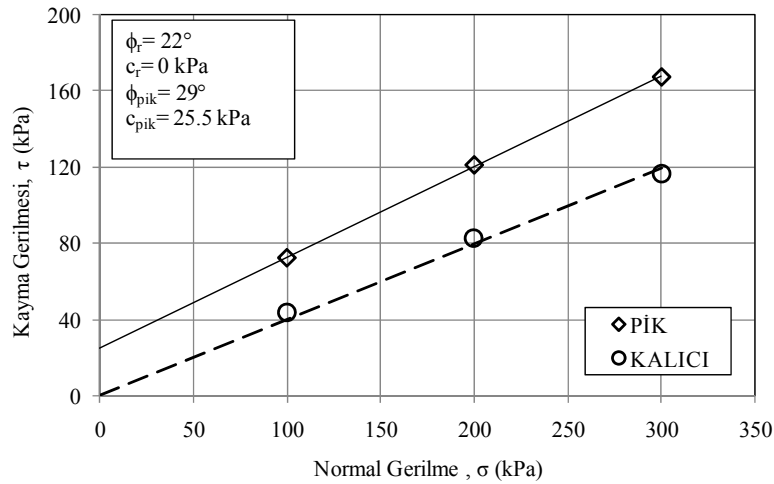
Şekil 4.15: AYS-2 numunesi yatay yerdeğiştirme-kayma gerilmesi grafiği

Yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinde pik kayma gerilmesi 1.çevrim de, kalıcı gerilme değeri ise 5.çevrim sonunda belirlenmiştir. AYS-2 numunesi için her normal gerilme altında elde edilen pik ve kalıcı kayma direnci değerleri yatay yerdeğiştirme-kayma gerilmesi grafiğinden yararlanarak Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5: AYS-2 numunesinde her normal gerilme için pik kayma direnci

1. Çevrim		5. Çevrim	
En büyük		Kalıcı	
Normal Gerilme (kPa)	Kayma Gerilmesi (kPa)	Normal Gerilme (kPa)	Kayma Gerilmesi (kPa)
100	72.07	100	116.17
200	120.73	200	83.00
300	166.89	300	43.76

Çizelge 4.5’de görüldüğü üzere AYS-2 deney numunesinde normal gerilme arttıkça pik ve kalıcı kayma direnci değerleri de artmaktadır. Normal gerilmelere karşılık gelen bu kayma gerilmeleri arasından yaklaşık bir doğru geçirilerek zarf elde edilir. Doğrunun yatayla yaptığı açı kalıcı kayma direncini, düşey eksenini kestiği nokta ise kohezyonu verir. Kalıcı kayma direncinde genelde kohezyon bulunmamaktadır. Zarflara örnek vermek amacıyla Çizelge 4.5’deki değerler göz önünde bulundurularak Şekil 4.16’daki pik ve kalıcı kayma direnci zarfları elde edilir.



Şekil 4.16: AYS-2 numunesi için pik ve kalıcı kayma direnci zarfı

Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen veriler ile biri pik, diğeri kalıcı olmak üzere iki direnç zarfı elde edilir, pik kayma direncinin düşey eksenini kestiği ve bir kohezyon değeri oluşturduğu görülmektedir. AYS-2 numunesi tekrarlı kesme kutusu deney sonucuna göre pik kayma direnci açısı 29° olarak bulunmuştur. Kalıcı dirençte ise kohezyon bulunmamaktadır ve kalıcı kayma direnci açısı 22° olarak elde edilmiştir. Ayrıca normal gerilmelere karşılık gelen kayma gerilmelerinin belirli bir doğru üzerinde olması deneysel çalışmadan düzgün sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Diğer deneysel çalışmalarda da buna benzer sonuçlar elde edilmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada endeks özellikleri belirlenmiş numunelerin kalıcı kayma direnci parametreleri konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve farklı deney yönteminin kalıcı kayma direnci parametrelerine etkisini belirlemek için tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılarak belirlenmiştir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde numunede %25 eksenel deformasyona karşılık gelen kayma gerilmesi, tekrarlı kesme kutusu deneylerinde ise 5 çevrim sonucu elde edilen kayma gerilmeleri kalıcı kayma direnci değeri olarak alınmıştır. Her iki deney yöntemi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları birbiri ile karşılaştırılmış, ayrıca kalıcı kayma direnci ile zeminin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu ilişkilerin daha iyi anlaşılabilmesi ve pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilmesi için zeminlerin endeks özellikleri ve kalıcı kayma direnci açısı arasında bağıntılar geliştirilmiştir. Deneyler sonucu zeminlerin pik kayma direnci parametreleride belirlenmiş ve kalıcı kayma direnci açısı ile pik kayma direnci arasındaki ilişki incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucu elde edilen parametrelerle zeminin geoteknik özellikleri arasında ki ilişkinin incelenmesinde kullanılan numunelere ait geoteknik özellikler Çizelge 5.1’ de verilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerden AYS-13 numunesi %12 likit limit değeri ile en düşük, AYS-11 numunesi ise %113 likit limit değeri ile en yüksek likit limite sahiptir. Çizelgede deneylerde kullanılan numunelerin plastik limitleri, plastisite indisleri, plastik limit ve likit limit oranları, kil yüzdeleri, aktivite değerleri ve ince dane oranları da verilmiştir, numunelerin kil yüzdelerinin %69 ile %6 arasında, ince dane oranlarının ise %100 ile %76 arasında, aktivite değerlerinin ise 0.28 ile 2 arasında değiştiği görülmektedir. Deneylerde kullanılan numunelerin ince dane oranları ise %76 ile %100 arasında değiştiği çizelgeden görülmektedir. Deneyler sonucu belirlenen kalıcı kayma direnci açısı ile zeminlerin bu özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

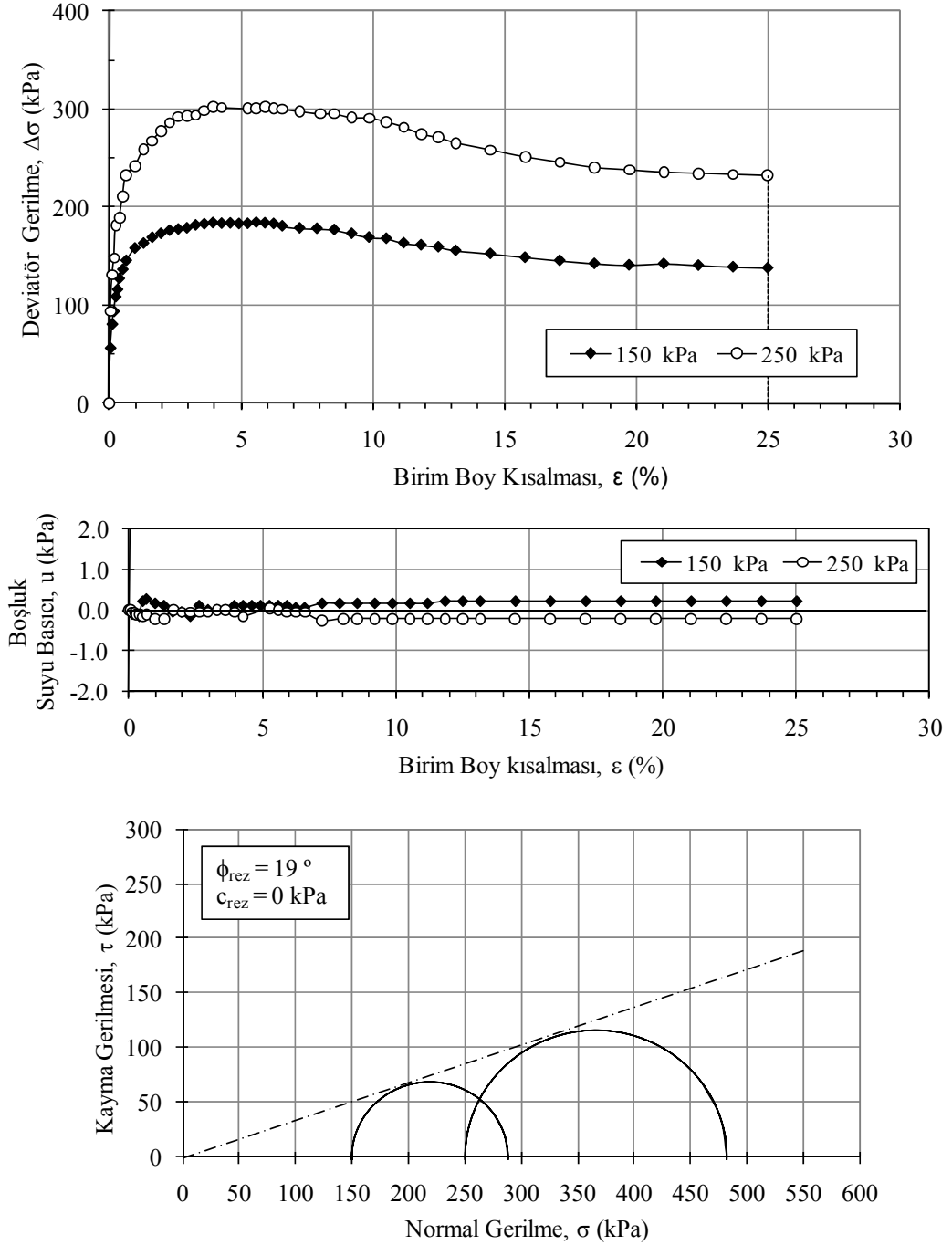
Çizelge 5.1: AYS numunelerinin kalıcı kayma direnci ile ilişkilerinin incelendiği özellikleri

NUMUNE ADI	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	w _P /w _L	Kil Yüzdesi (%)	Aktivite (A)	İ.D.O (%)
AYS-1	92	42	50	0.46	69	1.38	100
AYS-2	39	23	16	0.59	7	0.44	78
AYS-3	48	20	28	0.42	27	0.96	88
AYS-4	68	25	43	0.37	32	0.74	98
AYS-5	79	32	47	0.41	48	1.02	99
AYS-6	50	25	25	0.50	30	1.20	97
AYS-7	75	28	47	0.37	20	0.43	100
AYS-8	92	33	59	0.36	50	0.85	97
AYS-9	70	25	45	0.36	34	0.76	97
AYS-10	73	31	42	0.42	26	0.62	98
AYS-11	113	34	79	0.30	26	0.28	100
AYS-12	58	21	37	0.36	32	0.86	76
AYS-13	24	12	12	0.50	6	2	85
AYS-14	92	34	58	0.37	31	0.83	100
AYS-15	88	31	57	0.35	39	1	98

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile elde edilen kalıcı kayma direnci açılarının, numunelerin çizelgede verilen özellikleri ile değişimi incelenmiştir.

5.1 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Deney Sonuçları

Endeks özellikleri belirlenmiş olan 15 numune üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. İki farklı hücre basınçları altında yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneyi için AYS-10 numunesine ait, her bir hücre basıncı için elde edilen deviator gerilme-birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı-birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri Şekil 5.1’de verilmiştir.

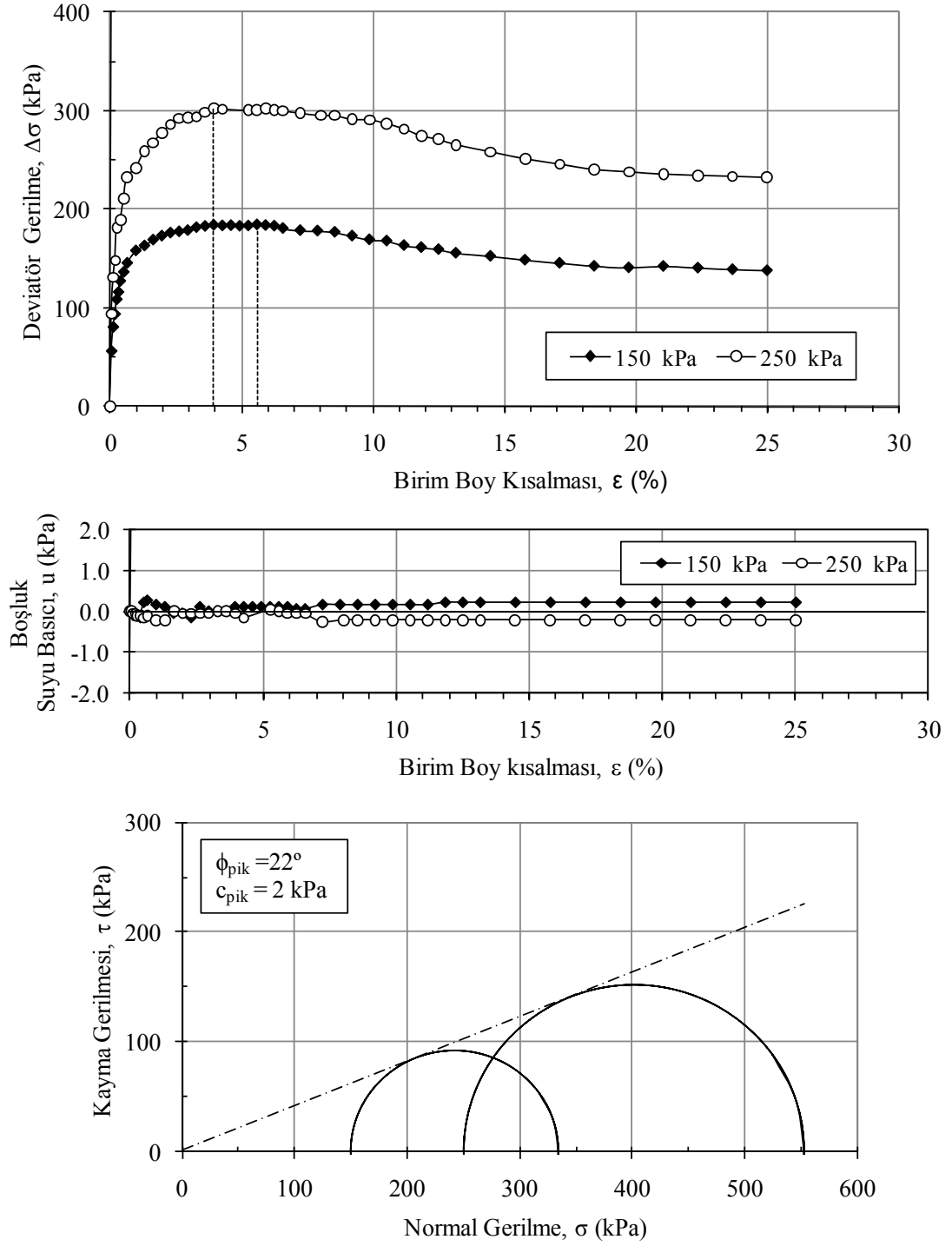


Şekil 5.1: AYS-10 numunesine ait üç eksenli deviator gerilme-birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı-birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri

Bu grafikte, artan birim eksenel kısalma ile birlikte deviatör gerilmenin öncelikle artış gösterdiği, belirli bir pik değere ulaşıldıktan sonra deviatör gerilmenin artan deformasyonla azalmaya başladığı ve sonunda artık deformasyonla da değişmeyen sabit bir değer aldığı görülmektedir. Yaklaşık %15 birim eksenel kısalmadan sonra deviatör gerilmenin çok fazla değişmediği görülmektedir. Konsolidasyonlu-drenajlı deneyde numune üzerinde yaklaşık %25 birim eksenel kısalma meydana geldiğinde kalıcı kayma direnci değerine ulaşıldığı kabul edilmiştir. Bu deneyde numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı olduğundan , deney numuneleri üzerine daha büyük birim eksenel kısalma uygulanamamıştır. Ayrıca Şekil 5.1’de artan deformasyon ile boşluk suyu basıncında çok fazla değişimin olmadığı görülmektedir, bu da kesme işleminin drenaja izin verecek şekilde yeteri kadar yavaş yapıldığını göstermektedir. %73 likit limit, %31 plastik limit, %26 kil yüzdesine ve 0.62 aktivite değerine sahip olan AYS-10 numunesinin kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek için Mohr dairesi çizilmiştir. CD deneyi sonucuna göre AYS-10 numunesi için kalıcı kayma direnci açısı 19° olarak bulunmuştur.

CD deneyi sonucuna göre elde edilen ε - $\Delta\sigma$ grafiğinden numune için pik kayma direnci parametreleride belirlenebilmektedir. Şekil 5.2’de AYS-10 numunesinin hangi birim eksenel kısalma değerinde pik kayma direnci değerine ulaştığı ve pik kayma direnci parametrelerini elde etmek için çizilmiş mohr daireleri görülmektedir. Deviatör gerilme birim boy kısalma grafinde görüldüğü gibi, en büyük deviatör gerilme değerine 150 kPa hücre basıncı altında yaklaşık %5.8 birim boy kısalmasında, 250 kPa çevre basıncı için ise %4 birim boy kısalmada ulaşılmıştır. Görüldüğü gibi artan hücre basıncı ile numunenin en büyük deviatör gerilmeye ulaştığı birim eksenel kısalma değeri azalmaktadır. Bu en büyük deviatör gerilme değerleri yardımı ile çizilen Mohr daireleri sonucu AYS-10 numunesi için 22° pik kayma direnci açısı ve 2 kPa kohezyon değeri elde edilmiştir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucuna göre AYS-10 numunesi için elde edilen pik kayma direnci açısı 22° ve kalıcı kayma direnci açısı 19° olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi pik ve kalıcı kayma direnci arasında çok fazla fark bulunmamıştır. Bunun nedeni olarak numunede kil yüzdesinin az olması, kil mineralinin türü ve mevcut kil mineralinin aktif olmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Kil yüzdesi ile ince dane oranının aynı kavramlar olmadığı unutulmamalıdır.



Şekil 5.2: AYS-10 numunesi pik kayma direnci parametreleri için mohr daireleri

Bütün numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç eksenli deney sonuçlarından elde edilen pik ve kalıcı direnç parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Numunelerin kalıcı kayma direnci açıları 11° - 27° arasında, pik kayma direnci açıları ise 16° - 34° arasında değişmektedir. Ayrıca pik kayma dirençlerinde genelde kohezyon değeri bulunurken, kalıcı kayma direncinde beş numunede kohezyon belirlenmiştir. Bütün

numunelerin deviator gerilme–birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri, pik ve kalıcı kayma direnci için Mohr daireleri Ek B’de yer almaktadır.

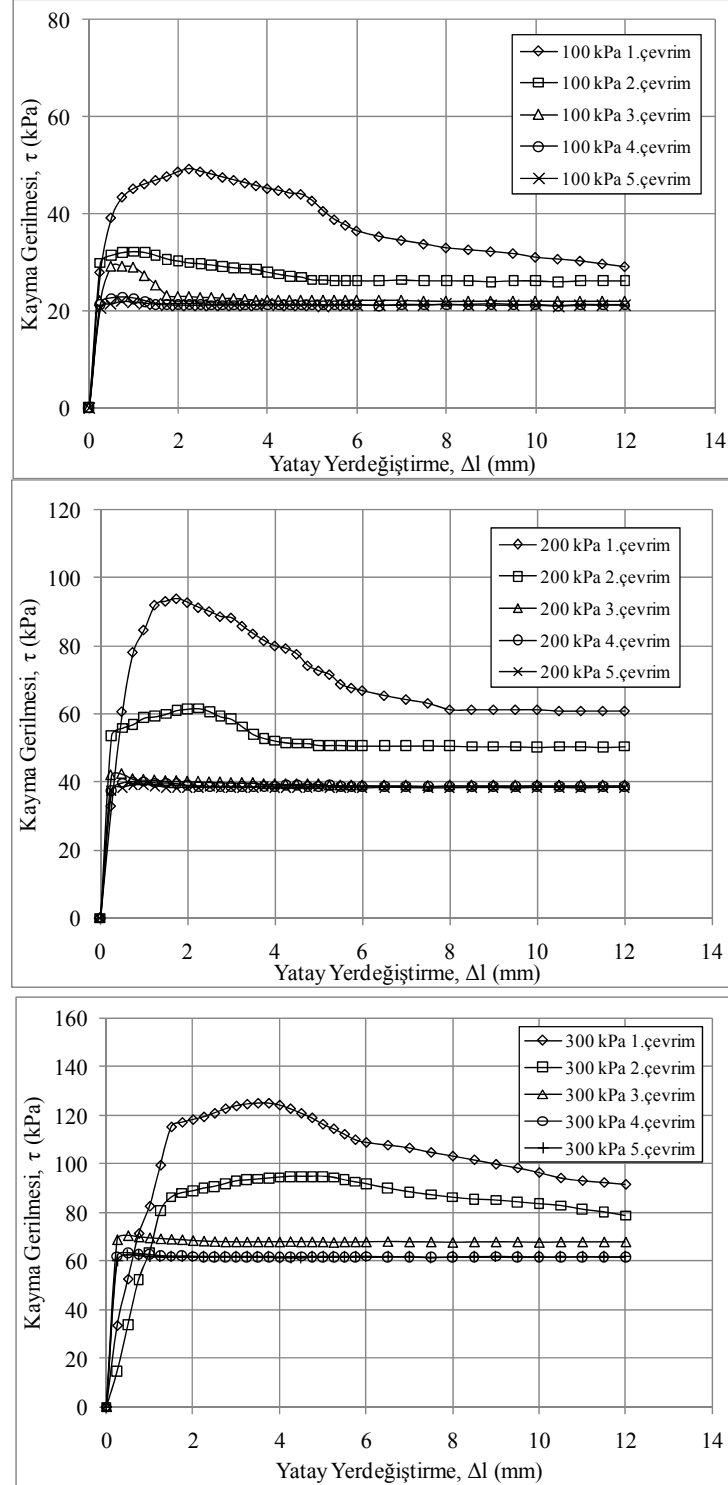
Çizelge 5.2: AYS numunelerinin üç eksenli deney sonuçları

Numune Adı	c_{rez} (kPa)	ϕ_{rez} (°)	c_{pik} (kPa)	ϕ_{pik} (°)
AYS-1	0	17	3	21
AYS-2	0	27	23	30
AYS-3	0	23	0	27
AYS-4	0	19	42	18
AYS-5	0	15	20	22
AYS-6	0	16	40	21
AYS-7	0	17	0	24
AYS-8	23	11	71	16
AYS-9	8	17	0	25
AYS-10	0	19	30	26
AYS-11	26	11	16	18
AYS-12	0	20	0	24
AYS-13	0	30	0	34
AYS-14	4	13	7	16
AYS-15	10	13	13	16

Zeminlerin kalıcı kayma direncini birçok faktör etkilemektedir. Bu çalışmanın amaçlarından biri farklı deney yöntemlerinin kalıcı kayma direncine etkisini incelemek için seçilen numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyi de yapılmıştır.

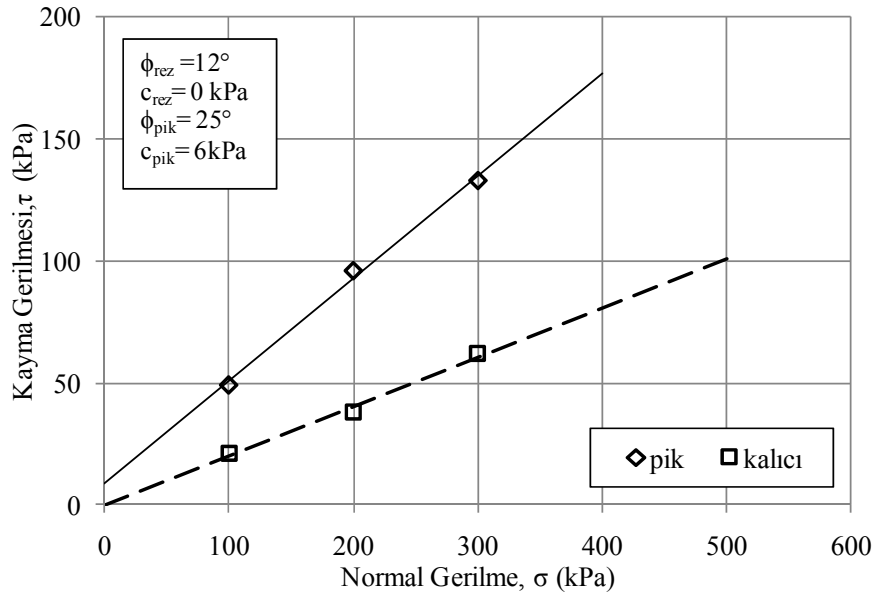
5.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinden AYS-10 numunesine ait her bir düşey gerilme için her çevrim sonucu belirlenen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrileri Şekil 5.3 de verilmiştir.



Şekil 5.3: AYS-10 numunesi için kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

AYS-10 numunesinin üzerinde 3 farklı gerilme altında 5'er çevrim olarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen verilerle kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi grafiği çizilmiştir. şekildende görüldüğu gibi kayma gerilmesi 1.çevrimde artan deformasyonla artış göstermekte, belirli bir değere ulaştıktan sonra artan deformasyonla azalmaya başlamaktadır. 2. çevrimde elde edilen kayma gerilmesi değeri 1. çevrimde elde edilen değerlerden daha düşüktür, 3.çevrim için kayma gerilmesi kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi incelendiğinde kayma gerilmesinin deformasyonla çok az değiştiği, 4. ve 5.çevrim de artık kayma gerilmesinin deformasyonla değişmediği görülmekte ve 5. çevrim sonucu ulaşılan bu sabit kayma gerilmesi değeri kalıcı kayma direnci denilmektedir. şekil 5.4'de ise bu deney sonucu elde edilen kayma gerilmesi ve normal gerilme ile çizilen kalıcı ve pik kayma direnci zarfları görülmektedir.



şekil 5.4: AYS-10 numunesi için kalıcı ve pik göçme zarfları

Bütün numuneler üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deney sonucundan elde edilen pik ve kalıcı direnç parametreleri Çizelge 5.3'de belirtilmiştir. zemin numunelerinin tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kalıcı ve pik kayma direnci açıları ve kohezyonları verilmiştir. Bu çizelgede ifade edildiği gibi numunelerin kalıcı kayma direnci açıları 8°-22° arasında, pik kayma direnci açıları ise 16°-29° arasında değişmektedir. Ayrıca pik kayma dirençlerinde kohezyon değeri vardır. Kalıcı değerlerde ise büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan kohezyon belirlenmemiştir.

Çizelge 5.3: AYS numunelerinin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları

Numune Adı	c_{rez} (kPa)	ϕ_{rez} (°)	c_{pik} (kPa)	ϕ_{pik} (°)
AYS-2	0	22	26	29
AYS-7	0	12	21	19
AYS-9	0	13	7	22
AYS-10	0	12	6	25
AYS-11	0	8	8	16
AYS-12	0	15	20	20

Bütün numunelerin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları her normal gerilme için Ek B kısmında verilmiştir.

5.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

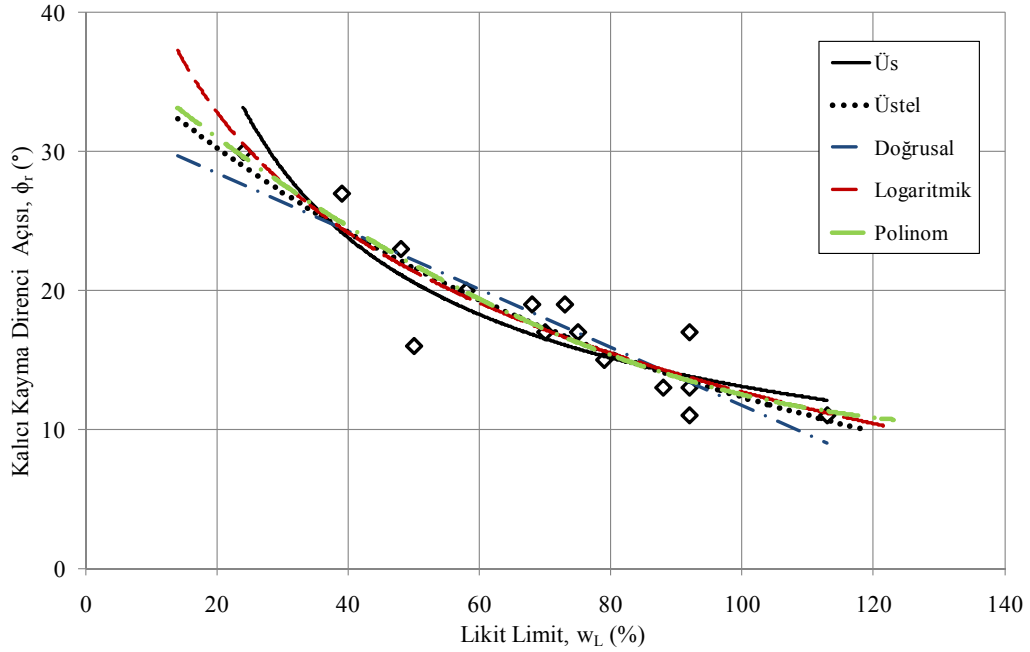
Zemin numuneleri üzerinde yapılan üç eksenli deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma direnci açılarının zeminlerin likit limit (w_L), plastik limit (w_p) ve plastisite indisi (I_p) gibi endeks özellikleri ile değişimleri incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda, kalıcı kayma direncinin belirlenebilmesi amacıyla bağıntılar geliştirilmiştir, bağıntıların geliştirilmesinde literatürde en çok tercih edilen, $y = ax^n$ şeklindeki bir üs fonksiyon yardımı ile üs eğrileri çizilip denklemi belirlenmiştir. Ayrıca kalıcı kayma direnci ile zeminin geoteknik özellikleri arasındaki ilişki incelenirken üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom eğrileri çizilip denklemleri de belirlenmiştir.

5.3.1 Kalıcı kayma direncinin kıvam limitleri ve plastisite indisi ile değişimi

Zeminlerin likit limit değerinin, dane boyutu azalırken yani özgül yüzey artarken artış göstermesi beklenir. Bundan dolayı kil minerolojisi ile likit limit arasında belirli bir ilişki bulunması gerekmektedir. Şekil 5.5’de bu çalışmada kullanılan 15 adet numunenin CD deneyi sonucu belirlenen kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi artan likit limit ile kalıcı kayma direnci açısı azalmaktadır. Bütün ilişkiler için üs, üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom eğrileri

Çizilmiş, denklemleri belirlenmiştir. Çizilen bütün grafikler için eğrisel denklemler ve bu denklemlerin korelasyon katsayıları tablolar halinde verilmiştir.

Çizelge 5.4’de bütün bu ilişkilerin denklemleri ve korelasyon katsayıları verilmiştir. Polinom ve logaritmik denklemin regresyon katsayısı daha yüksek olmasına karşın, s eğri denkleminin basit olmasından, bütün denklemler göz önüne alındığında daha kolay zm elde edilebilmesinden dolayı kullanışlı bir gösterimdir.



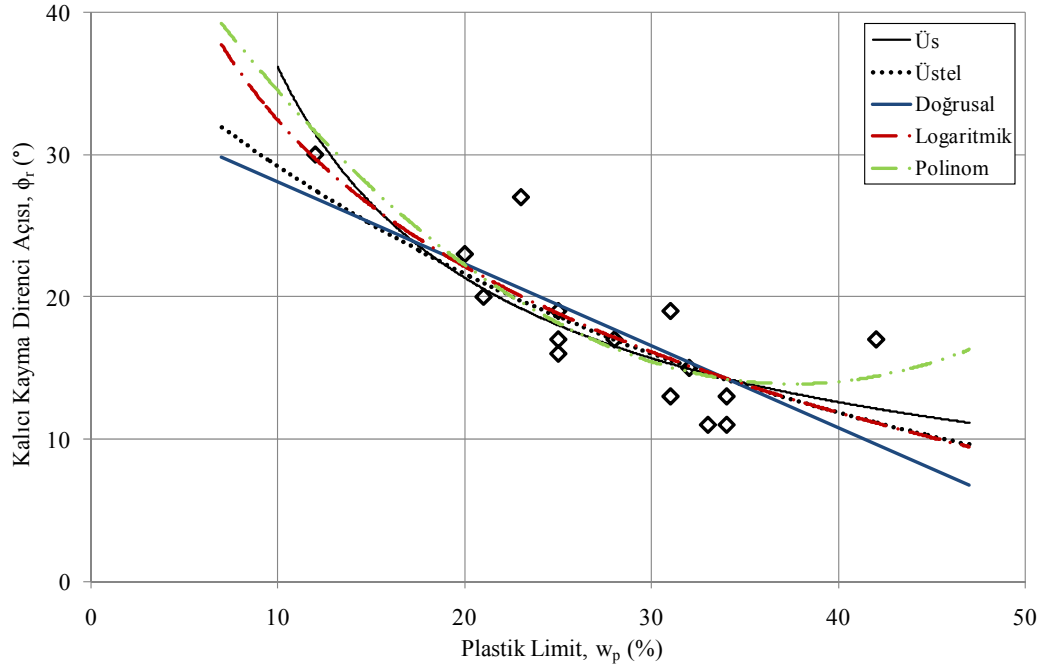
şekil 5.5: Kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

Çizelge 5.4: Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki

Bağıntı tipi	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 263 w_L^{-0.65}$	0.79
Üstel	$\phi_r = 38e^{-0.01w_L}$	0.81
Doğrusal	$\phi_r = -0.21w_L + 32.40$	0.81
Logaritmik	$\phi_r = -12.5\ln(w_L) + 70.3$	0.84
Polinom	$\phi_r = 0.0015w_L^2 - 0.41w_L + 38.61$	0.84

Kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limit arasındaki ilişki incelendiğinde ise likit limit ve kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişkide olduğu gibi burada da artan plastik limit ile kayma direnci açısının azaldığı görülmektedir. Çizelge 5.5’de plastik limit ile kalıcı kayma direnci açısı için bütün ilişkilerin denklemleri ve korelasyon katsayıları verilmiştir. Korelasyon katsayısı en yüksek denklem polinom, korelasyon katsayısı en düşük denklem ise üstel denklemdir. Bu ilişkide de basitlik olması

açısından ϕ_r bağıntısının göz önünde bulundurulması tavsiye edilir. Şekil 5.6' da görüldüğü gibi likit limiti %23, %31 ve %42 olan numunelerin aykırılık gösterdiği görülmektedir. Bu numunelerin kalıcı kayma direnci açılarının yüksek çıkmasının nedeni olarak mevcut kil mineralinin türü, kil yüzdesi gibi faktörler söylenebilir.



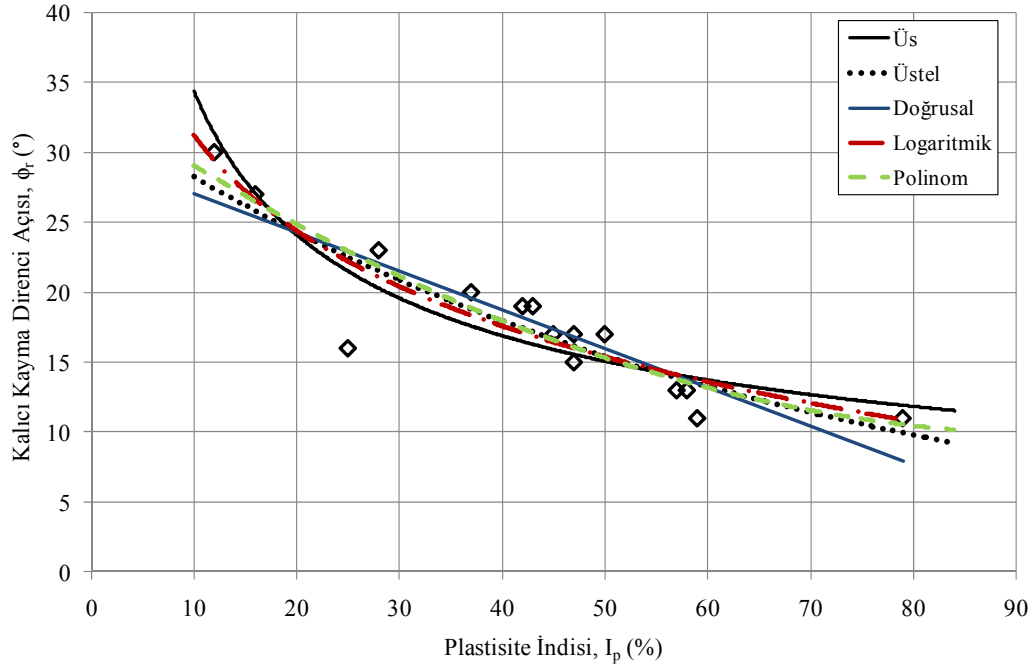
Şekil 5.6: Kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi

Çizelge 5.5: Kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limit arasındaki ilişkiler

Bağıntı Tipi	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 209w_p^{-0.76}$	0.60
Üstel	$\phi_r = 39.5e^{-0.03w_p}$	0.55
Doğrusal	$\phi_r = -0.6w_p + 34$	0.59
Logaritmik	$\phi_r = -15 \ln(w_p) + 67$	0.66
Polinom	$\phi_r = 0.027w_p^2 - 2.04w_p + 52$	0.72

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açılarının plastisite indisleri ile değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir, kayma direnci açısı plastisite indisinin artmasıyla azalma eğilimi göstermektedir. Çizelge 5.6'da bu ilişki için ϕ_r , üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom denklemleri verilmiştir. En yüksek korelasyon katsayısına sahip olan denklem doğrusal denklem olmasına rağmen, burada da diğer ilişkilerde olduğu gibi literatürde ilişkileri ifade etmede en çok kullanılan denklem ϕ_r denklem olduğu için, ϕ_r denklemin göz önünde bulundurulması tercih edilir.

Plastisite indisi ile kalıcı kayma direnci grafiği incelendiğinde, plastisite indisi %25 ve kalıcı kayma direnci açısının 16° olan numune dışındaki bütün numunelerin belirli bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

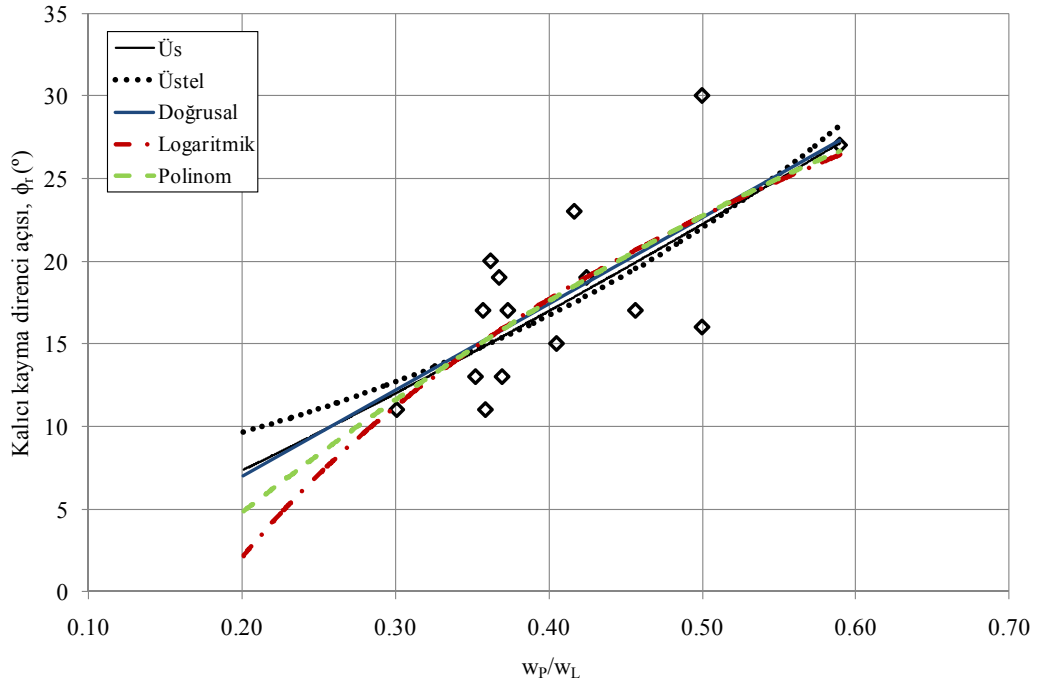


Şekil 5.7: Kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

Çizelge 5.6: Kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişkiler

Bağıntı Tipi	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 112.I_p^{-0.5}$	0.78
Üstel	$\phi_r = 33e^{-0.02I_p}$	0.81
Doğrusal	$\phi_r = -0.3I_p + 29.8$	0.79
Logaritmik	$\phi_r = -9.8\ln(I_p) - 54$	0.84
Polinom	$\phi_r = 0.03I_p^2 - 0.45I_p - 33.8$	0.82

Başka bir inceleme kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limit ve likit limit (w_p/w_L) oranı arasında yapılmış ve grafiği Şekil 5.8’de verilmiştir. Plastik limit ve likit limit tanımı göz önünde bulundurulduğunda bu oranın artması ile kalıcı kayma direnci açısının artması beklenmektedir ve şekilden de görüldüğü gibi plastik limit/likit limit oranı arttıkça kalıcı kayma direnci açısı artmaktadır. Bu ilişki için bağıntılar Çizelge 5.7’de verilmiştir. Bağıntıların geneline bakıldığında korelasyon katsayısı %49 ile %51 arasındadır.



Şekil 5.8: Kalıcı kayma direnci açısı'nın plastik limit/likit limit oranı ile değişimi

Çizelge 5.7: Kalıcı kayma direnci açısı ile w_P/w_L oranı arasındaki ilişkiler

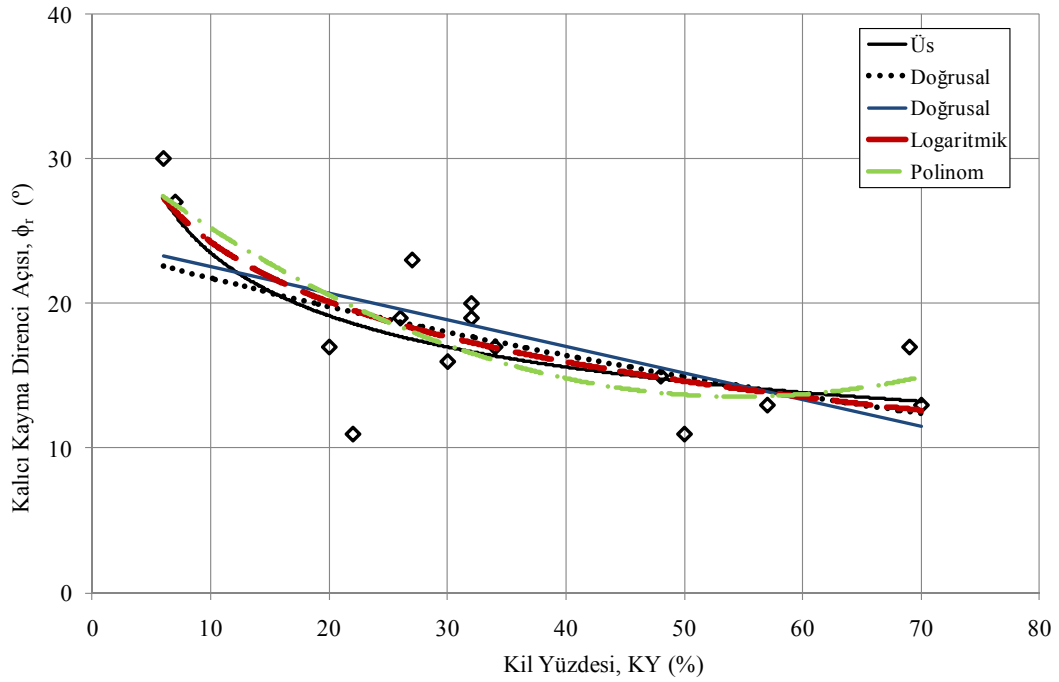
Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 51 (w_P / w_L)^{0.6}$	0.51
Üstel	$\phi_r = 5.6e^{2.76(w_P/w_L)}$	0.49
Doğrusal	$\phi_r = 52(w_P/w_L) - 3.4$	0.51
Logaritmik	$\phi_r = 22.5 \ln(w_P/w_L) + 38.4$	0.51
Polinom	$\phi_r = -41.1(w_P/w_L)^2 + 88.6(w_P/w_L) - 11.3$	0.51

5.3.2 Kalıcı kayma direnci açısı ile numunelerin diğer geoteknik özellikleri arasındaki ilişki

Yapılmış olan hidrometre ve elek analizleri sonucunda elde edilen kil yüzdesi (KY), ince dane oranı (İDO) ve plastisite indisinin kil yüzdesine oranı olarak tanımlana aktivite ile kalıcı kayma direncinin değişimi incelenmiştir. Ayrıca, Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda kalıcı kayma direnci açısı ile birlikte pik kayma direnci açıları da belirlenmiş ve pik ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki incelenmiştir.

Şekil 5.9'da yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile belirlenen kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesiyle değişimi verilmiştir. Bu grafiğe göre kil

yüzdesi artarken kalıcı kayma direnci açısı azalmaktadır. Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki için belirlenen bağıntılar Çizelge 5.8’da verilmiştir.



Şekil 5.9: Kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

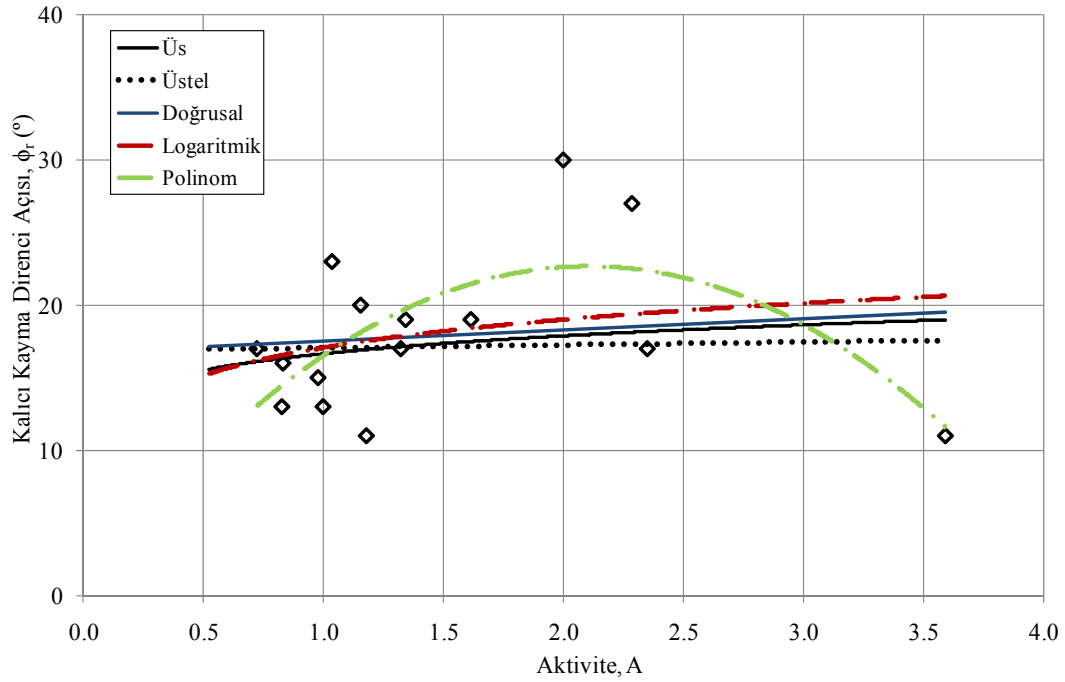
Çizelge 5.8: Kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişkiler

Bağıntı Tipi	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 46(KY)^{-0.29}$	0.52
Üstel	$\phi_r = 24e^{-0.01(KY)}$	0.39
Doğrusal	$\phi_r = -0.18(KY) + 24.4$	0.44
Logaritmik	$\phi_r = -6\ln(KY) + 38$	0.62
Polinom	$\phi_r = 0.006(KY)^2 - 0.64(KY) + 31$	0.62

Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişkiyi belirtmek için verilen bağıntılar incelendiğinde de en yüksek korelasyon katsayısına sahip denklem, korelasyon katsayısı %62 olan polinom ve logaritmik denklemdir. Üs denklemi ise %52 korelasyon katsayısına sahiptir.

Başka bir inceleme kalıcı kayma direnci açısı ile aktivite arasında gerçekleştirilmiştir. Aktiviteyi, plastisite indisinin kil yüzdesine oranı olarak tanımlamıştık. Şekil 5.10’da kalıcı kayma direnci açısının aktivite ile olan değişimi verilmiştir, şekilden de görüldüğü gibi zemin numuneleri belirli bir düzen içerisinde değildir. Kalıcı kayma direnci ile aktivite arasındaki ilişki için belirlenen bağıntılar ve korelasyon katsayıları Çizelge 5.9’da verilmiştir. Bir çok numune bu ilişkide

aykırılık göstermiştir. Bu nedenden dolayı bağıntıların korelasyon katsayıları oldukça düşüktür.

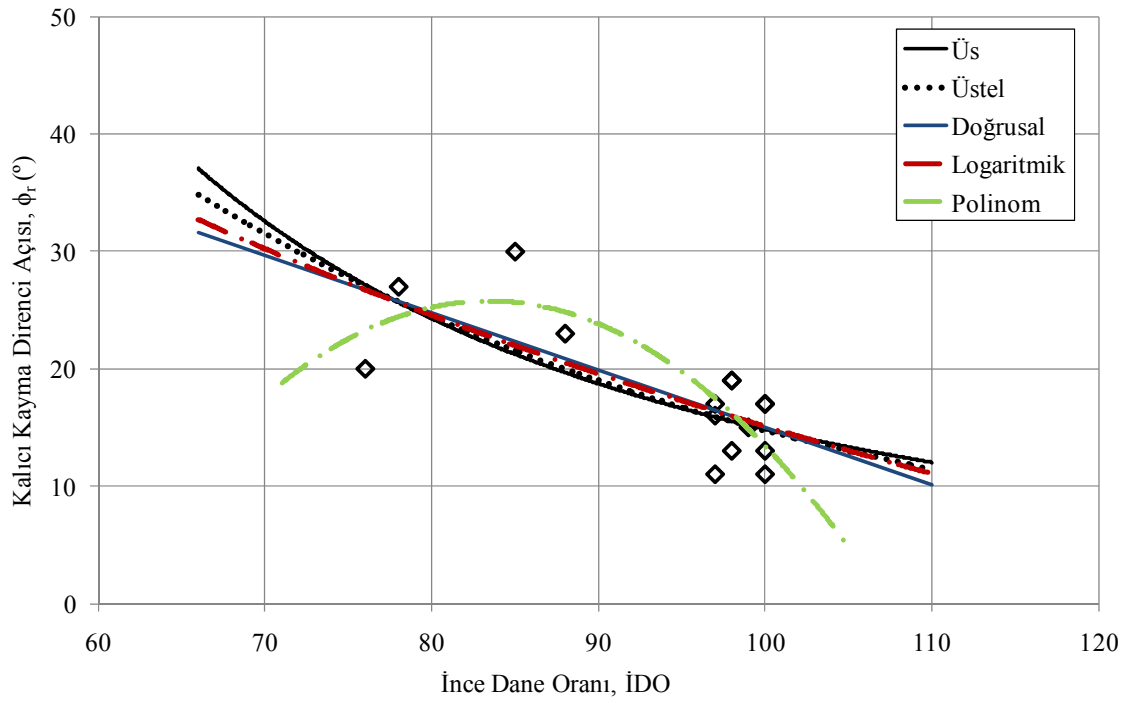


Şekil 5.10: Kalıcı kayma direnci açısı'nın aktivite ile değişimi

Çizelge 5.9: Kalıcı kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişkiler

Bağıntı Tip	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 16.6(A)^{0.1}$	0.0250
Üstel	$\phi_r = 17e^{0.01(A)}$	0.0009
Doğrusal	$\phi_r = 0.8(A) + 16.7$	0.0120
Logaritmik	$\phi_r = 2.8\ln(A) + 17.1$	0.0500
Polinom	$\phi_r = 5.02(A)^2 + 21.2(A) + 0.4$	0.4200

Hidrometre ve ıslak elek deneyleri ile numunelerin kil ve silt yüzdelereine bağlı olan ince dane oranı belirlenmiş ve bir incelemede kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasında yapılmıştır. Bu ilişkiyi Şekil 5.11'de görmek mümkündür. Aktivite ile olan ilişkide olduğu gibi burada da bazı numuneler aykırılık göstermiştir. Bu da ilişkinin korelasyon katsayısını düşürmüştür. Kalıcı kayma direnci ile ince dane oranı arasında elde edilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları Çizelge 5.10'da verilmiştir. En yüksek korelasyon katsayısına sahip bağıntı polinom denklemdir, üs bağıntısının korelasyon katsayısı %48 olarak bulunmuştur.

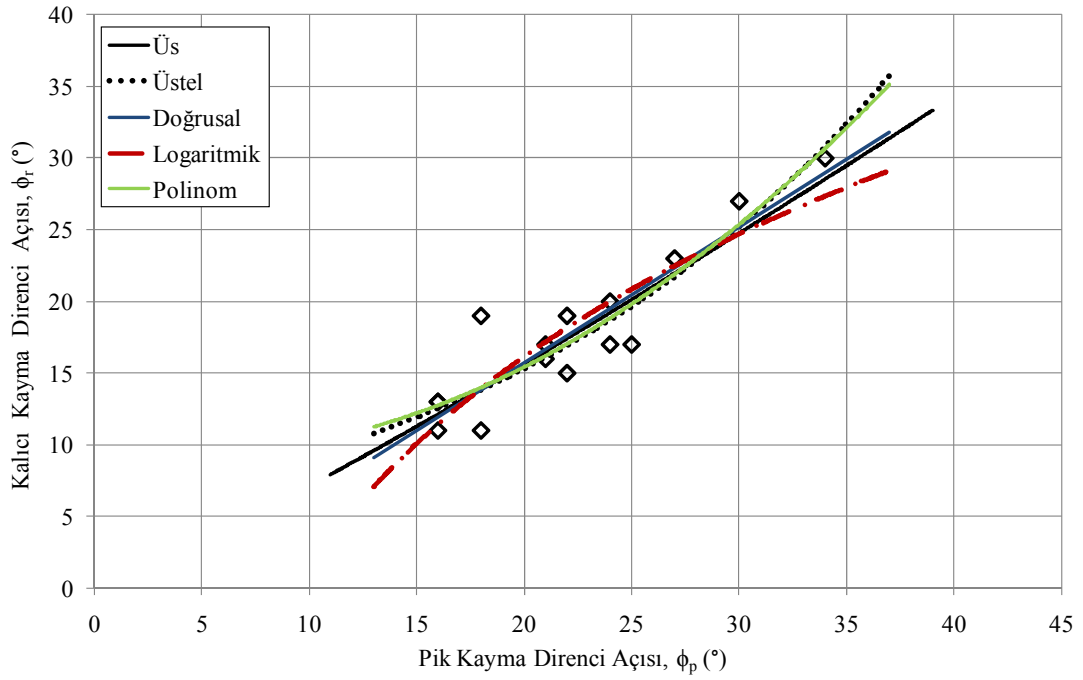


Şekil 5.11: Kalıcı kayma direnci açısının ince dane oranı ile değişimi

Çizelge 5.10: Kalıcı kayma direnci açısı ile ince dane oranı arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 373013(\text{İDO})^{-2.2}$	0.48
Üstel	$\phi_r = 185^{-0.03(\text{İDO})}$	0.49
Doğrusal	$\phi_r = -0.5(\text{İDO}) + 64$	0.53
Logaritmik	$\phi_r = -42 \ln(\text{İDO}) + 210$	0.52
Polinom	$\phi_r = -0.05(\text{İDO})^2 + 7.5(\text{İDO}) - 288.6$	0.66

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile numunelerin pik kayma direnci parametreleri de belirlenmiştir. Son inceleme ise pik ile kalıcı kayma direnci açıları arasında yapılmış ve grafiği Şekil 5.12’de, her bir ilişkinin bağıntısı Çizelge 5.11’de verilmiştir. Görüldüğü gibi pik kayma direnci açısı arttıkça kalıcı kayma direnci açısı da artmaktadır. Pik ile kalıcı kayma direnci açıları arasındaki ilişkinin çeşitli bağıntılarla ifadesi ve bu bağıntıların korelasyon katsayılarına bakıldığında ise en yüksek korelasyon katsayısına bu ilişkide de polinom denklem sahiptir. Üs denklemin korelasyon katsayısı ise %79’ dur.



Şekil 5.12: Kalıcı kayma direnci açısının pik kayma direnci açısı ile değişimi

Çizelge 5.11: Kalıcı kayma direnci açısı ile ϕ_p arasındaki ilişkiler

Bağıntı Tipi	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 0.52\phi_p^{1.113}$	0.79
Üstel	$\phi_r = 5.64e^{0.05\phi_p}$	0.80
Doğrusal	$\phi_r = 0.95\phi_p - 3.18$	0.83
Logaritmik	$\phi_r = 21.1\ln(\phi_p) - 47.06$	0.79
Polinom	$\phi_r = 0.02\phi_p^2 + 0.18\phi_p + 9.6$	0.85

Pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilmesi için kalıcı kayma direnci açıları ile plastisite indisi, likit limit ve pik kayma direnci açısı arasındaki ilişkiler çoklu regresyon analizleri sonucunda belirlenmiştir. Bu ilişkilerin denklem olarak ifadesi (5.1) ve (5.2)'de verilmiştir

$$\phi_r = 7 \times I_p^{-0.28} \times \phi_p^{0.63} \quad (5.1)$$

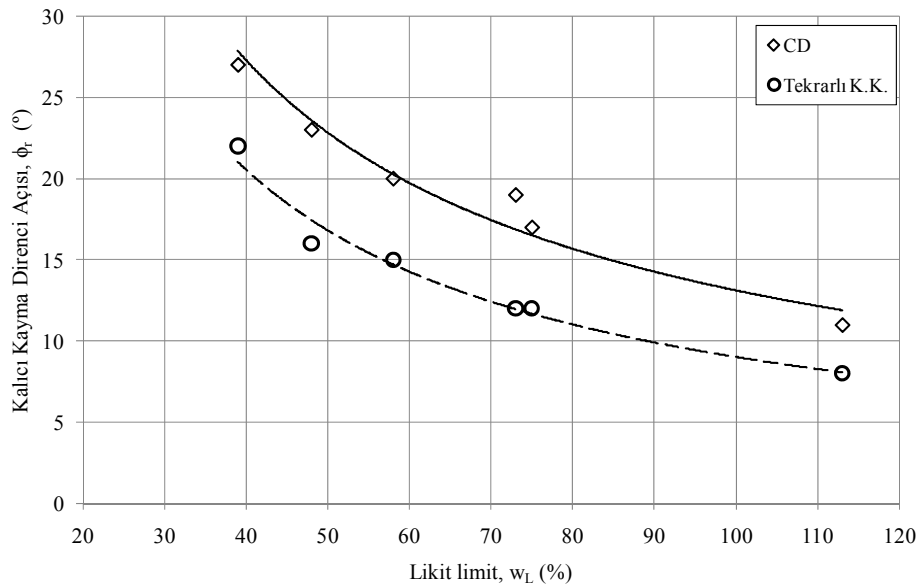
$$\phi_r = 11.2 \times w_L^{-0.35} \times \phi_p^{0.62} \quad (5.2)$$

Gerçekleştirilen incelemeler sonucunda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucu belirlenen kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve pik kayma direnci açısı arasında yüksek korelasyon katsayılarına sahip olan ilişkiler elde edilmiştir.

5.4 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç ve Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çalışmada kalıcı kayma direncine deney yönteminin etkisini incelemek için seçilen 6 numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri de yapılmıştır. Bu bölümde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneyi birlikte değerlendirilmiş ve kalıcı kayma direnci açısı ile numunelerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler yeniden gözden geçirilmiştir. Bu incelemede basitlik olması açısından kalıcı kayma direnci açısı ile zeminlerin geoteknik özellikleri arasındaki ilişki incelenirken üs bağıntılar kullanılmıştır.

Şekil 5.13’de konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki ve bu ilişkilerin üs denklemi verilmiştir. Görüldüğü gibi artan likit limit ile kalıcı kayma direnci açısı her iki deney sonucunda da azalmaktadır ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deney sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları tekrarlı kesme kutusu sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açılarından yüksektir. Her iki deney sonucuna göre elde edilen ϕ_r ile w_L arasındaki ilişkinin incelenmesin de üs bağıntı kullanılmış ve bağıntılar Çizelge 5.12’de verilmiştir. Bu ilişkinin korelasyon katsayısı konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için %95, tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları için ise %98 dir.

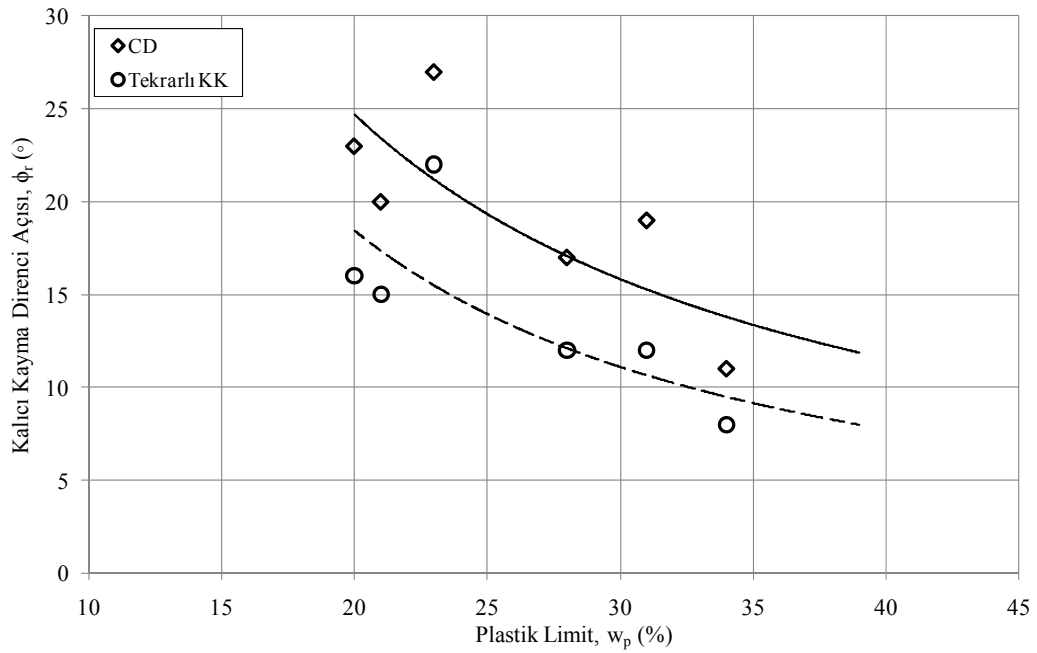


Şekil 5.13: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

Çizelge 5.12: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R ²
CD	$\phi_r = 522w_L^{-0.8}$	0.95
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 568w_L^{-0.9}$	0.98

Plastik limit (w_p) ile kalıcı kayma direncinin her iki deney sonuçlarına göre değişimi incelenmiş ve Şekil 5.13’de grafik olarak verilmiştir. Likit limit ve kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişkiye benzer bir ilişki burada da görülmektedir. Her iki deney sonucuna göre artan plastik limit ile kalıcı kayma direnci açısını azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Kısacası zeminlerde plastik kıvam arttıkça kalıcı kayma direnci açıları (ϕ_r) düşer. Bu ilişki için elde edilen üs bağıntılar ve korelasyon katsayıları Çizelge 5.13’de verilmiştir. Korelasyon katsayısı konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde %60, tekrarlı kesme kutusu deneyinde %64’dür.

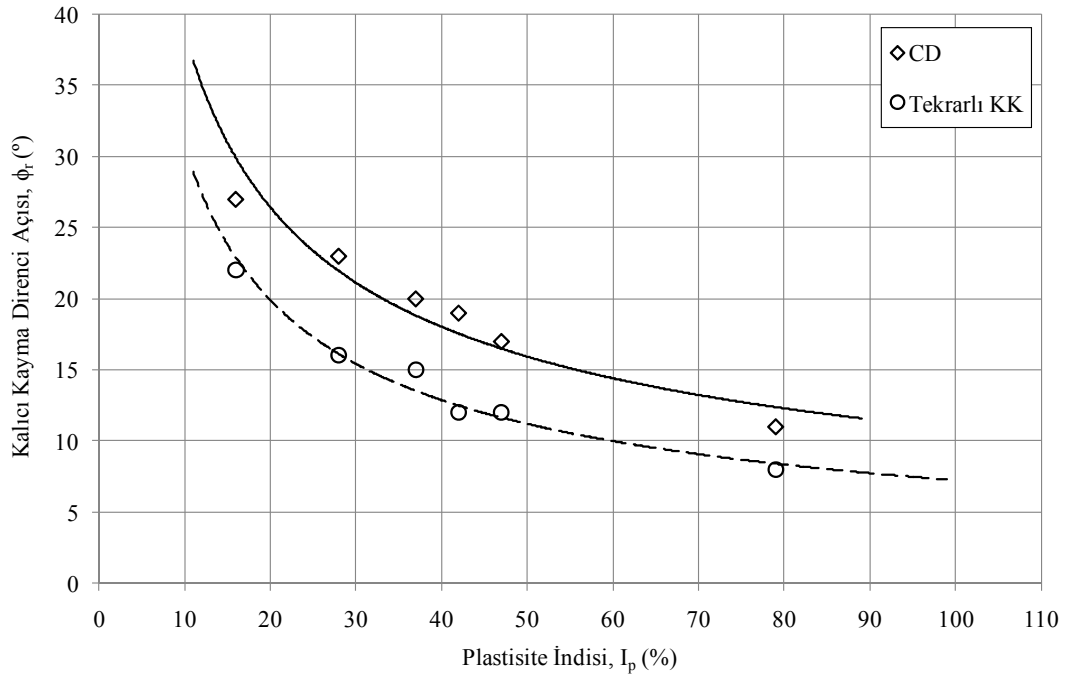


Şekil 5.14: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi

Çizelge 5.13: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R ²
CD	$\phi_r = 661.6w_p^{-1.1}$	0.60
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 787.6w_p^{-1.25}$	0.64

Likit limit (w_L) ile plastik limit (w_P) arasındaki fark olan plastisite indisi (I_p) ile her iki deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki Şekil 5.15’de verilmiştir. Plastisite indisinin artmasıyla kalıcı kayma direnci açıları düşmektedir. Her iki deney sonucuna göre elde edilen ϕ_r - I_p ilişkisi için üs bağıntısı ve korelasyon katsayısı Çizelge 5.14’de verilmiştir. Görüldüğü gibi üs bağıntı konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde %92 gibi yüksek bir korelasyon katsayısına, tekrarlı kesme kutusu deneyinde ise %97 korelasyon katsayısına sahiptir.

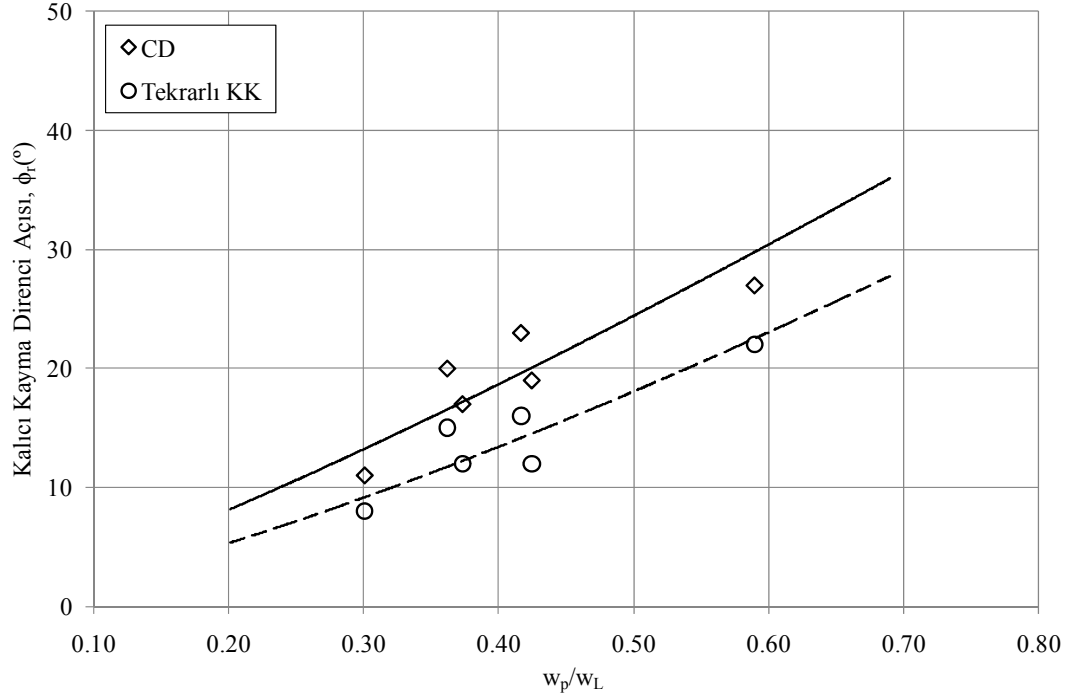


Şekil 5.15: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

Çizelge 5.14: CD ve Tekrarlı K.K deneyleri için Kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R^2
CD	$\phi_r = 138I_p^{-0.55}$	0.92
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 130.I_p^{-0.63}$	0.97

Bir başka inceleme her iki deney sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı (w_p/w_L) arasında gerçekleştirilmiştir. Bu ilişkinin grafiği Şekil 5.16’da verilmiştir. Çizelge 5.15’de bu ilişki için üs bağıntıları ve korelasyon katsayıları verilmiştir. Her iki deney sonucu için bulunan üs bağıntının korelasyon katsayısı %77 dir.



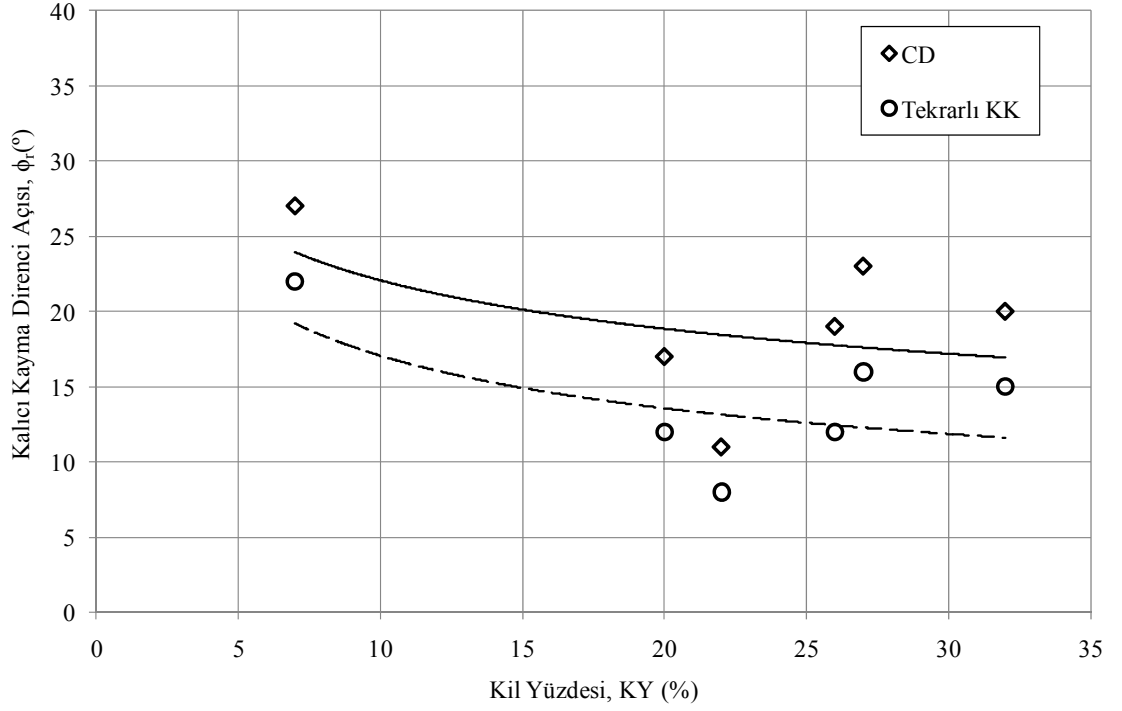
Şekil 5.16: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ve likit limit oranı ile değişimi

Çizelge 5.15: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limit ve likit limit oranı arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R^2
CD	$\phi_r = 56(w_p/w_L)^{1.2}$	0.77
Tekrarlı K.K.	$\phi_r = 45.6(w_p/w_L)^{1.34}$	0.77

Bu ilişkilere ek olarak kil yüzdesi (KY), ince dane oranı (İDO) ve plastisite indisinin kil yüzdesine oranı olarak tanımlan aktivite ile kalıcı kayma direncinin değişimi de incelenmiştir.

Gerçekleştirilen elek ve hidrometre analizleri sonucu elde edilen kil yüzdeleri ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki her iki deney sonuçları için incelenmiş ve grafik Şekil 5.17 de, elde edilen üs bağıntısı ve korelasyon katsayısı ise Çizelge 5.16’da verilmektedir. Yapılmış olan bu çalışma sonucunda konsolidasyonlu–drenajlı deney için %16, tekrarlı kesme kutusu deneyi için %28 gibi düşük bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Artan kil yüzdesi (KY) kalıcı kayma direnci açısını (ϕ_r) her iki deneyde düşürse de bu sonuca göre numunelerden bazıları uygunluk göstermemektedir.

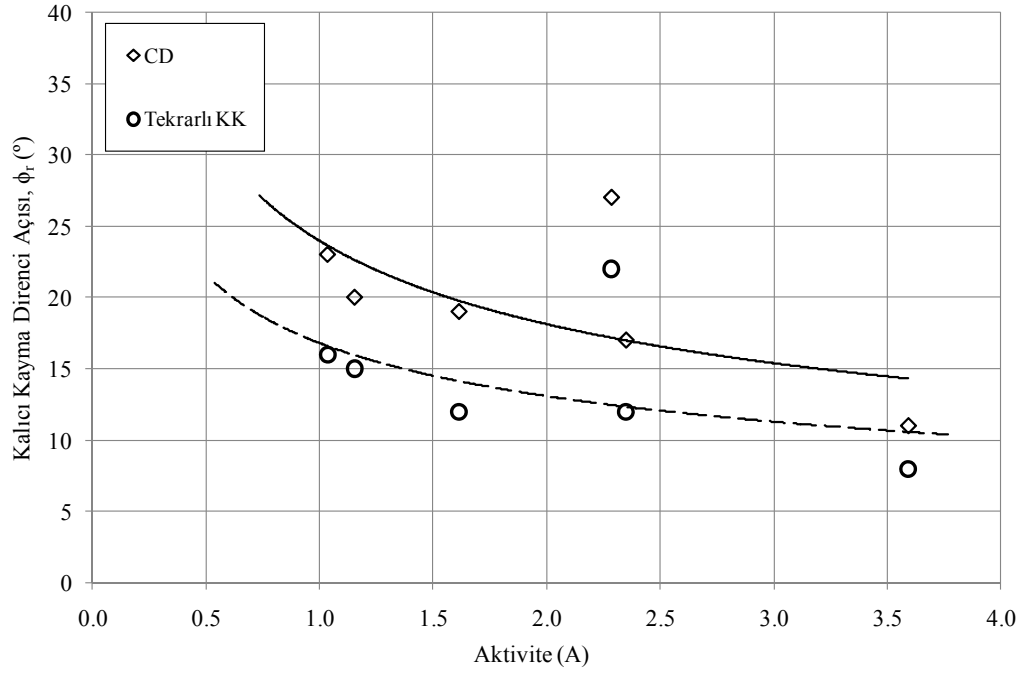


Şekil 5.17: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

Çizelge 5.16: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R ²
CD	$\phi_r = 37KY^{-0.23}$	0.16
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 36.6KY^{-0.33}$	0.28

Farklı iki deneysel çalışma için, diğer bir inceleme ise kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisinin kil yüzdesine oranı olarak ifade edilen aktivite (A) arasında gerçekleştirilmiştir. Aktivite ile bu inceleme sonucu Şekil 5.18'deki ilişki elde edilmiştir. Hem konsolidasyonlu-drenajlı deneyde, hem de tekrarlı kesme kutusu deneyinde aktivite ile kalıcı kayma direnci açısı yine azalmaktadır. Buradan aktif killerin kalıcı kayma direnci açısının pasif killerin kalıcı kayma direnci açısından daha küçük olacağı söylenebilir. Kalıcı kayma direnci ile aktivite arasındaki ilişkinin bağıntısı Çizelge 17'de verilmektedir, bağıntı her iki denklemde de küçük korelasyon katsayısına sahiptir. Kısacası kalıcı kayma direnci açısı ile aktivite arasında belirgin bir ilişki yoktur. Burada bir numune dışındaki diğer numunelerin belirli bir düzen içerisinde olduğu görülmektedir.



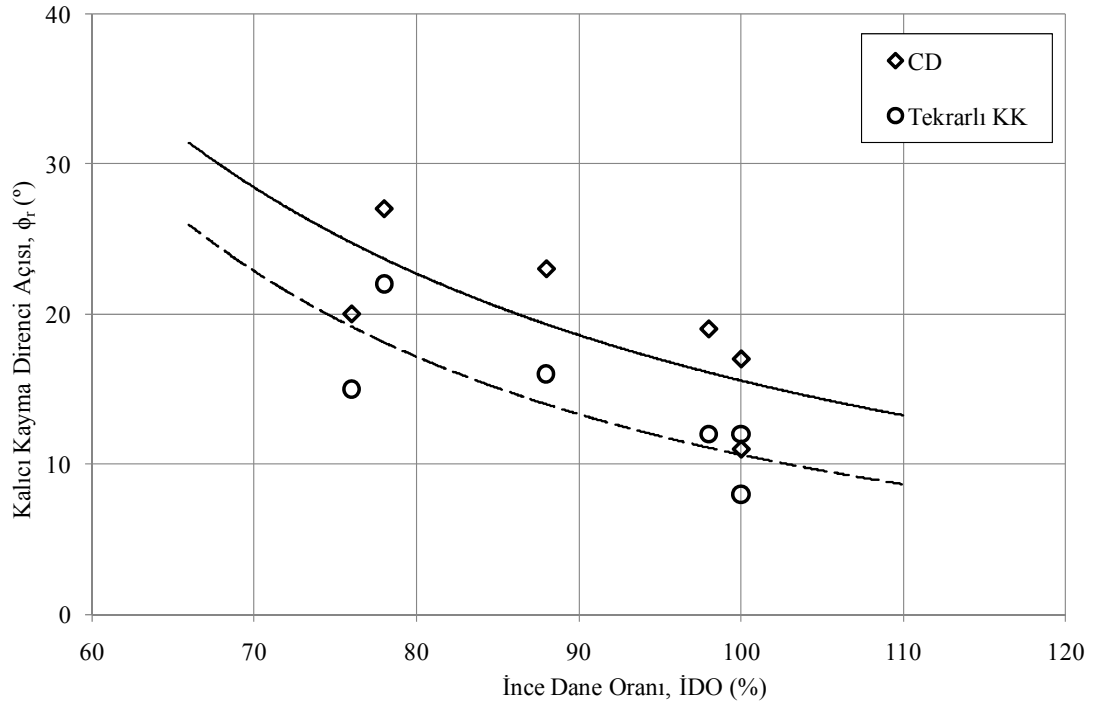
Şekil 5.18: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının aktivite ile değişimi

Çizelge 5.17: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci ile aktivite arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R ²
CD	$\phi_r = 23.98A^{-0.4}$	0.38
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 16.81A^{-0.36}$	0.25

Şekil 5.19’de ifade edilen ilişki kalıcı kayma direnci ile ince dane oranı (İDO) arasındadır. İnce dane oranı artarken kalıcı kayma direnci açısı azalmaktadır. Ortaya çıkan ilişkinin denklemi Çizelge 5.18’de verilmektedir, üs bağıntı konsolidasyonlu-drenajlı deneyde %47, tekrarlı kesme kutusu deneyinde %63 korelasyon katsayısına sahiptir.

Ayrıca grafikten görüldüğü gibi konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen kalıcı kayma direnci açısı, tekrarlı kesme kutusu deneyi ile elde edilen açıdan daha büyüktür. Bunun nedeni konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde numuneye uygulanan şekil değiştirmenin, tekrarlı kesme kutusu deneyinde uygulanan değerden daha küçük olmasıdır.

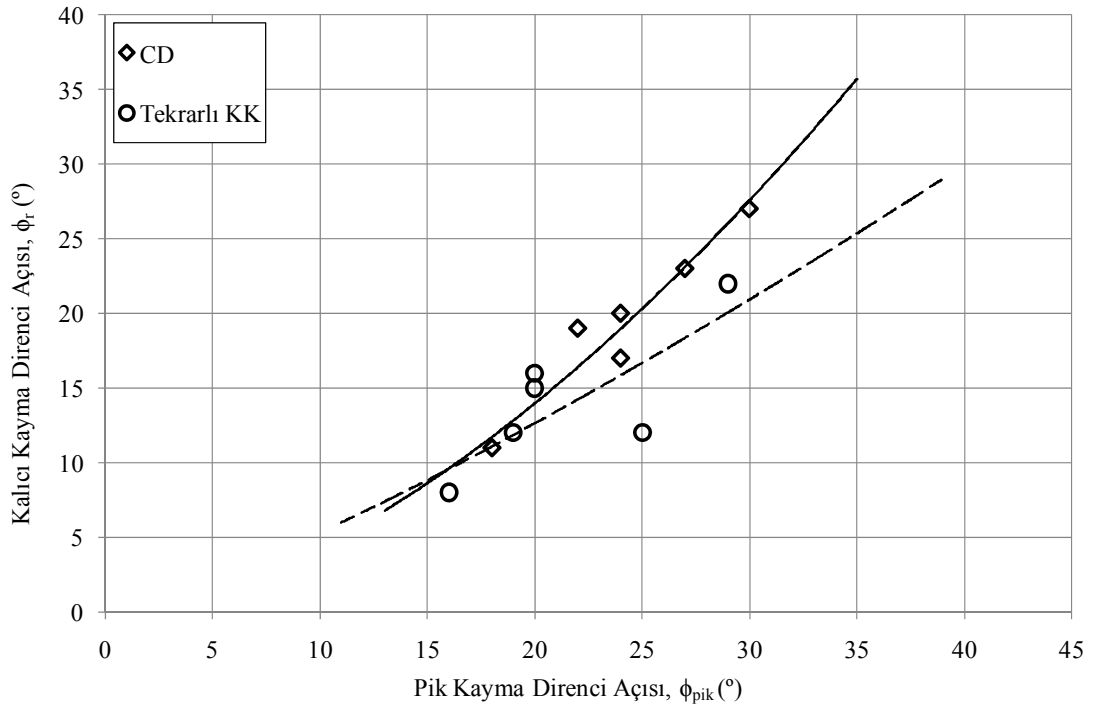


Şekil 5.19: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısının ince dane oranı ile değişimi

Çizelge 5.18: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı kayma direnci açısı ile ince dane oranı arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R ²
CD	$\phi_r = 36994 \text{İDO}^{-1.7}$	0.47
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 20828 \text{İDO}^{-2.15}$	0.63

Şekil 5.20’de konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sırasında elde edilen pik kayma direnci açıları ile kalıcı kayma direnci açıları arasındaki ilişki gösterilmiştir, bu ilişki için üs bağıntı ve korelasyon katsayısı Çizelge 5.19’da verilmiştir. Konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli deneyde %91 korelasyon katsayısına sahip olan bu ilişki, tekrarlı kesme kutusu deneyinde %60 korelasyon katsayısına sahiptir. Önceki ilişkilerin tersine pik kayma direnci açıları ile kalıcı kayma direnci açıları arasında doğru orantının var olduğu görülmektedir. Bu ilişkide de konsolidasyonlu drenajlı basınç deneyi ile elde edilen kayma direnci açılarının tekrarlı kesme kutusu ile elde edilen kayma direnci açılarından büyük olduğu görülmektedir.

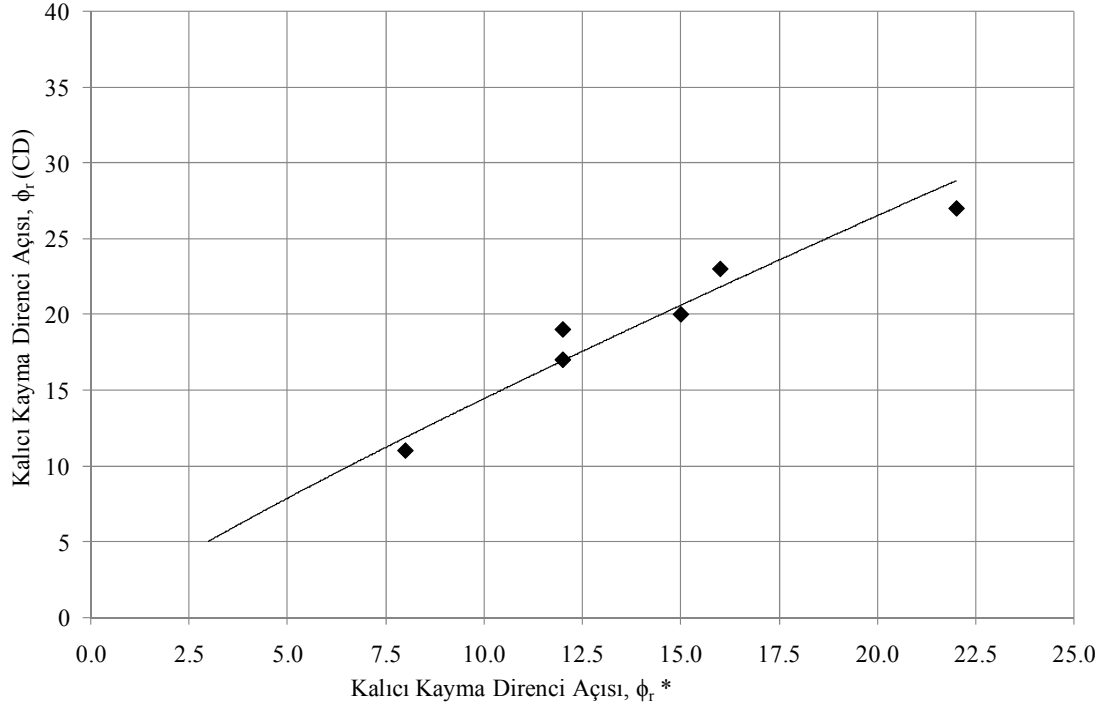


Şekil 5.20: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı ve pikkayma direnci açısının değişimi

Çizelge 5.19: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri için kalıcı ve pik kayma direnci arasındaki ilişki

Deney Türü	Bağıntı	R ²
CD	$\phi_r = 0.09(\phi_p)^{1.68}$	0.91
Tekrarlı K.K	$\phi_r = 0.30(\phi_p)^{1.24}$	0.60

Son bir inceleme ise tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen kalıcı kayma direnci açısı arasında yapılmıştır. Şekil 5.21’de bu ilişkinin grafiği görülmektedir Konsolidasyonlu-drenajlı basınç ve tekrarlı kesme kutusu deney yöntemleri ile kalıcı kayma direnci parametreleri belirlenip, karşılaştırıldığında uygulanan deformasyonun kısıtlı olmasından dolayı konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde daha büyük değerler elde edilmiştir.



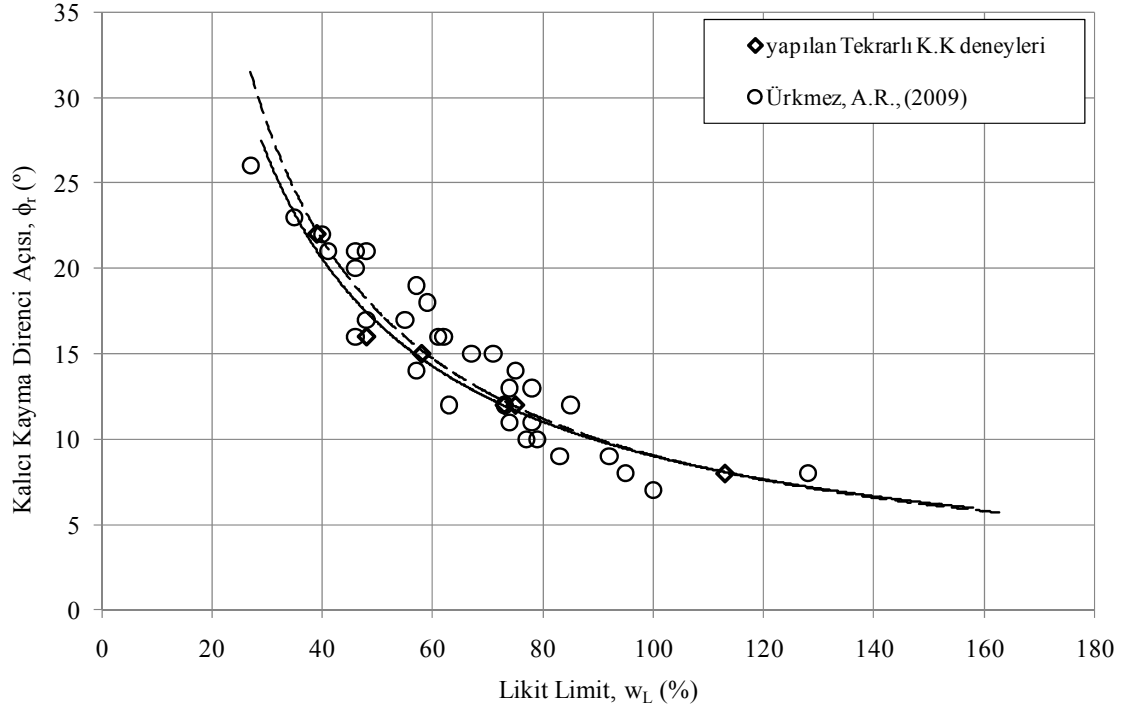
Şekil 5.21: CD ve Tekrarlı K.K. deneyleri sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma direnci açılarının değişimi

$$\phi_{r(CD)} = 1.92(\phi_r^*)^{0.88}, \quad R^2=0.94 \quad (5.1)$$

İki farklı yöntem ile bulunan kalıcı kayma direnci açıları arasında birkaç derecelik fark oluşmaktadır. Ancak bu fark stabilite analizlerinde güvenlik sayılarında önemli değişikliklere neden olabilir.

5.5 Geçmişteki Çalışmalarla Karşılaştırma Yapılması

Çalışma kapsamında elde edilen kalıcı kayma direnci açıları ile likit limit arasındaki ilişkiler geçmişteki Suzuki (2005), Mesri(1986) ve Cancelli (1977)'nin yaptıkları çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca Ürkmez (2009)'in yaptıkları tekrarlı kesme kutusu sonuçlarıyla çalışma kapsamında yapılan tekrarlı kesme kutusu sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.22'de çalışma kapsamında yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile Ürkmez (2009)'in yaptıkları tekrarlı kesme kutusu sonuçları grafik olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi çalışma kapsamında yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile Ürkmez (2009)'in yaptığı tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları arasında uyumluluk vardır



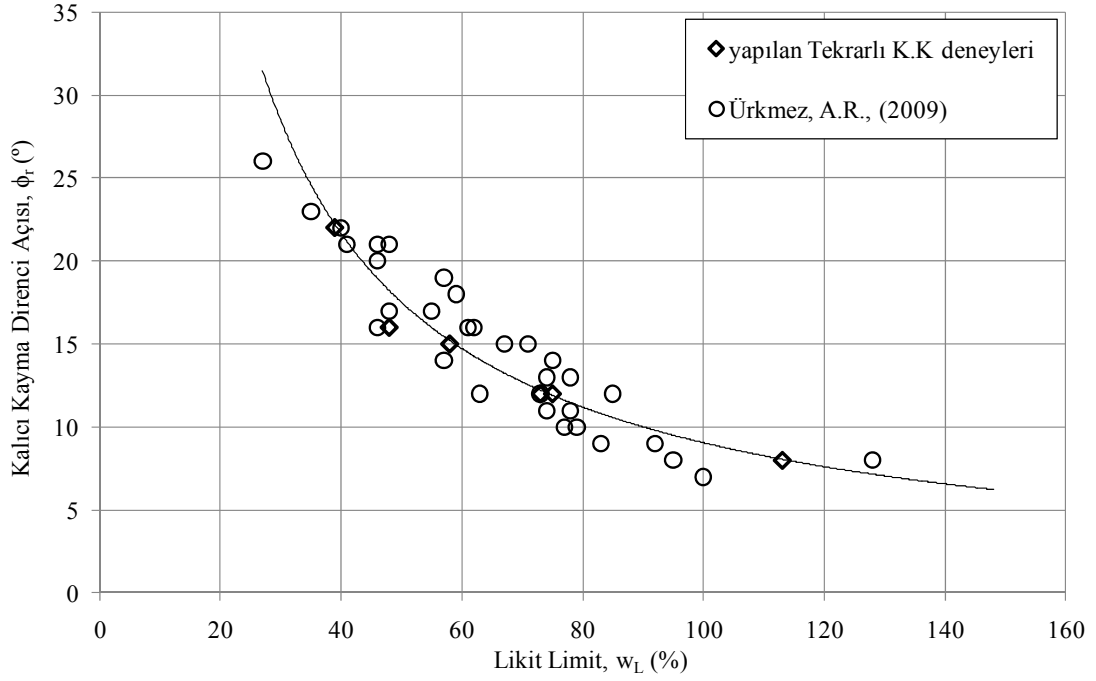
Şekil 5.22: Yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının Ürkmez, A.R., (2009) in tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile karşılaştırılması

Çizelge 5.20: Ürkmez, A.R., (2009) Tekrarlı K.K deney sonuçları ve yapılan çalışmadaki Tekrarlı K.K sonuçları

Deney Türü	Bağıntı	R ²
Çalışma	$\phi_r = 686.76w_L^{-0.95}$	0.93
İyisan ve diğ. (2009)	$\phi_r = 723.97w_L^{-0.95}$	0.85

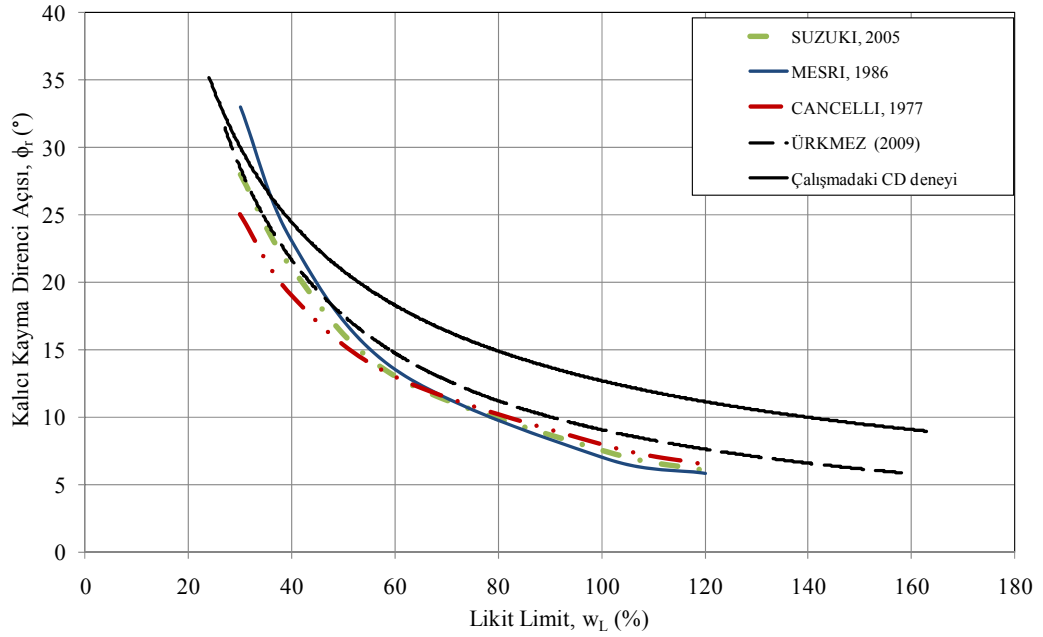
Çalışma kapsamında yapılmış tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile Ürkmez (2009)'in yaptıkları tekrarlı kesme kutusu birlikte değerlendirilip Şekil 5.23' de grafiği verilmiştir. 6 numune üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile Ürkmez (2009)'in yaptığı tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları birleştirildiğin de %86 korelasyon katsayısına sahip bir denklem elde edilmiştir, ve bağıntı (5.2)'de verilmiştir.

$$\phi_r = 774w_L^{-0.97}, \quad R^2=0.86 \quad (5.2)$$



Şekil 5.23: Yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının Ürkmez (2009) nin tekrarlı kesme kutusu çalışmaları ile birlikte değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında elde edilen kalıcı kayma direnci açıları ile likit limit arasındaki ilişkiler geçmişteki Ürkmez (2009), Suzuki (2005), Mesri(1986) ve Cancelli (1977)'nin yaptıkları çalışmalar sonucu elde ettikleri kalıcı kayma direnci ile karşılaştırılmış Şekil 5.24'de verilmiştir.



Şekil 5.24: Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deney sonuçlarının geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması

Görüldüğü bu çalışma sonucunda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları İyisan ve diğ. (2009), Suzuki (2005), Mesri (1986) ve Cancelli (1977) tarafından önerilen değerle benzerlik göstermektedir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre diğer çalışmalarda da görülebildiği gibi likit limitin artması kalıcı kayma direnci açısını düşürmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ve likit limit ilişkisi incelendiğinde, Likit limit değeri %35'den küçük olan numuneler için Mesri (1986)'nin altında, likit limit değeri %35'den büyük olan numuneler için ise üzerindedir. Bütün bu karşılaştırmalar göz önünde bulundurulduğunda Şekil 5.24'de görülen farklılıkların deney yöntemlerinden kaynaklandığı söylenebilir. Ürkmez, A.R., (2009)'in tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları, yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi çalışmasını altında yer almaktadır. Bunun nedeni, deney yöntemlerinin farklı olmasıdır ve konsolidasyonlu-drenajlı deneyde uygulanabilir şekil değiştirmenin sınırlı olmasından dolayı kalıcı kayma direncinin elde edilmesi için gerekli şekil değiştirmenin uygulanamamasından kaynaklanmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada killi zeminlerin konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yöntemi ile kalıcı kayma direnci parametreleri elde edilmiş ve kalıcı kayma direnci açıları ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Özellikle kalıcı kayma direnci açısının likit limit (w_L), plastik limit (w_p), plastisite indisi (I_p) ve pik kayma direnci (ϕ_{pik}) ile değişimi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda çalışmada likit limiti %24 ile %113 arasında, plastisite indisi %12 ile %79 arasında bulunan 15 adet zemin numunesi üzerinde 0.035 mm/dak hızında konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve seçilen 6 adet zemin numunesi üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmış sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açıları ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Onbeş farklı numune üzerinde yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ile numunelerin geoteknik özellikleri arasında Çizelge 6.1’de verilen ilişkiler elde edilmiştir.

Çizelge 6. 1: Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen kalıcı kayma direnci açısı ve zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişki

Değişken	Bağıntı	R (%)
w_L	$\phi_r = 263w_L^{-0.65}$	88
w_p	$\phi_r = 209w_p^{-0.76}$	77
I_p	$\phi_r = 112I_p^{-0.5}$	88
w_p/w_L	$\phi_r = 51(w_p/w_L)^{0.6}$	71
KY	$\phi_r = 46(KY)^{-0.3}$	72
ϕ_p	$\phi_r = 0.5\phi_p^{1.1}$	89

a) Likit limitin, plastik limitin, plastisite indisinin, artmasıyla kalıcı kayma direnci açısının düştüğü gözlemlenmiştir. Buna karşılık, artan pik kayma direnci açısı ile kalıcı kayma direncinin arttığı görülmüştür.

b) Konsolidasyonlu–drenajlı deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma direnci açıları tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma direnci açılarından daha büyüktür ve aralarında bağıntı (6.1)’de verilen ilişki vardır.

$$\phi_{r(CD)} = 1.92 \times \phi_{r(TKK)}^{0.88}, \quad R^2=0.94 \quad (6.1)$$

c) Konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli deney sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci açısı, tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu belirlenen kalıcı kayma direnci açısından büyüktür. Bunun nedeni, deney yöntemlerinin farklı olması ve konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli basınç deneyin de numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırının bulunmasıdır.

d) Yapılan çoklu regresyon analizleri sonucunda kalıcı kayma direnci açısı ile, pik kayma direnci açısı ve likit limit, plastisite indisi arasında bağıntı (6.2) ve (6.3) elde edilmiştir.

$$\phi_r = 7 \times I_p^{-0.28} \times \phi_p^{0.63} \quad (6.2)$$

$$\phi_r = 11.2 \times w_L^{-0.35} \times \phi_p^{0.62} \quad (6.3)$$

e) Bu çalışma ile önceki çalışmanın sonuçları birlikte incelendiğinde belirli bir uyum olduğu görülmüştür. Yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler elde edilmiştir.

Sonuç olarak, zeminlerin kalıcı kayma direnci belirlenmiş, kalıcı kayma direnci açısının pratik amaçlar doğrultusunda tahmin edilebilmesi için endeks özellikleri ile kalıcı kayma direnci arasında bağıntılar elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında sınırlı sayıda yapılmış konsolidasyonlu–drenajlı üç eksenli basınç ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına dayanan bu bağıntıların, daha sonra yapılacak deneylerle elde edilecek yeni veriler ile değiştirilmesi ve geliştirilmesi mümkün olabilmektedir.

KAYNAKLAR

ASTM, D 4767, 2004. "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, USA.

ASTM, D698 , 2000. Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standart Effort, USA

ASTM, D 6467, 2000. "Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Ataç, A.E., 2009. "Plastisitenin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi", Yüksek lisans tezi, İTÜ Merkez Kütüphanesi.

Barden, L., and Mcdermont J. W., 1965. "The Use of Free Ends in Triaxial Test", Proc. A.S.C.E., 91: SM6:1-23.

Bardet, J.P., 1997. "Experimental Soil Mechanics", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andersen, A., Brown, J.D., 1971. "A New Ring Shear Apparatus and Its Application to The Measurement of Residual Strength", Geotechnique, Vol.21, No.4, 273-328.

Bromhead, E.N., and Curtis, R.D., 1983. "A Comparison of Alternative Methods of Measuring The Residual Strength of London Clay", Ground Engineering, 16(4), 39-41.

Cancelli, A., 1977. "Residual Shear Strength and Stability Analysis of a Landslide in Fissured Overconsolidated Clays." Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., Vol. 16, pp. 193-197

Chandler, R.J., and Apted, J.P., 1988. "The Effect of Weathering on The Strength of London clay". Quarterly Journal of Eng. Geol.& Hydr., Vol. 21; pp. 59-68

Craig, R.F., 1987. "Soil Mechanics", Fourth Edition, English Language Book Society / Van Nostrand Reinhold, London.

Das, B.M., 2002. "Principles of Geotechnical Engineering", Student Edition, Brooks/Cole, Thomson Learning, USA.

Damoerin, D., Soepandji B.S. and Siregar O.S.O., 2003. "Degree of Saturation Effect on The Shear Streghth of Compacted Expansive Soil in Consolidated Undrained Test", World Scientific Publishing.

Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M. and Nakamura, S., 2002. "Strength Recovery from Residual State in Reactivated Landslides", Geotechnique, Vol.52, No.9, 683-686.

Hawkins, A.B. and Privett, K.D., 1985. "Measurement and Use of Residual Shear Strength of Cohesive Soils", Ground Engineering, page 22-29.

Head, K.H., 2006. "Manual of soil laboratory testing", Vol.2, Shear Strength Tests, Second Edition, Pentech Press, London.

- İyisan, R., Çevikbilen G., Koltuk S., Yılmaz E.,** 2006. “Sıkıştırılmış Zeminlerde Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi” Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği onbirinci ulusal kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- İyisan, R., Çevikbilen. G., Hatipoğlu M., Ürkmez A.R., Ataç A.E.,** 2009. “Yüksek Plastisiteli Killerin Kalıcı Kayma Direnci” 3. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Junaideen, S.M., Tham, L.G., Law, K.T., and Lee, C.F.** 2010. “Behaviour of Recomacted Residual Soils in A Constant Shear Stress Path”, *Geotechnique*, Vol.47, 648-661.
- Kayabali, K., Tufenkci, O.,** 2010. “Shear Strength of Remolded Soils at Consistency Limits”. *Geotechnique*, Vol.47, 259-266.
- Koltuk, S.,** 2005. “Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi”. Yüksek lisans tezi, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E., and Vaughan, P.R.** 1981. “The Drained Residual Strength of Cohesive Soils”, *Geotechnique*, Vol.31, No.2, 181-213.
- Mesri, G. and Cepeda-Diaz, A.F.,** 1986. “Residual Shear Strength of Clays and Shales”, *Geotechnique*, Vol.36, No.2, 269-274.
- Mesri, G. and Shahien, M.,** January 2003. “Residual Shear Strength Mobilized in First Time Slope Failures”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Mitchell, J.K.,** 1993. “Fundamentals of Soil Behaviour”, Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Önalp, A., Arel, E.,** 2004. “Geoteknik Bilgisi II Yamaç ve Şev’lerin Mühendisliği”, Birsan Yayınevi Ltd. Şti., Cağaloğlu, İstanbul.
- Önalp, A.,** 2007. “Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği”, Birsan Yayınevi Ltd. Şti., Cağaloğlu, İstanbul.
- Özaydın, K.,** 2000. “Zemin Mekaniği”, Birsan Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul.
- Sadrekamiri, A., and Olson, S.M.,** 2010. “Particle Damage Observed in Ring Shear Tests on Sands”, *Geotechnique*, Vol. 47, 497-515, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Skempton, A.W.,** 1954. “The Pore-Pressure Coefficients A and B”, *Geotechnique*, Vol. 4, 143-147, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Skempton, A.W.,** 1964. “Long-Term Stability of Clay Slopes”, *Geotechnique*, Vol. 14, No.2, 75-101, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Skempton, A.W.,** 1970. “First Time Slides in Overconsolidated Clays”, *Geotechnique*, Vol.20, No.3, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Skempton, A.W.,** 1985. “Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and The Laboratory”, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, 3-18, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Smith, G.N. and Smith, Ian G.N.,** 1998. “Elements of Soil Mechanics”, Seventh Edition, Blackwell Science.
- Stark, T.D. and Hisham, T.E.,** 1994. “Drained Residual Strength of Cohesive Soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.5.

- Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J. and Hasinaga, K., 2005.** “Physical and Chemical Index Properties of Residual Shear Strength of Various Soils”<http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/561/01.pdf>
- Tiwari, B. and Marui, H., 2005.** “Comparision of Residual Shear Strengths from Back Analysis and Ring Shear Tests on Undisturbed and Remolded Specimens”, *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, Vol.131, No.9, pp 1071-1079.
- Tiwari, B. and Marui, H., 2005.** “A New Method for The Correlation of Residual Shear Strength of The Soil with The Mineralogical Composition”, *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, Vol.131, No.9, pp 1139-1150.
- Towsend, F.C., Gilbert, P.A., 1973.** “Tests to Measure Residual Strength of Some Clay Shales”, *Geotechnique*, Vol.23, 267-271.
- Ürkmez, A.R., 2009.** “Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Yöntemi ile Belirlenmesi”, Yüksek lisans tezi, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Vithana, S.B., Gibo, S., Nakamura, S., and Kimura S., 2009.** “Influence of Overconsolidation Ratio on Residual Shear Strength of Miaowan and Kamenose Landslide Soils under Laboratory Conditions”, *The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*.
- Wesley, L.D., 1977.** “Shear Strength Properties of Halloysite and Allophone Clays in Java, Indonesia”, *Geotechnique*, Vol.27, 125-136.
- Wesley, L.D., 2003.** “Residual Strength of Clays and Correlations Using Atterberg Limits”, *Geotechnique*, Vol.53, No.7, 669-672.
- Yılmaz, E., 2006.** “Zeminlerin Endeks Özelliklerinin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi”, Yüksek lisans tezi, İTÜ Merkez Kütüphanesi

EK A

Elek ve Hidrometre Analizleri

EK A

A.1 Elek ve Hidrometre Analizleri

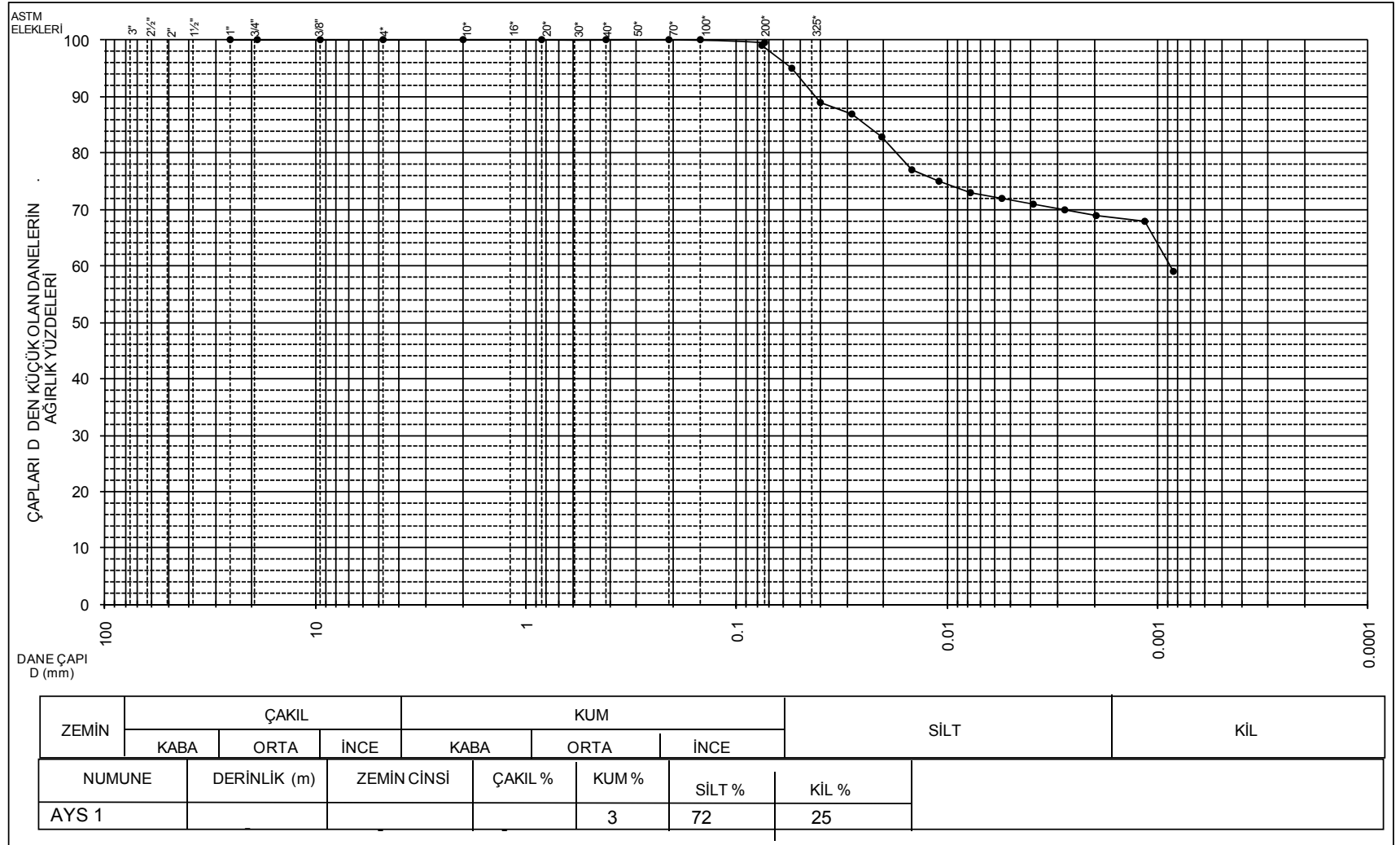
A.1.1 AYS-1 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A. 1: AYS-1 numunesi Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.050	0	333.9	100
3/8	9.530	0	333.9	100
3/16	4.760	0	333.9	100
10	2.000	0	333.9	100
20	0.840	0	333.9	100
40	0.420	0	333.9	100
70	0.210	0	333.9	100
100	0.150	0	333.9	100
200	0.075	0	333.9	100

Çizelge A. 2: AYS-1 hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{h1}	$R_h = R_{h1} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde(%)	Ana Numuneye Göre Yüzde(%)
0.25	50.0	51.0	49.5	8.01	0.075	99	99
0.5	48.0	49.0	47.5	8.34	0.055	95	95
1	45.0	46.0	44.5	8.83	0.040	89	89
2	44.0	45.0	43.5	8.99	0.028	87	87
4	42.0	43.0	41.5	9.31	0.020	83	83
8	39.0	40.0	38.5	9.80	0.015	77	77
15	38.0	39.0	37.5	9.96	0.011	75	75
30	37.0	38.0	36.5	10.13	0.007	73	73
60	36.5	37.5	36.0	10.21	0.006	72	72
120	36.0	37.0	35.5	10.29	0.004	71	71
240	35.5	36.5	35.0	10.37	0.003	70	70
480	35.0	36.0	34.5	10.45	0.002	69	69
1440	34.5	35.5	34	10.43	0.001	68	68



Şekil A. 1: AYS-1 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

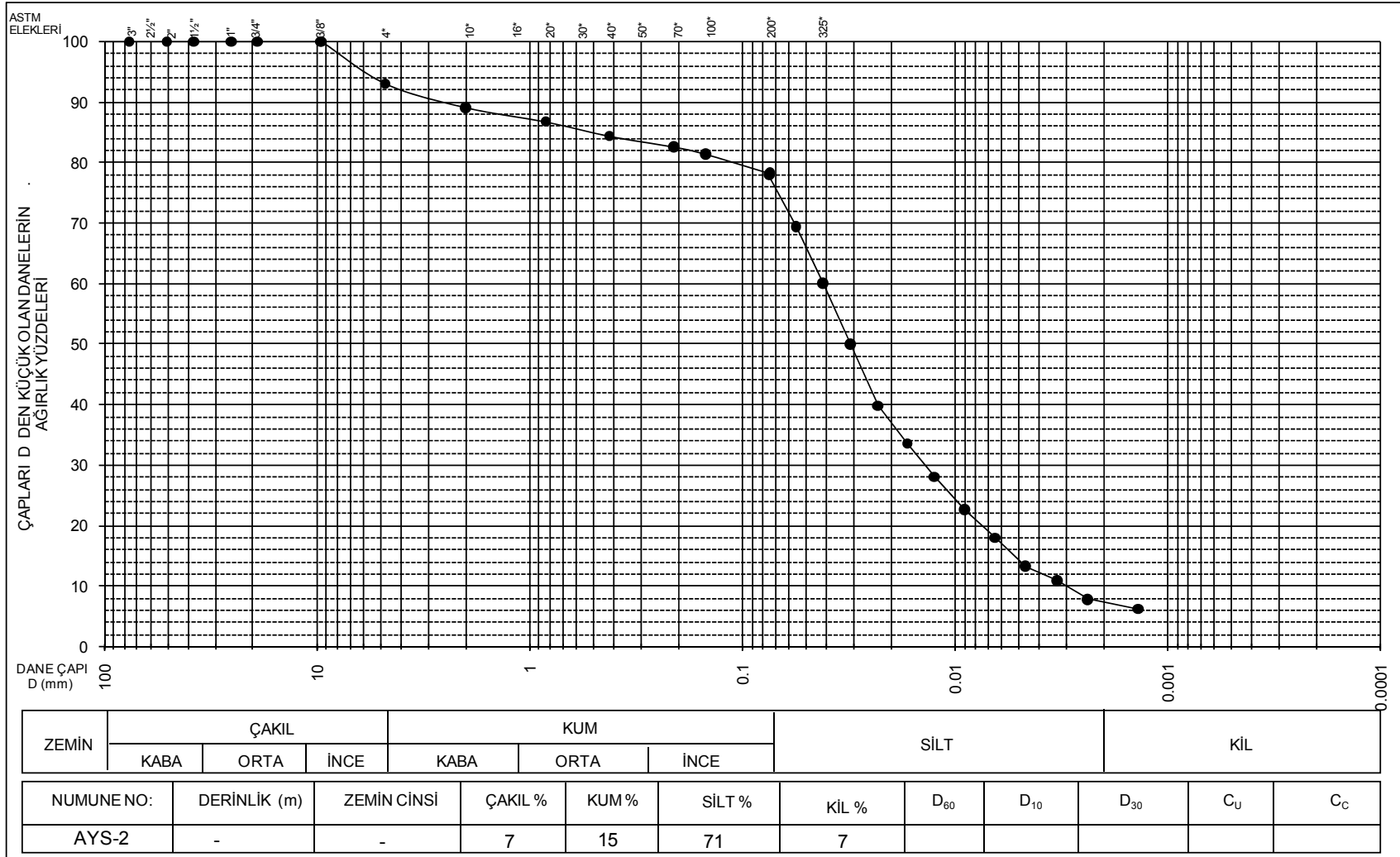
A.1.2 AYS-2 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A. 3: AYS-2 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.05	0	424.2	100
3/8	9.53	0	424.2	100
3/16	4.76	29.5	394.7	93
10	2.00	16.6	378.1	89
20	0.84	10	368.1	87
40	0.42	10	358.1	84
70	0.21	7.5	350.6	83
100	0.15	5	345.6	81
200	0.075	13.5	332.1	78

Çizelge A. 4: AYS-2 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{h1}	$R_h = R_{h1} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde (%)	Ana Numuneye Göre Yüzde (%)
0.25	51.5	52.5	50.0	7.77	0.075	100	78
0.5	46.0	47.0	44.5	8.67	0.056	89	69
1	40.0	41.0	38.5	9.64	0.042	77	60
2	33.5	34.5	32	10.70	0.031	64	50
4	27.0	28.0	25.5	11.75	0.023	51	40
8	23.0	24.0	21.5	12.40	0.017	43	34
15	19.5	20.5	18.0	12.97	0.012	36	28
30	16.0	17.0	14.5	13.54	0.009	29	23
60	13.0	14.0	11.5	14.03	0.006	23	18
120	10.0	11.0	8.5	14.51	0.005	17	13
240	8.5	9.5	7.0	14.76	0.003	14	11
480	6.5	7.5	5.0	15.08	0.002	10	8
1440	5.5	6.5	4.0	15.24	0.001	8	6



Şekil A. 2: AYS-2 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

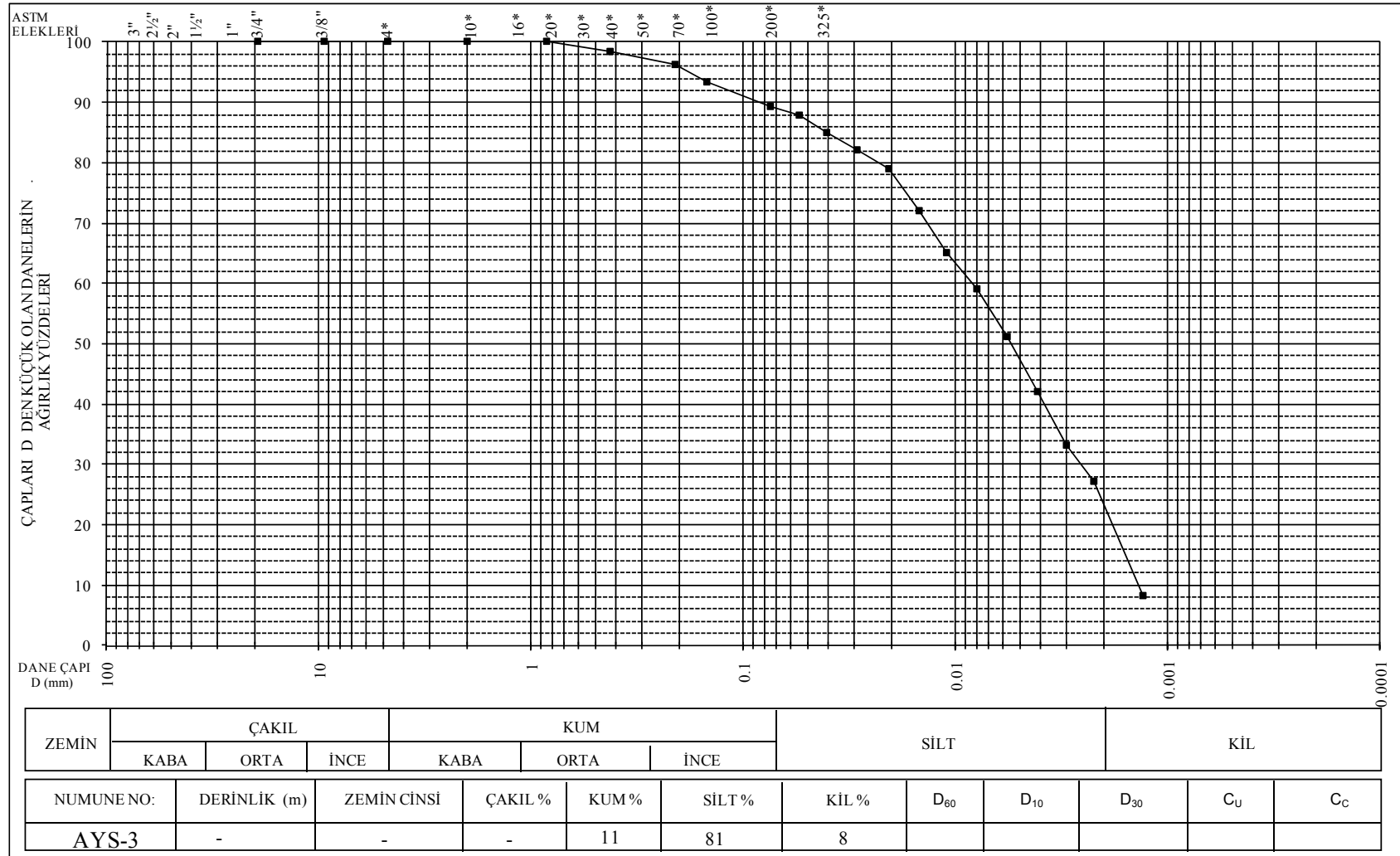
A.1.3 AYS-3 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A. 5: AYS-3 numunesi elek analizi

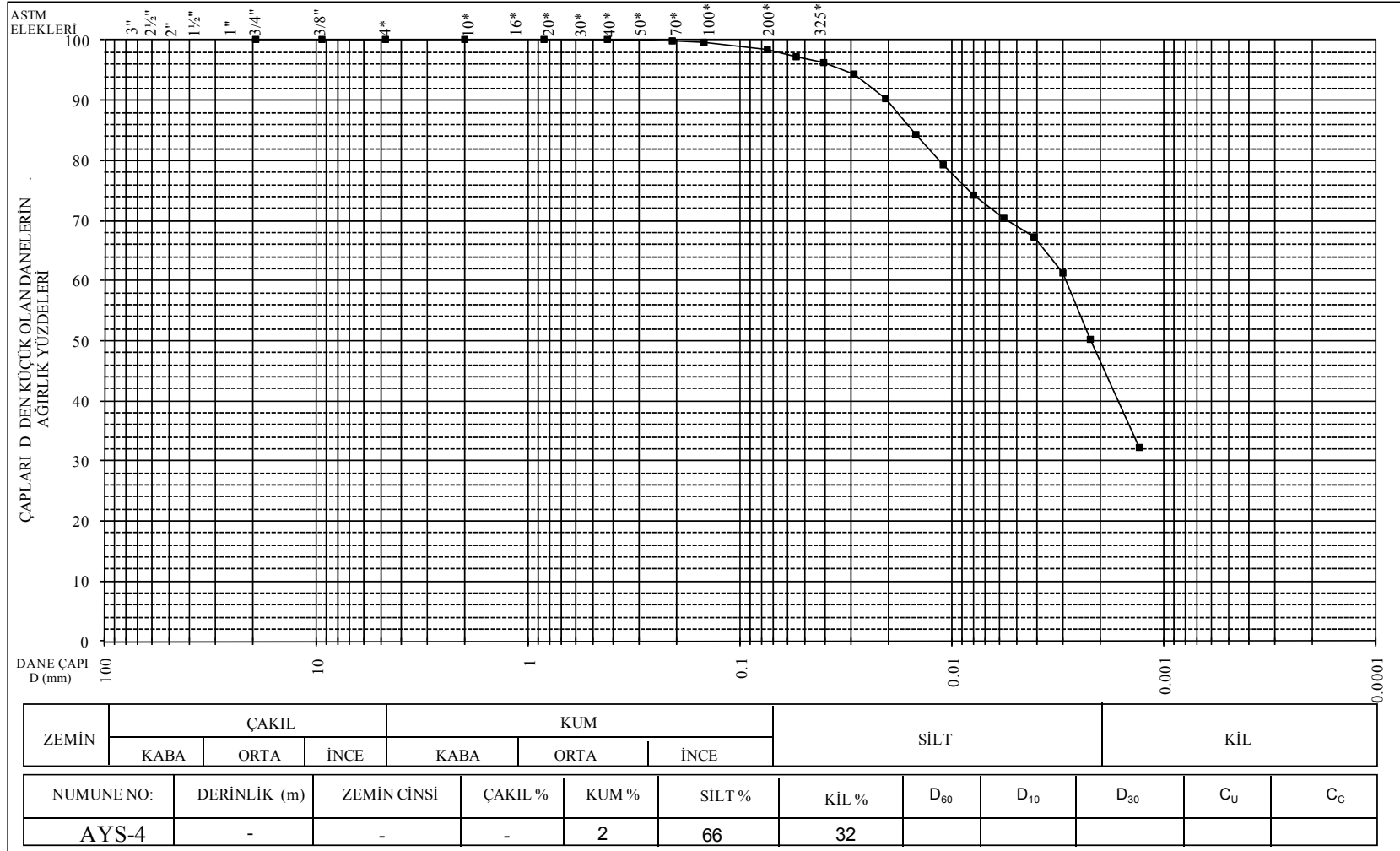
Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.05	0	466.3	100
3/8	9.53	0	466.3	100
3/16	4.76	0	466.3	100
10	2.00	0	466.3	100
20	0.85	0	466.3	100
40	0.425	7.2	459.1	98
70	0.212	10.3	448.8	96
100	0.150	13.2	435.6	93
200	0.075	19.3	416.3	89

Çizelge A. 6: AYS-3 numunesi Hidrometre analizi

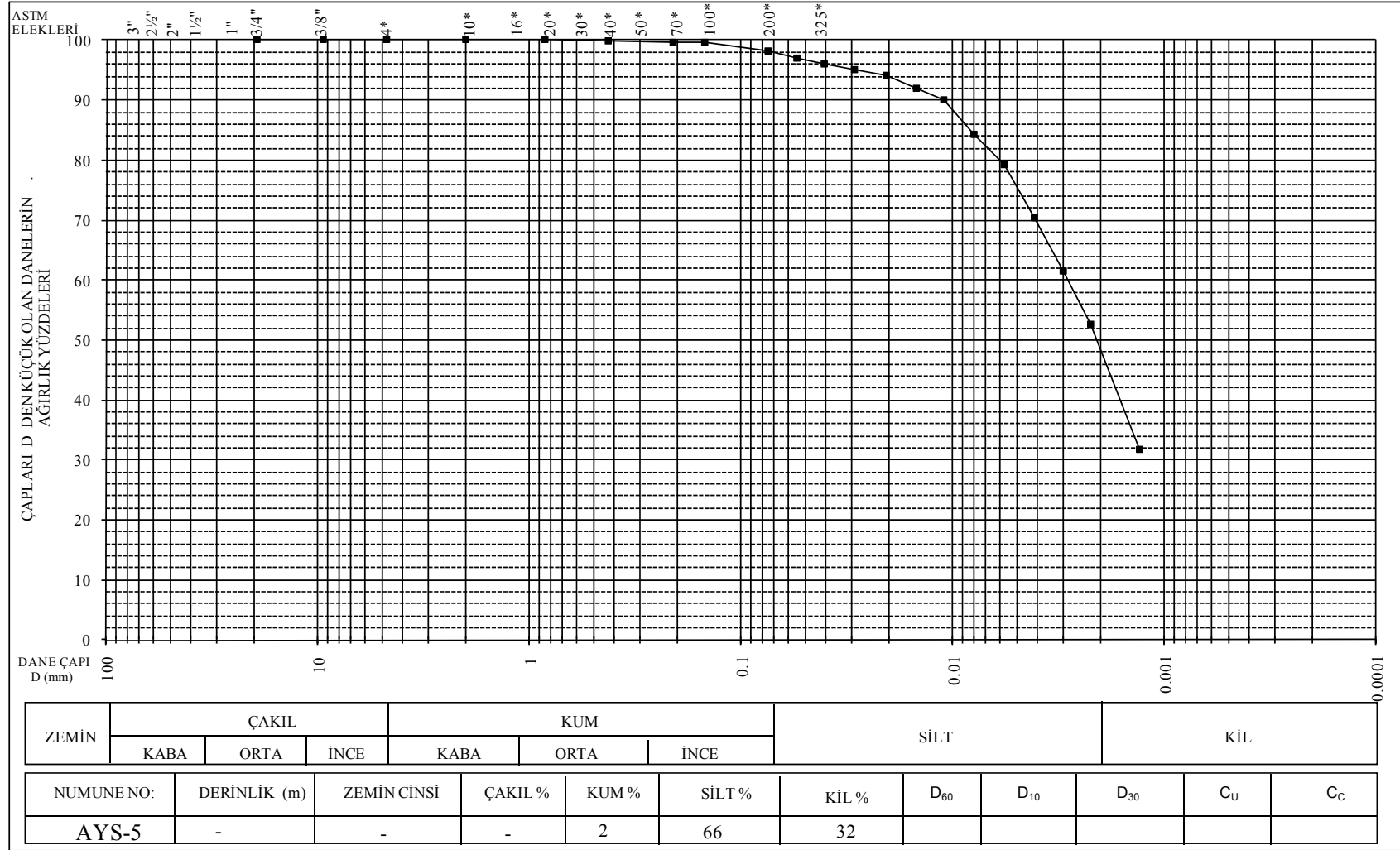
t (dakika)	Hid. Okuması R_{h1}	$R_h = R_{h1} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde (%)	Ana Numuneye Göre Yüzde (%)
0.25	46	47.0	44.65	9.04	0.075	89.3	89
0.5	45.5	46.5	44.15	9.13	0.057	88.3	88
1	44	45.0	42.65	9.37	0.041	85.3	85
2	42.5	43.5	41.15	9.61	0.029	82.3	82
4	41	42.0	39.65	9.86	0.021	79.3	79
8	37.5	38.5	36.15	10.43	0.015	72.3	72
15	34	35.0	32.65	10.99	0.011	65.3	65
30	31	32.0	29.65	11.48	0.008	59.3	59
60	27	28.0	25.65	12.13	0.006	51.3	51
120	22.5	23.5	21.15	12.86	0.004	42.3	42
240	18	19.0	16.65	13.59	0.003	33.3	33
480	15	16.0	13.65	14.08	0.002	27.3	27
1440	5.5	6.5	4.15	15.63	0.001	8.3	8



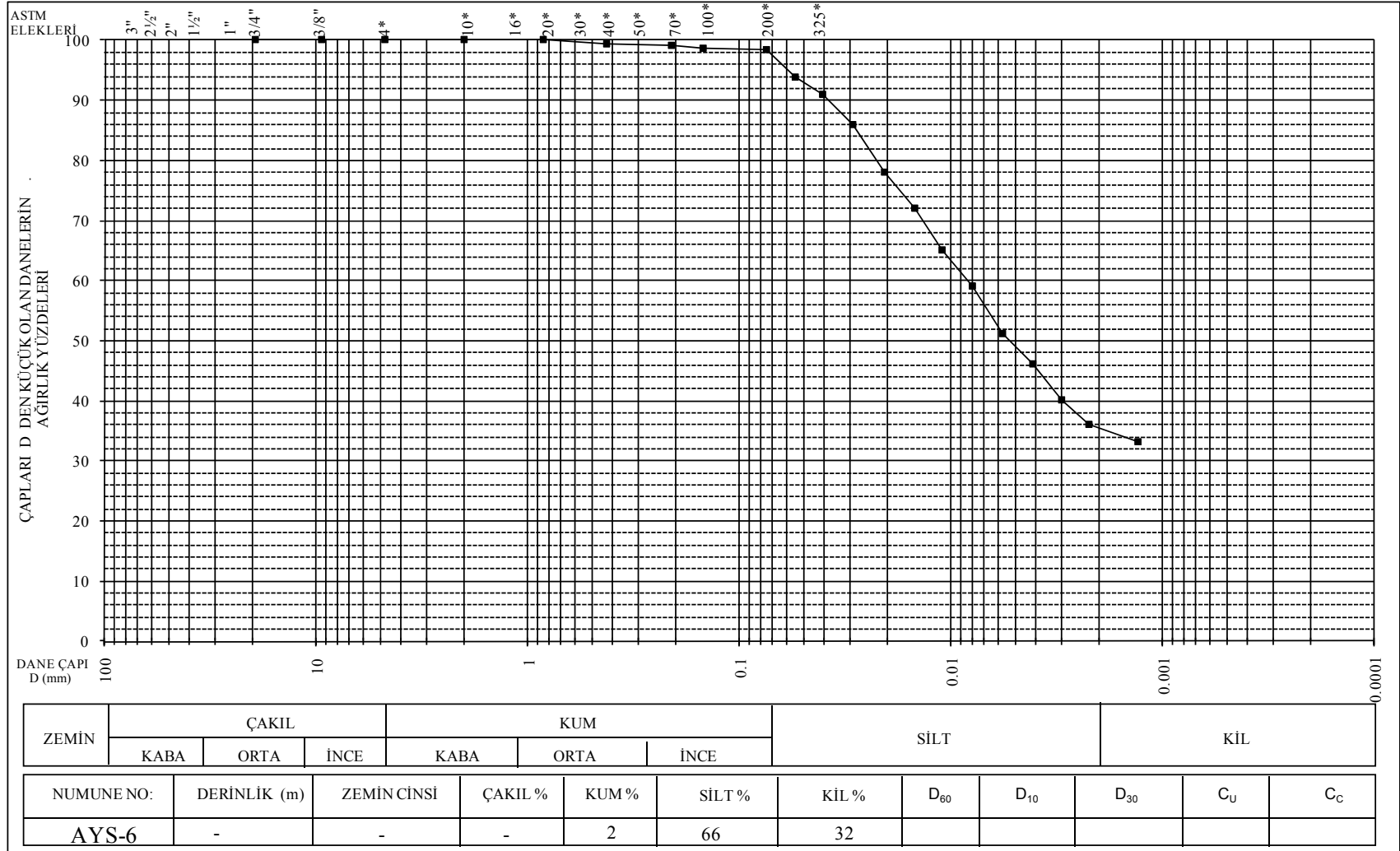
Şekil A. 3: AYS-3 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



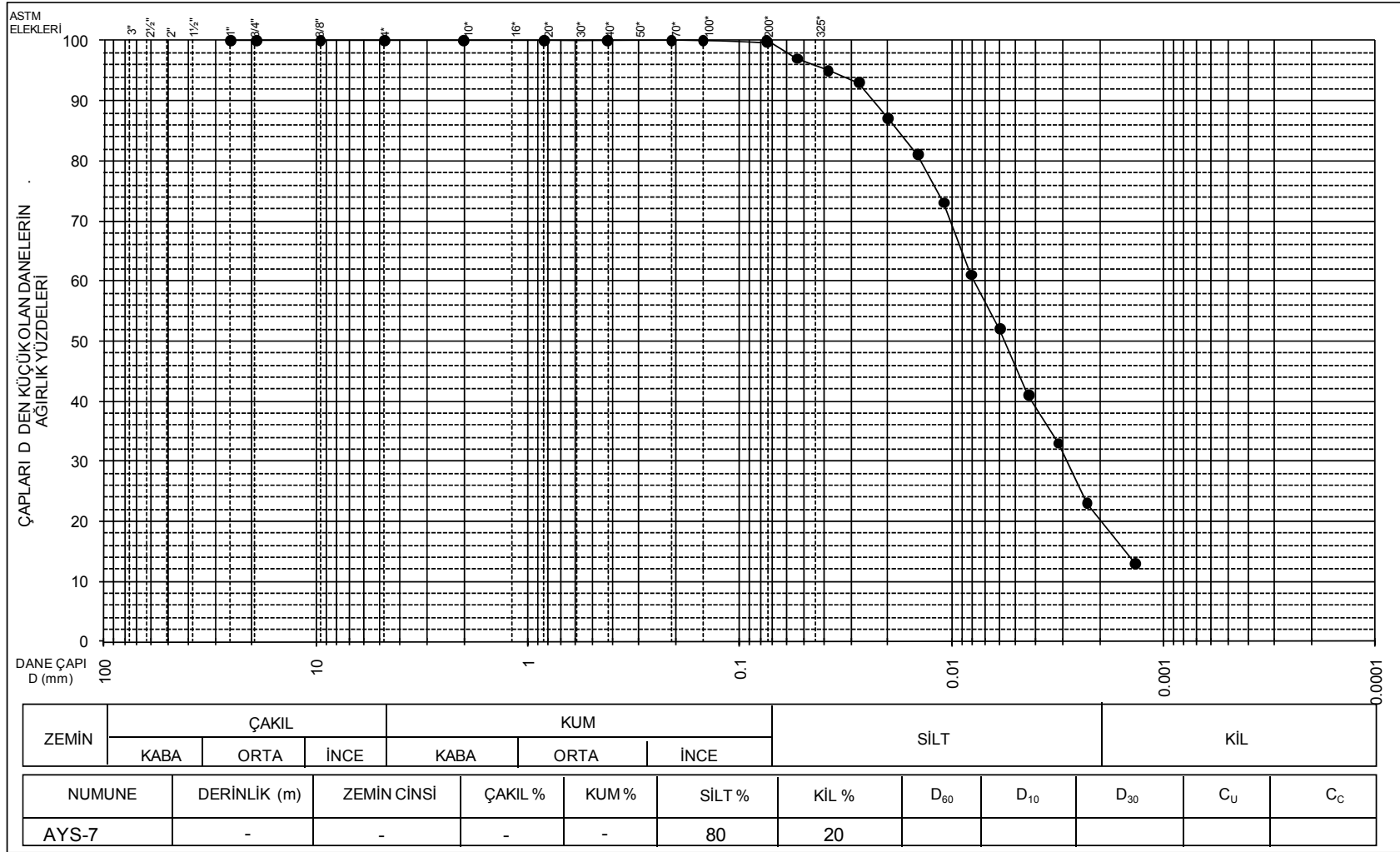
Şekil A. 4: AYS-4 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



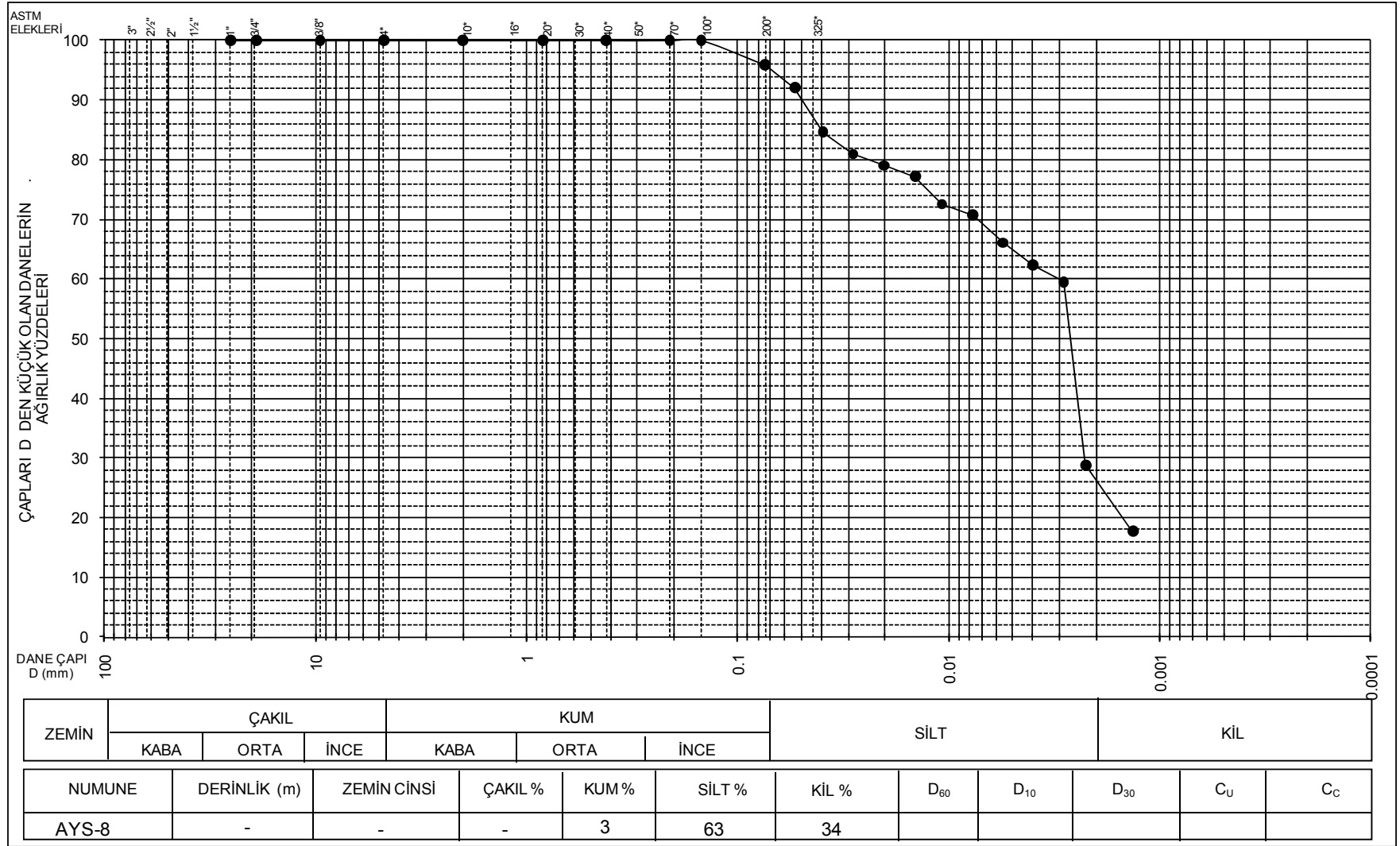
Şekil A. 5: AYS-5 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



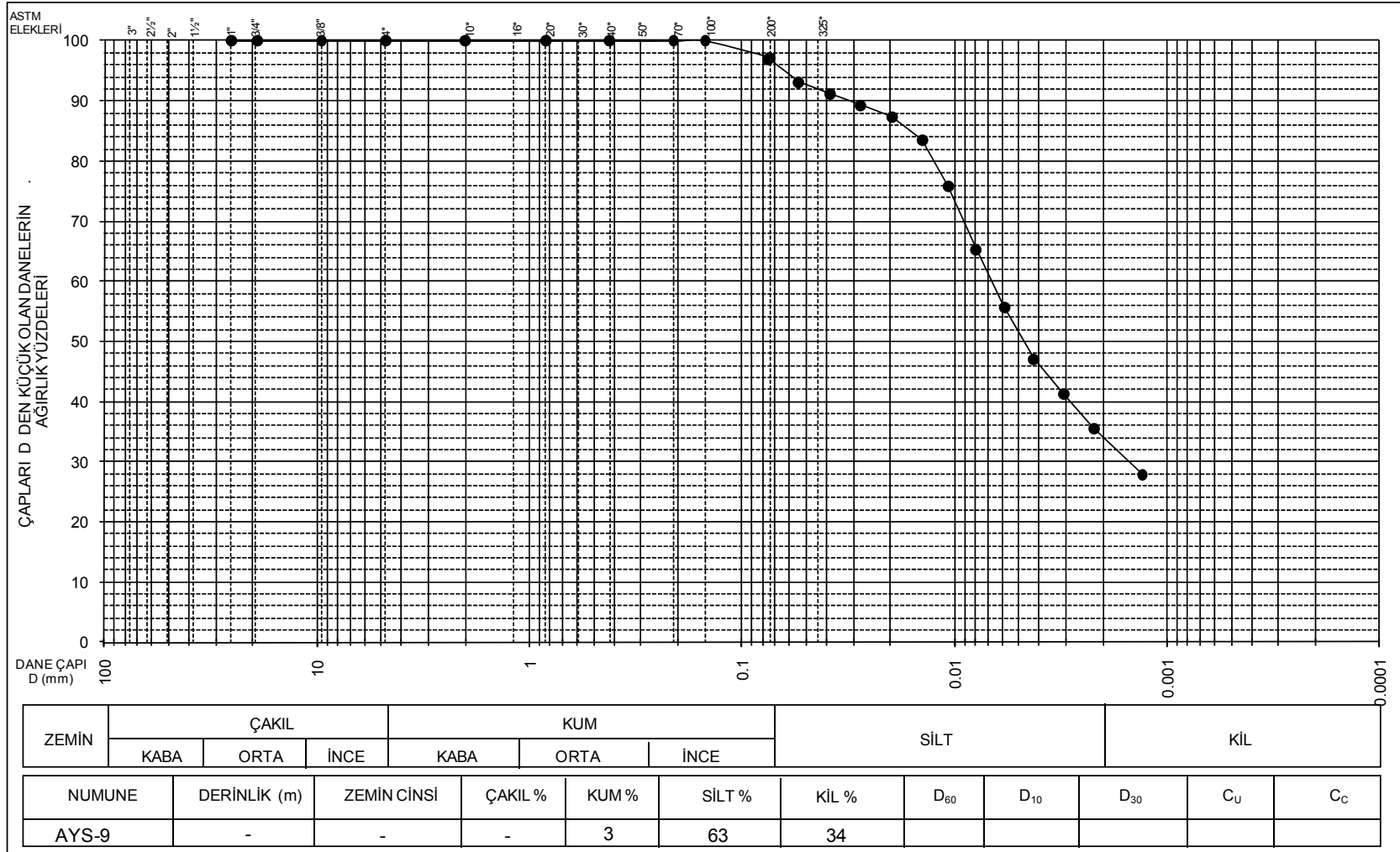
Şekil A. 6: AYS-6 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



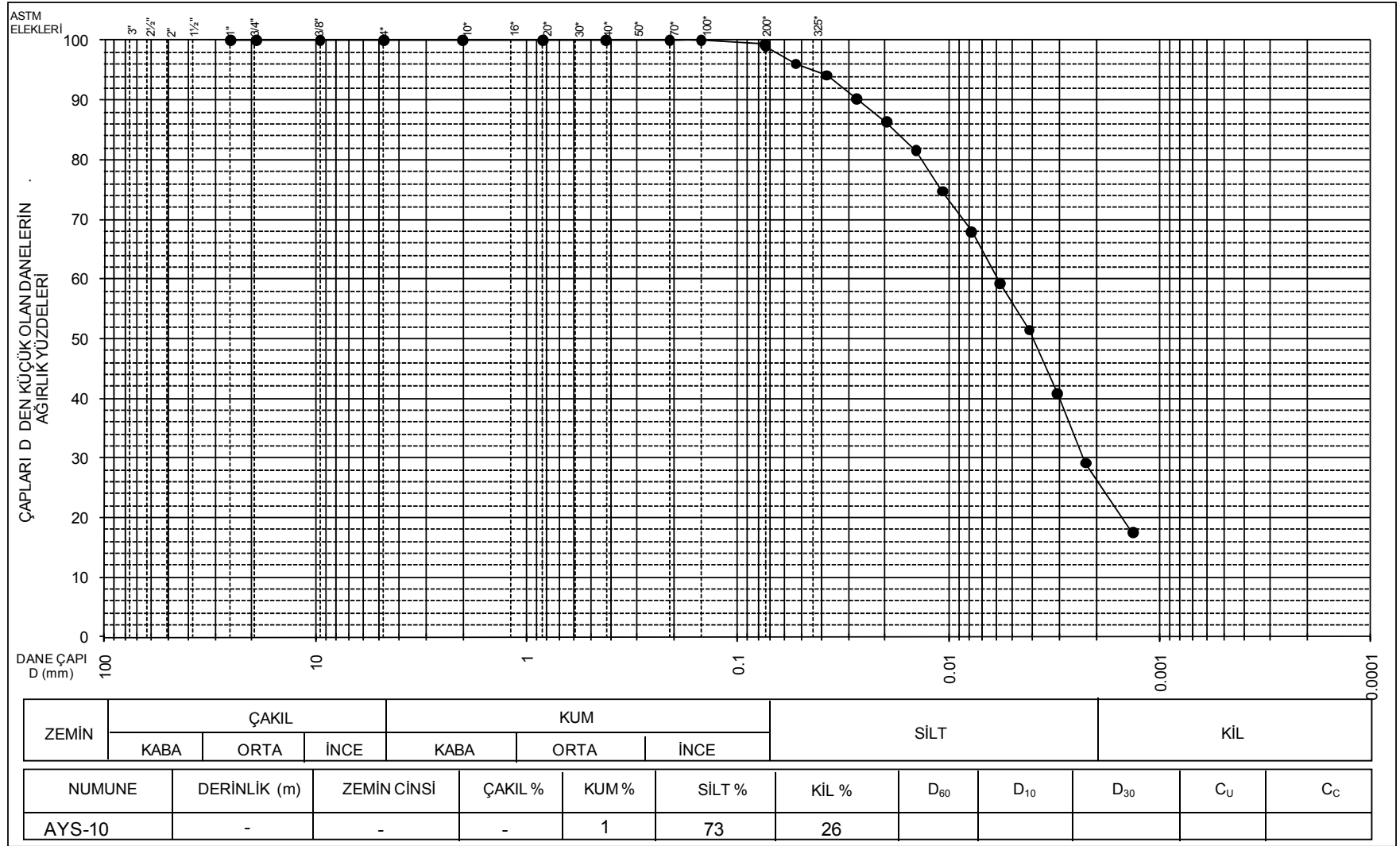
Şekil A. 7: AYS-7 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



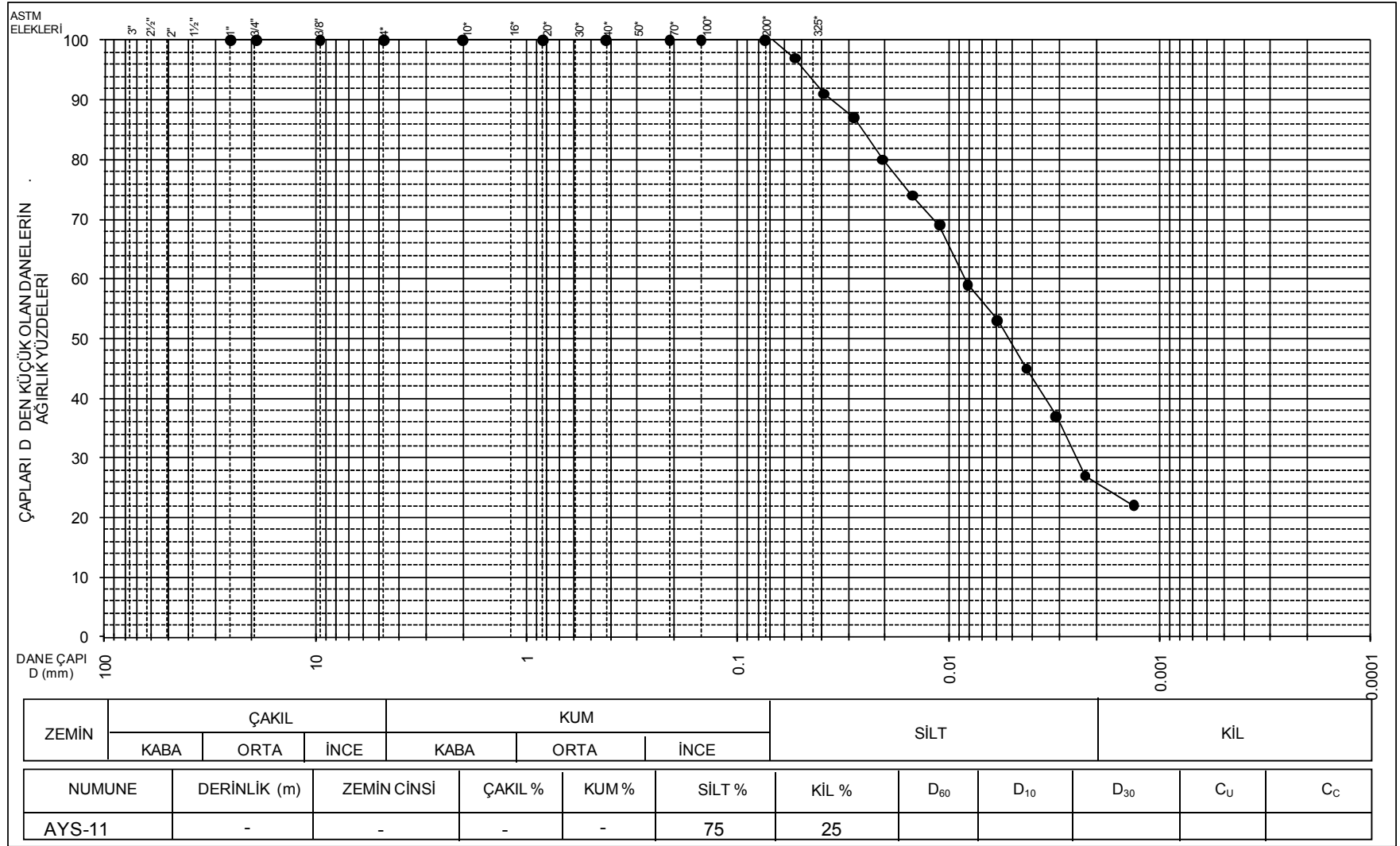
Şekil A. 8: AYS-8 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



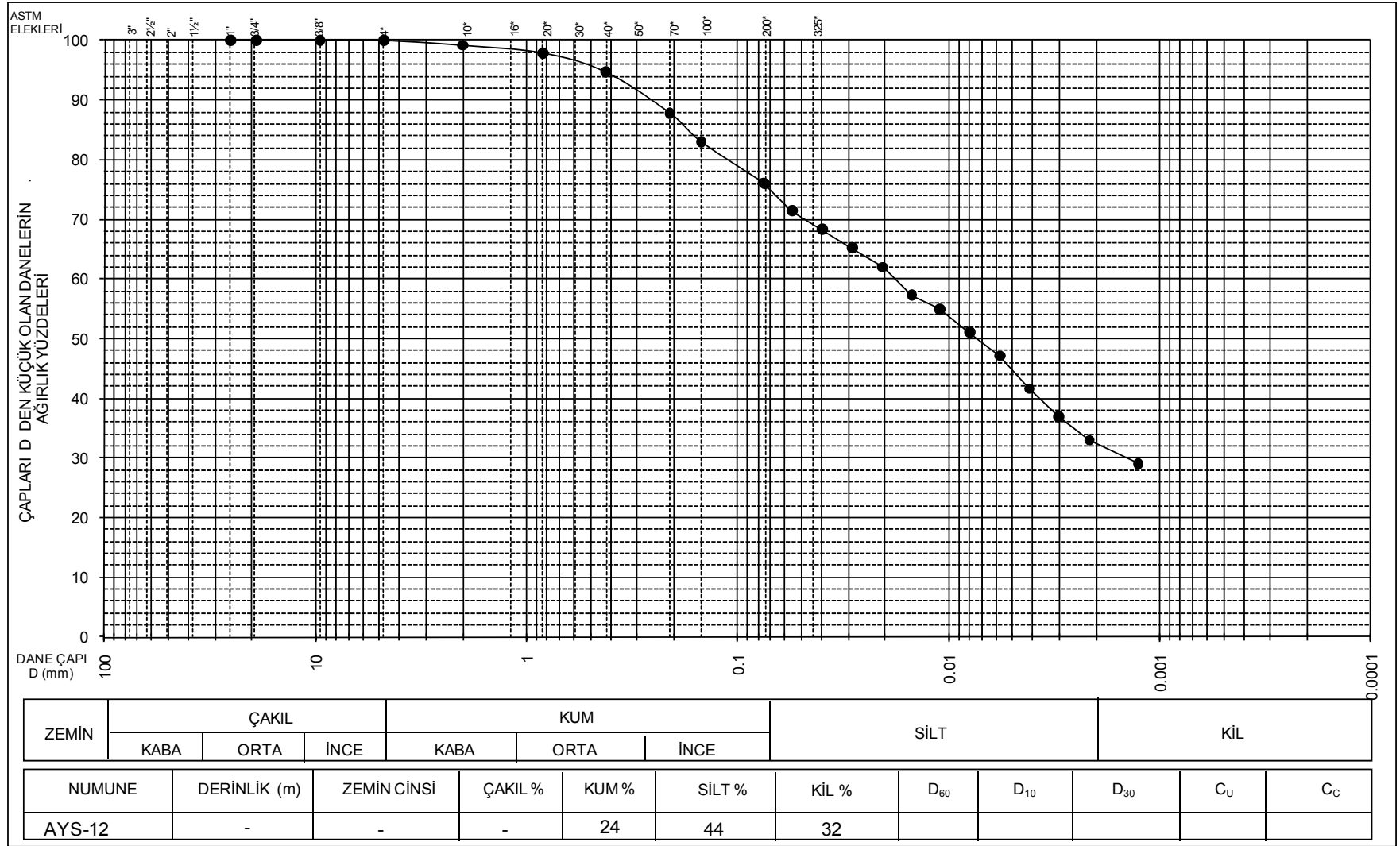
Şekil A. 9: AYS-9 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



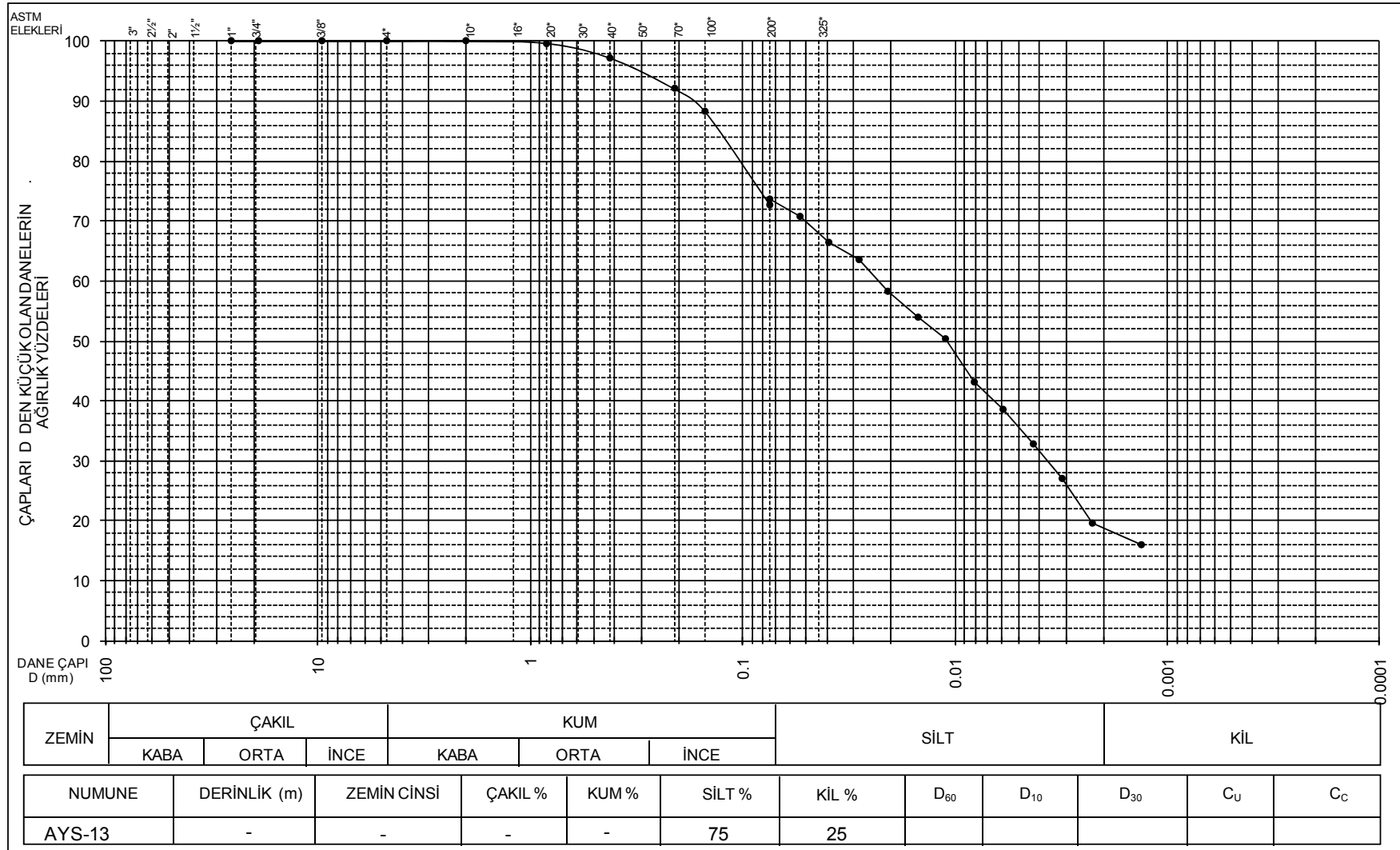
Şekil A. 10: AYS-10 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



Şekil A. 11: AYS-11 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



Şekil A. 12: AYS-12 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi



Şekil A. 13: AYS-13 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

EK B

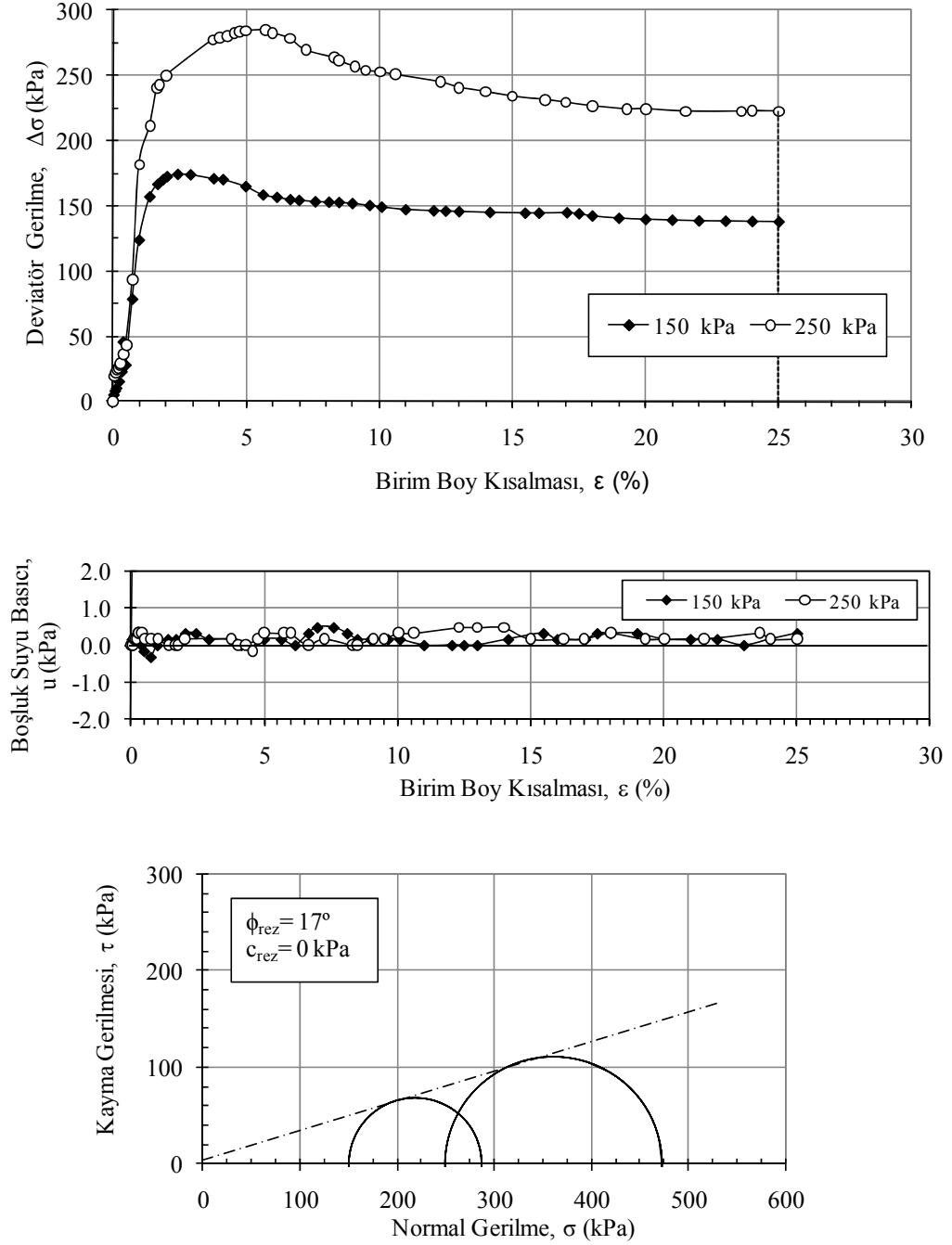
B.1 Konsolidasyonlu – Drenajlı Üç Eksenli Deneyleri

B.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri

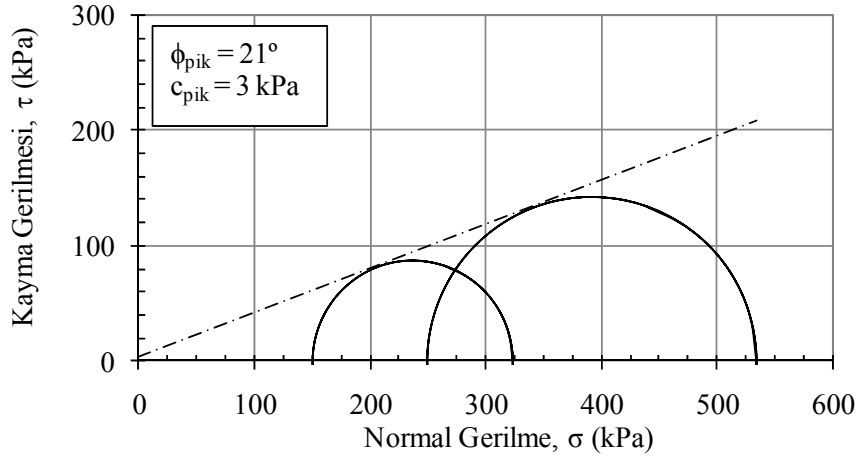
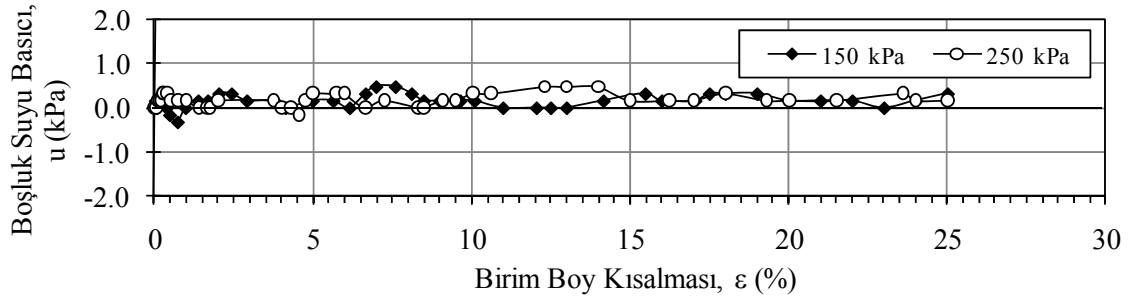
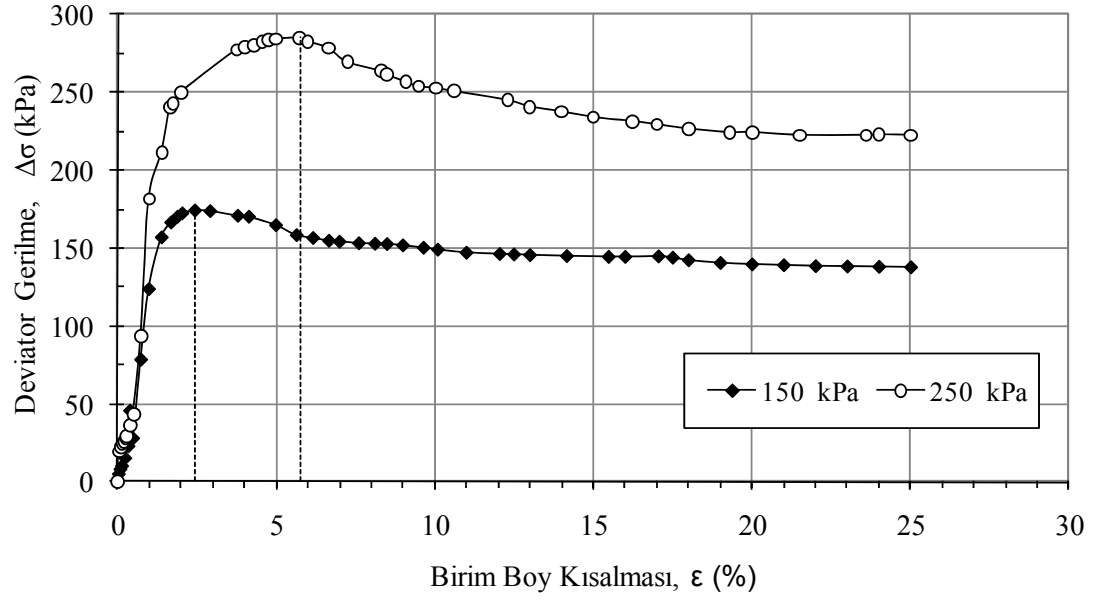
EK B

B.1 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyleri

B.1.1 AYS-1 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

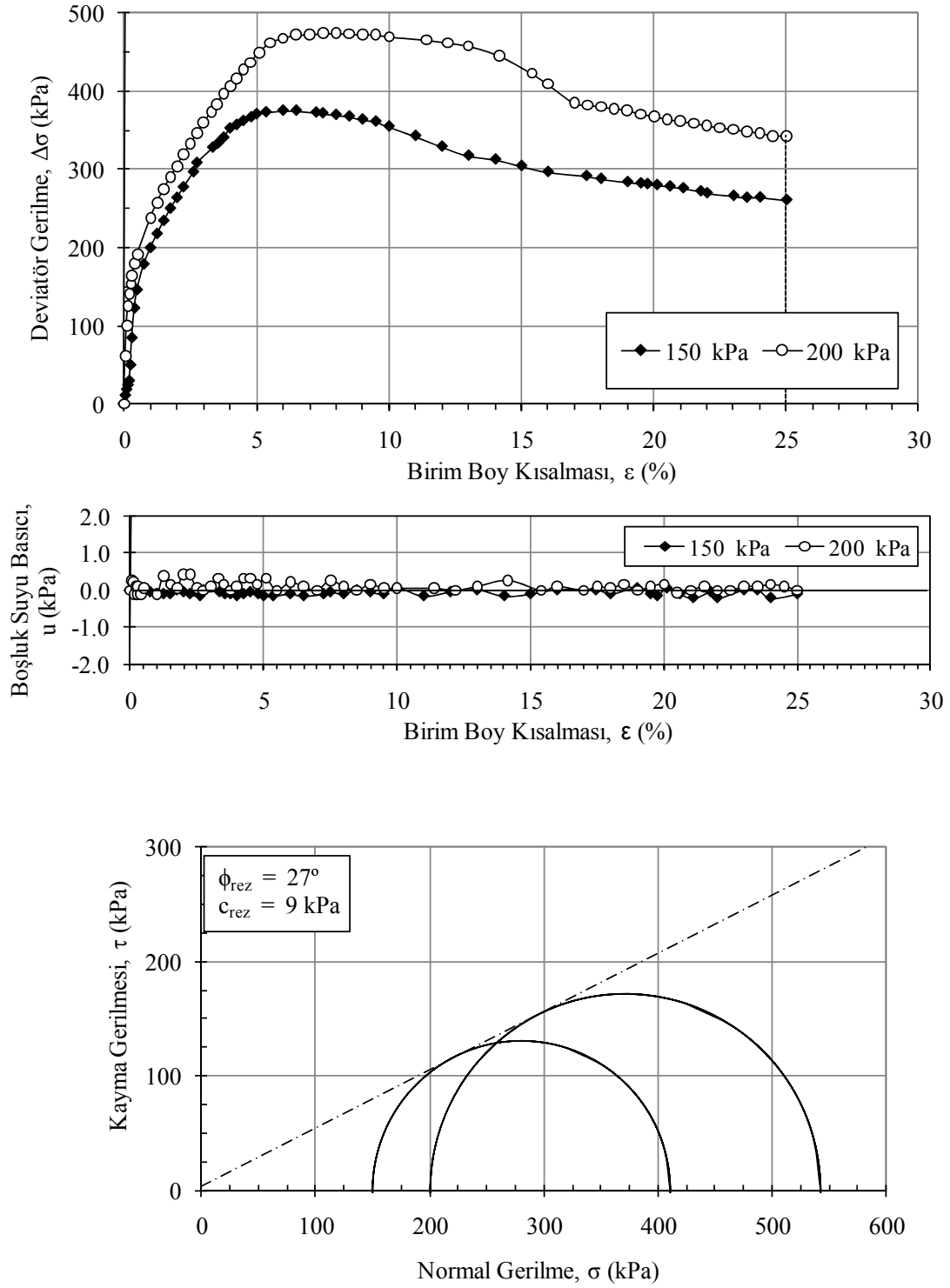


Şekil B. 1: AYS-1 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr daireesi

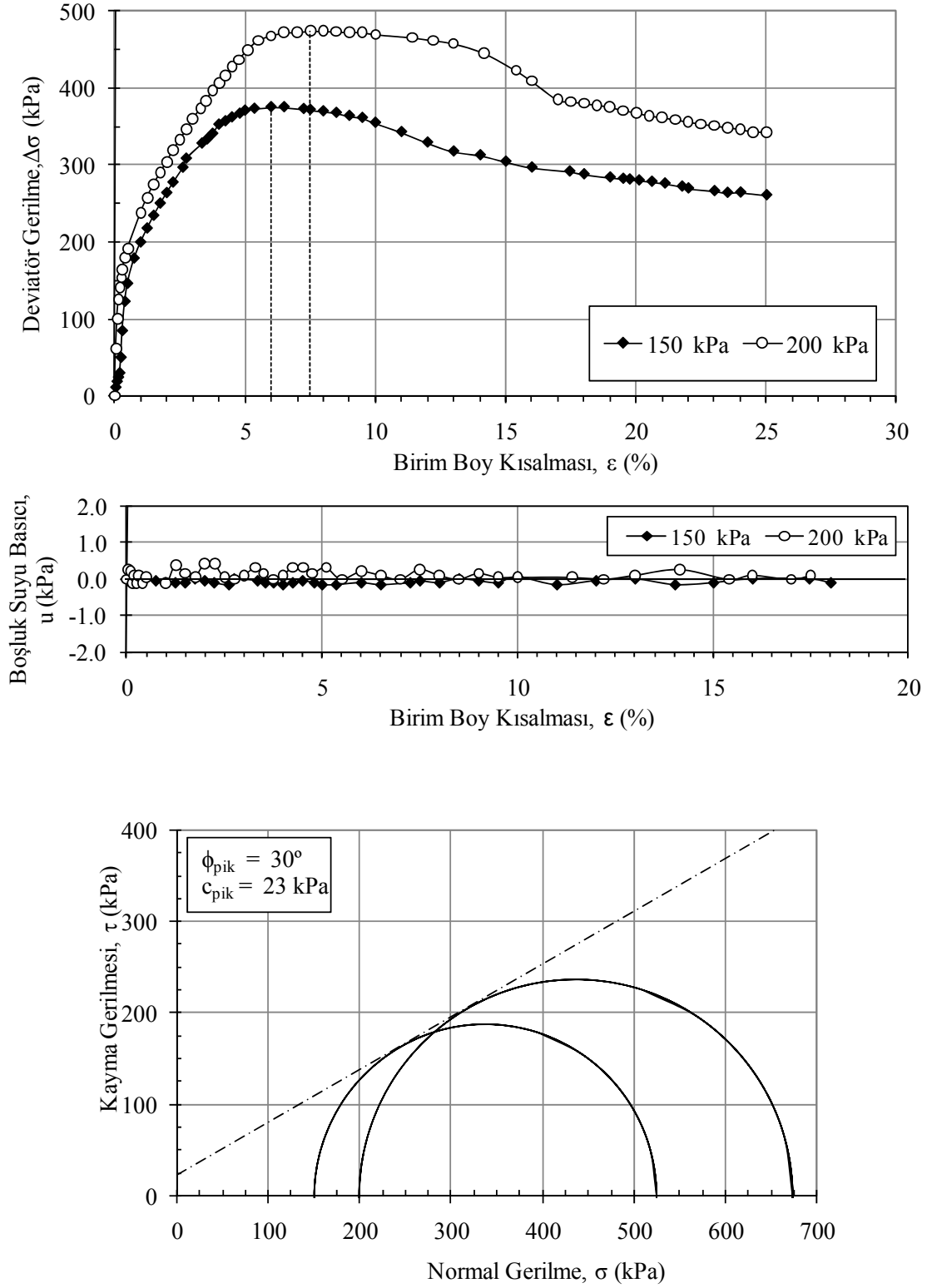


Şekil B. 2: AYS-1 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireesi

B.1.2 AYS-2 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

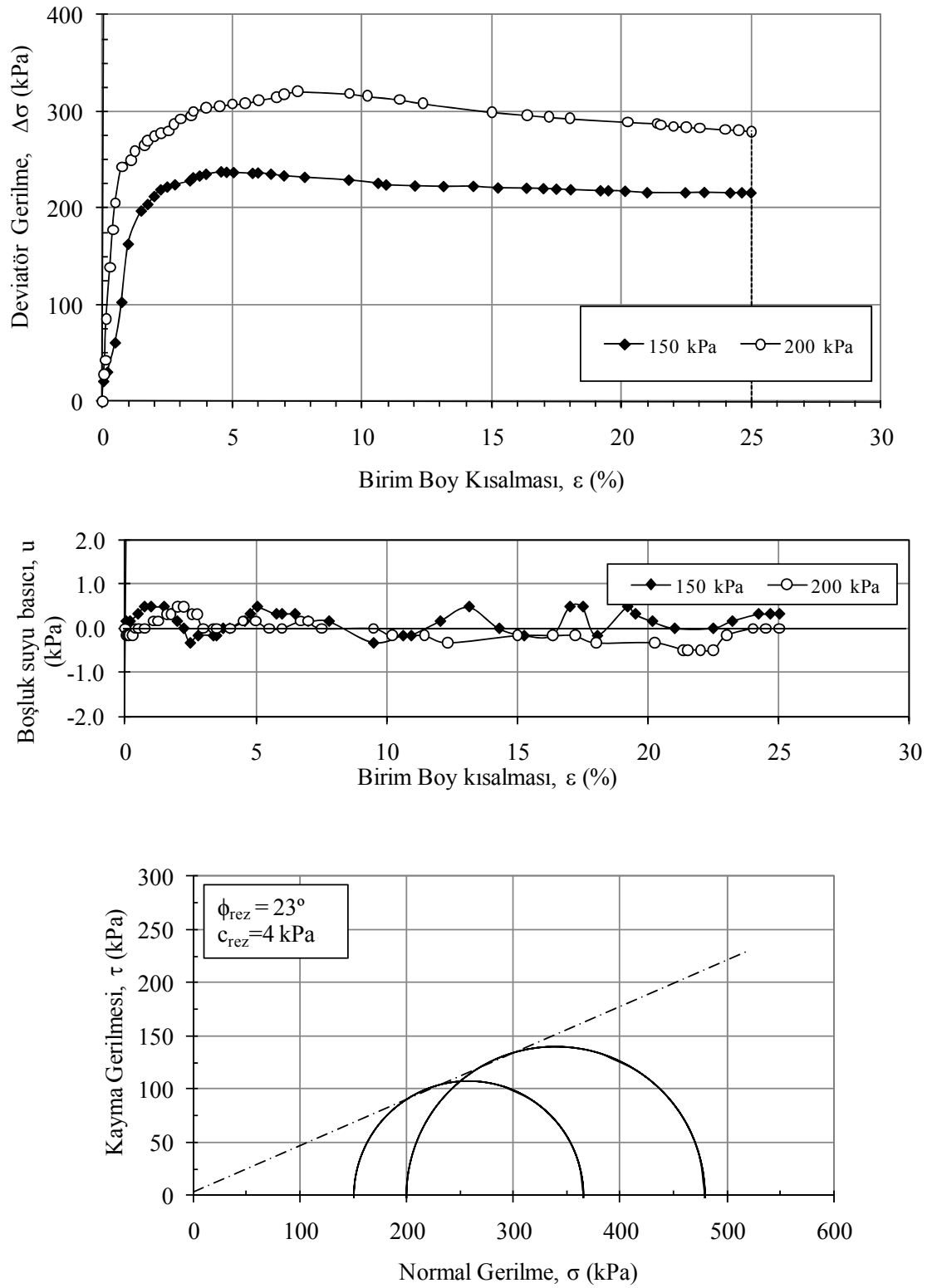


Şekil B. 3: AYS-2 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi

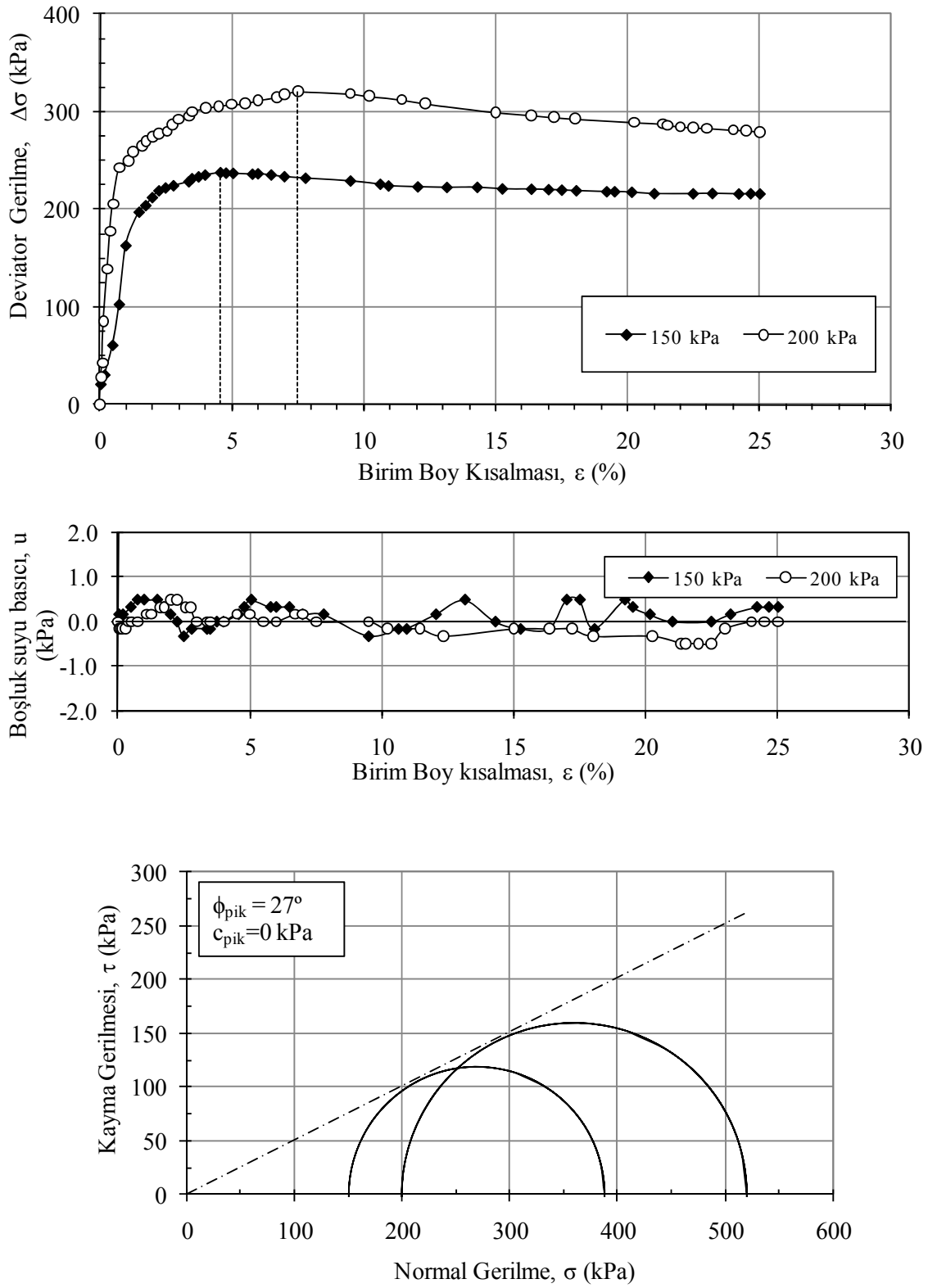


Şekil B. 4: AYS-2 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri

B.1.3 AYS-3 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

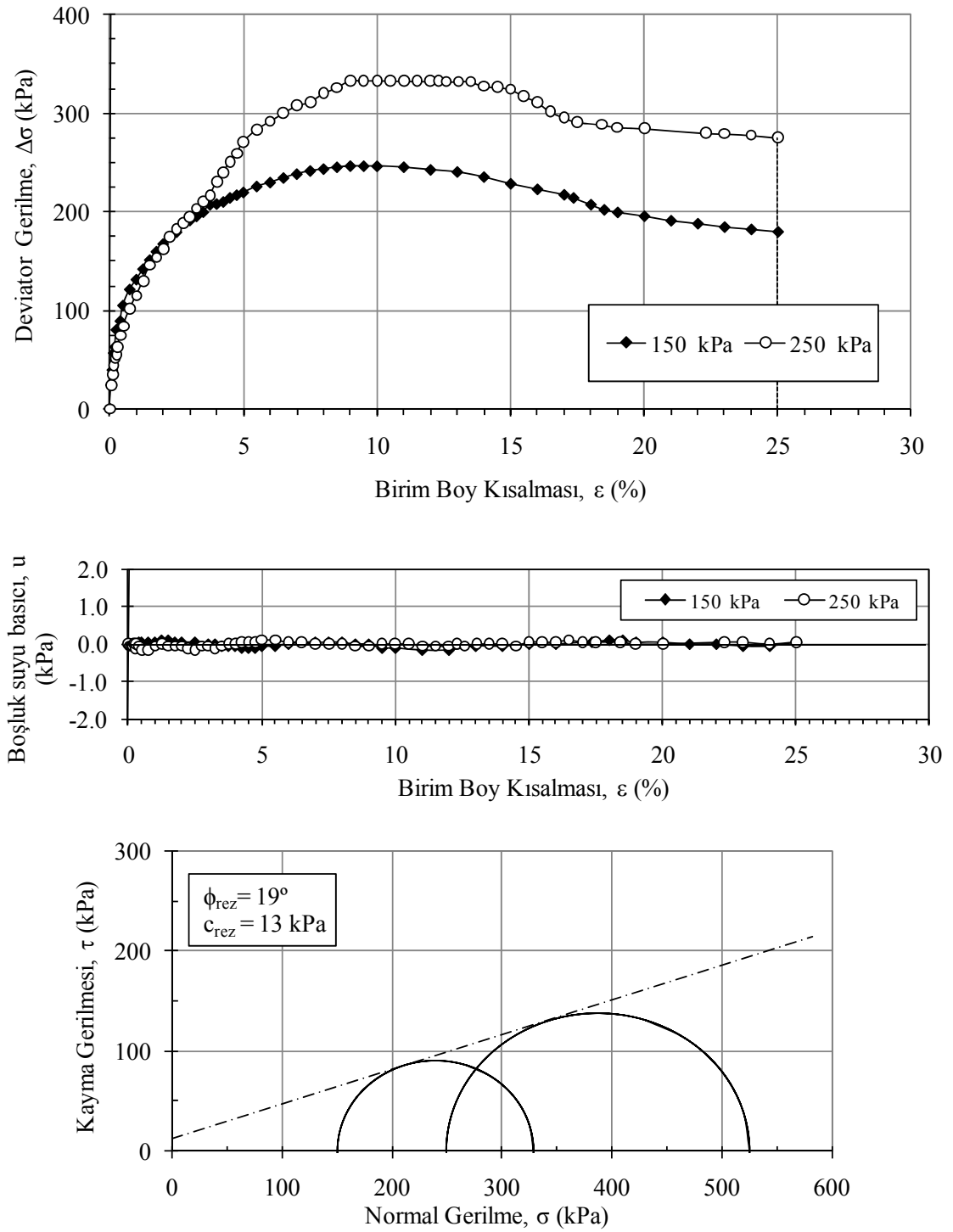


Şekil B. 5: AYS-3 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireesi,

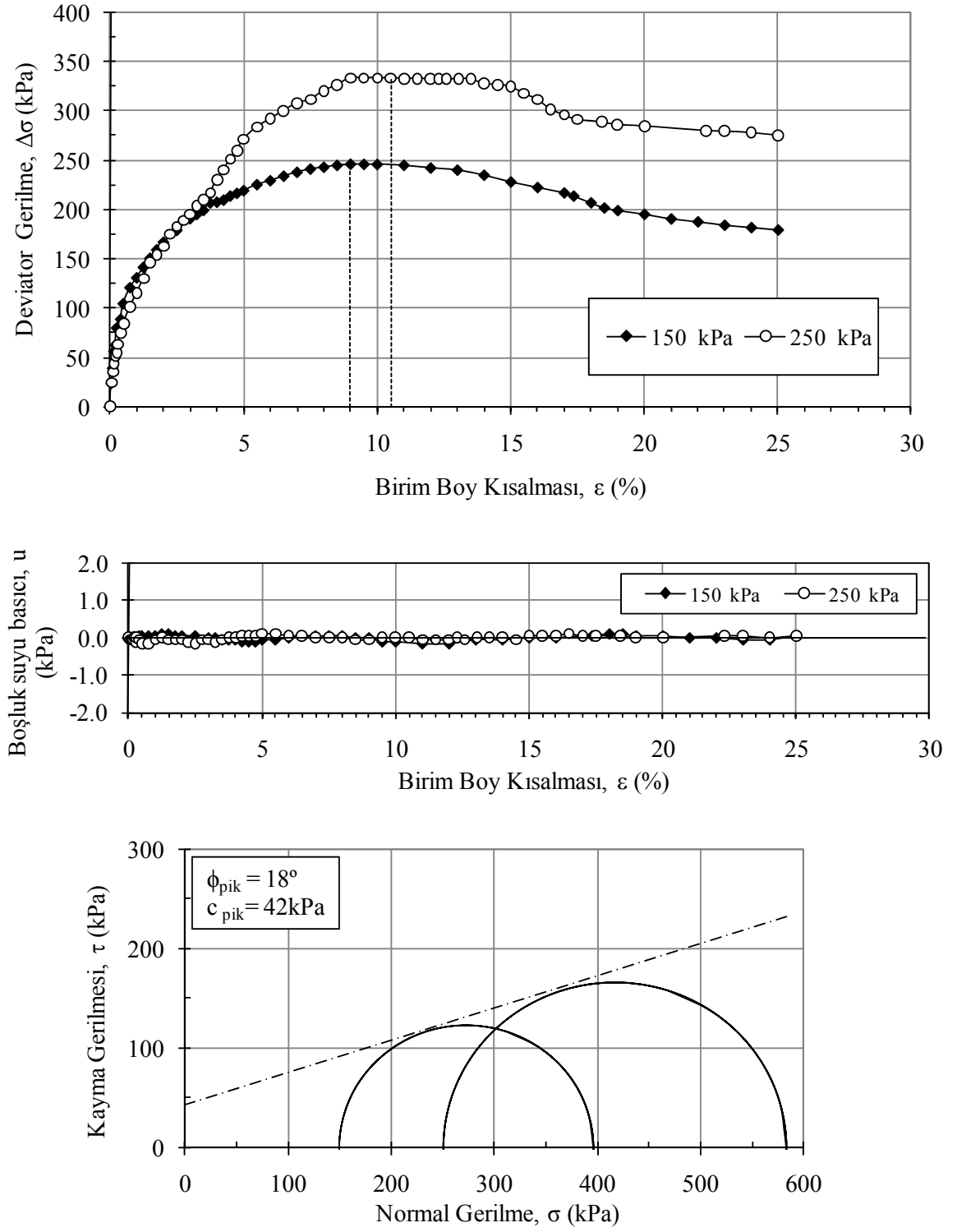


Şekil B. 6: AYS-3 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri

B.1.4 AYS-4 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

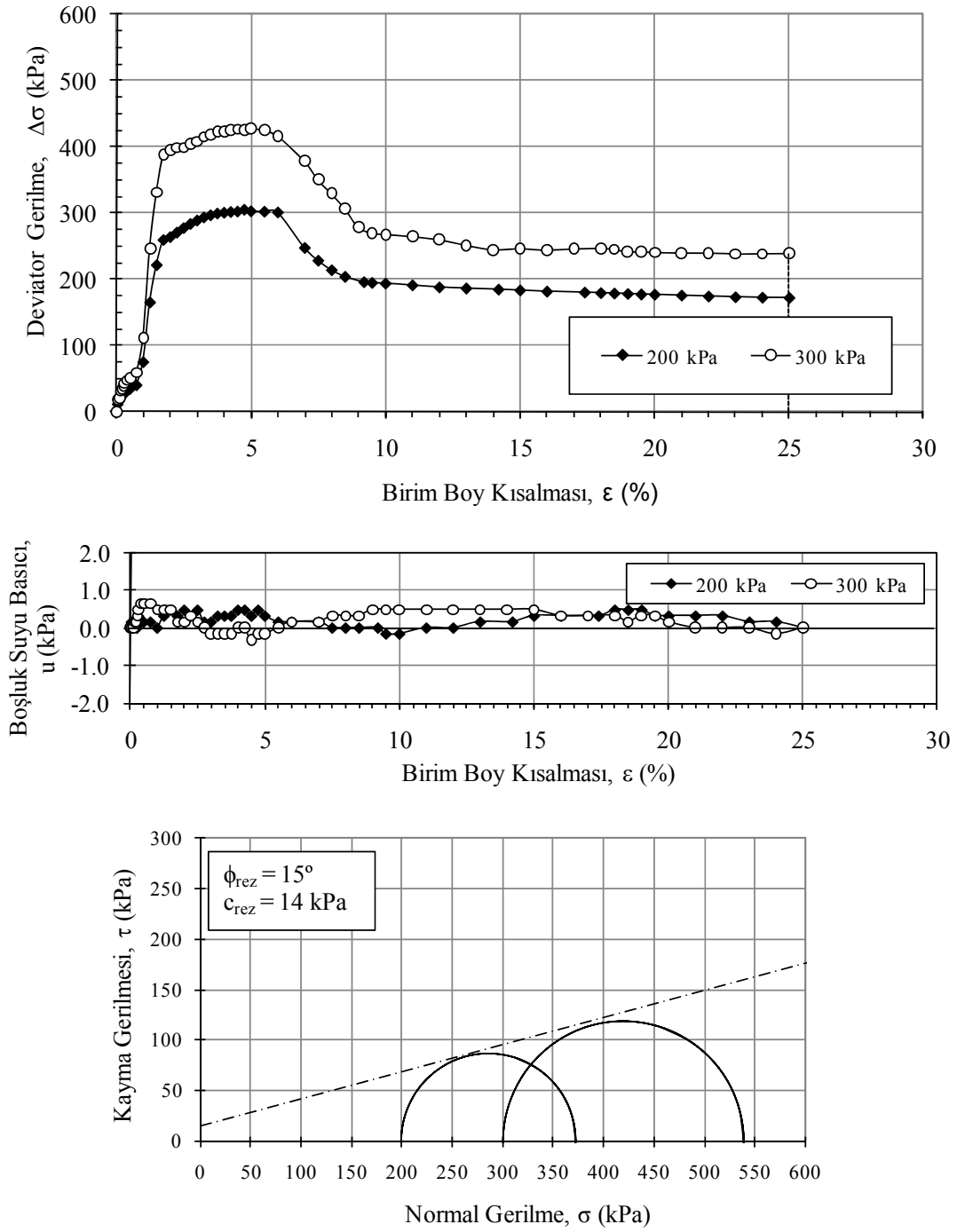


Şekil B. 7: AYS-4 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

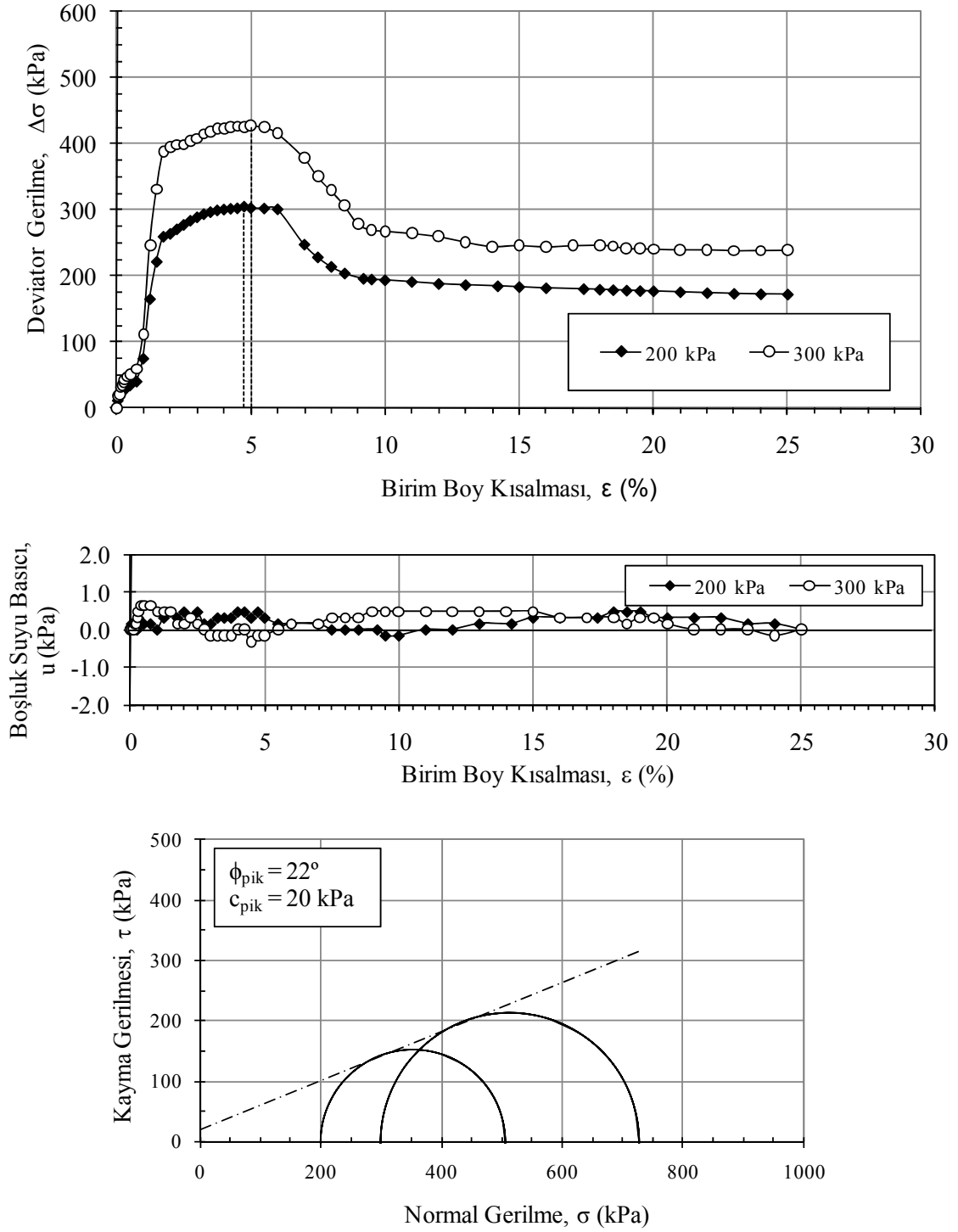


Şekil B. 8: AYS-4 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr daireleri

B.1.5 AYS-5 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

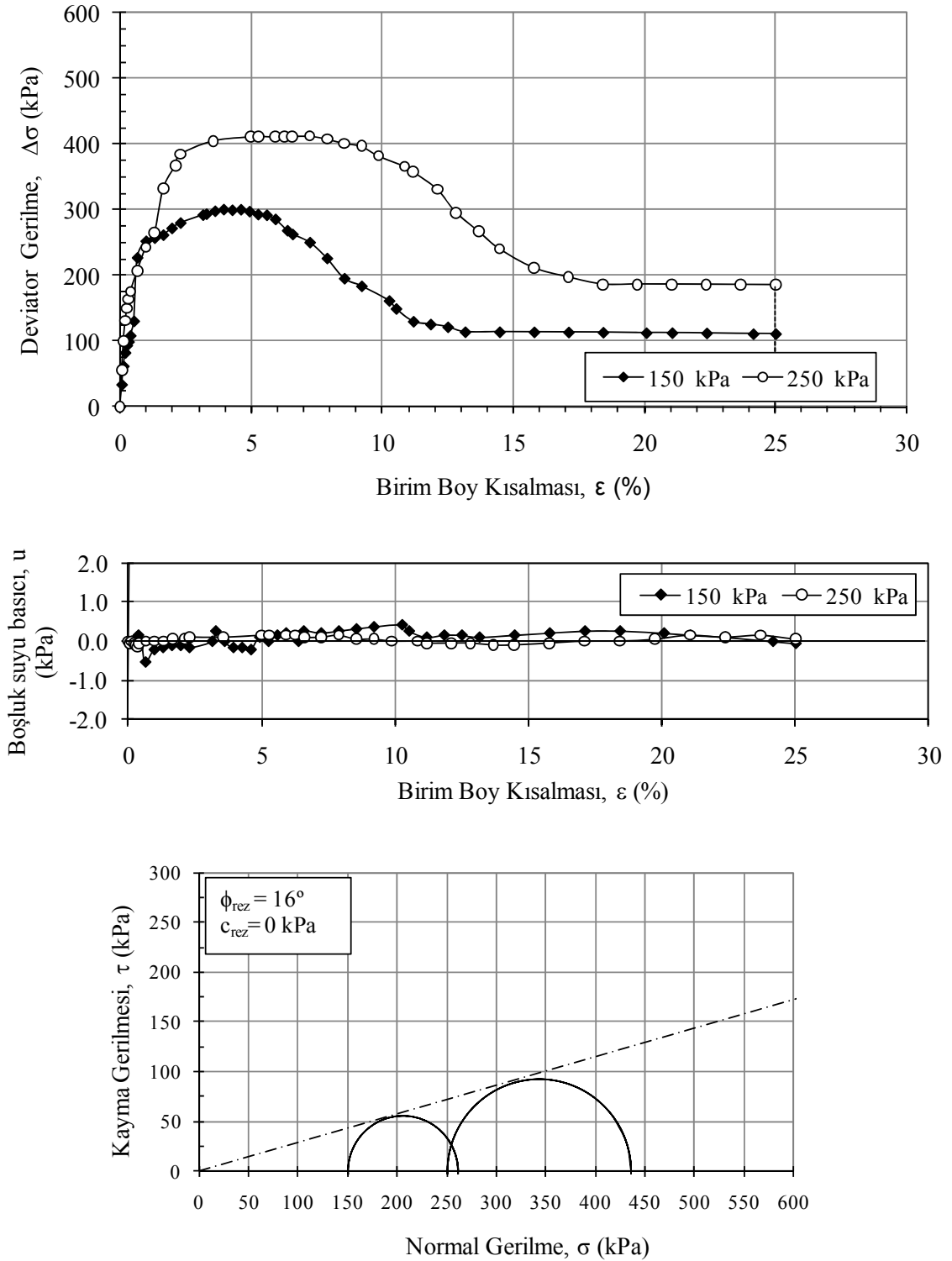


Şekil B. 9: AYS-5 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı – birim boy kısalma eğrileri ve mohr daireesi

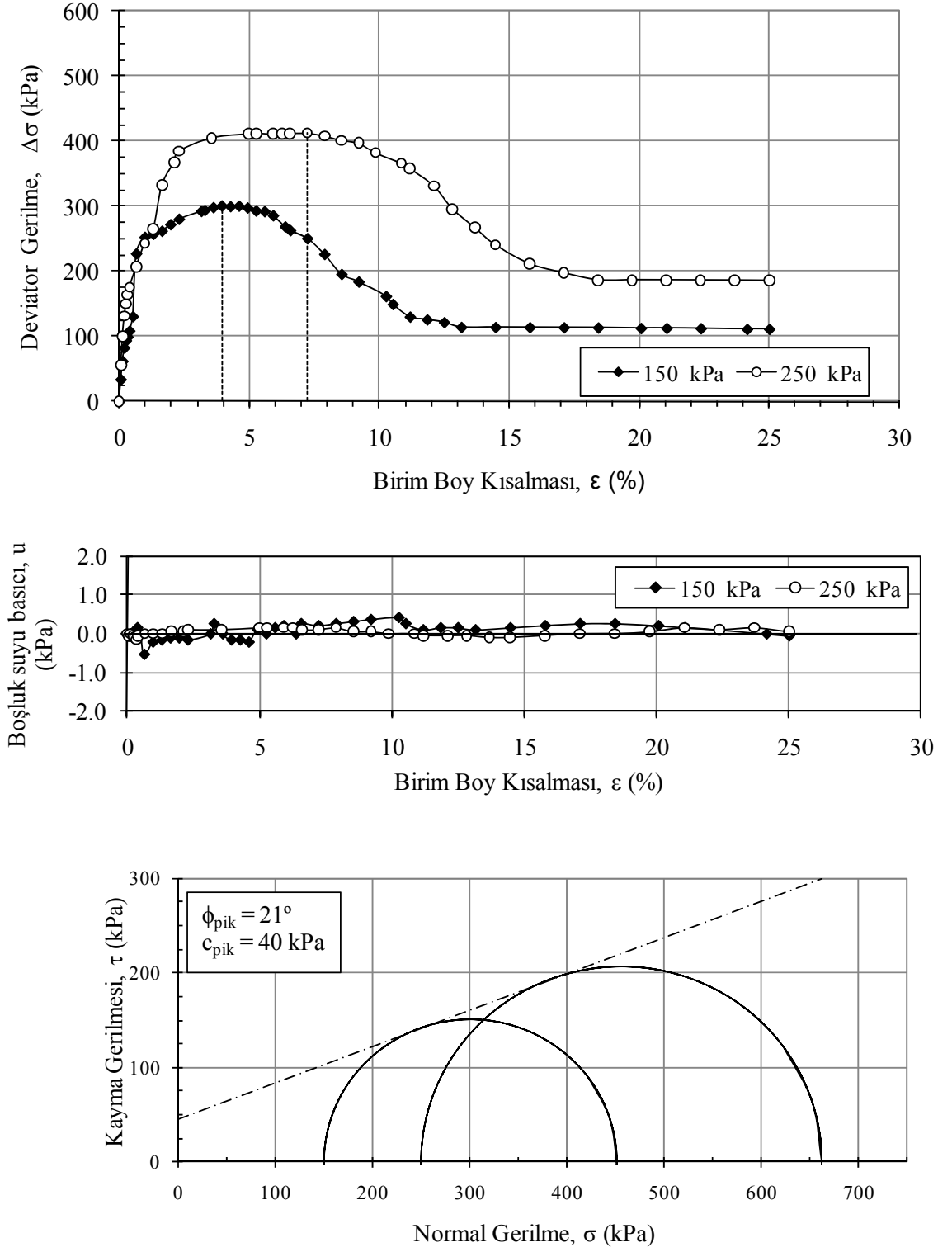


Şekil B. 10: AYS-5 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri

B.1.6 AYS-6 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

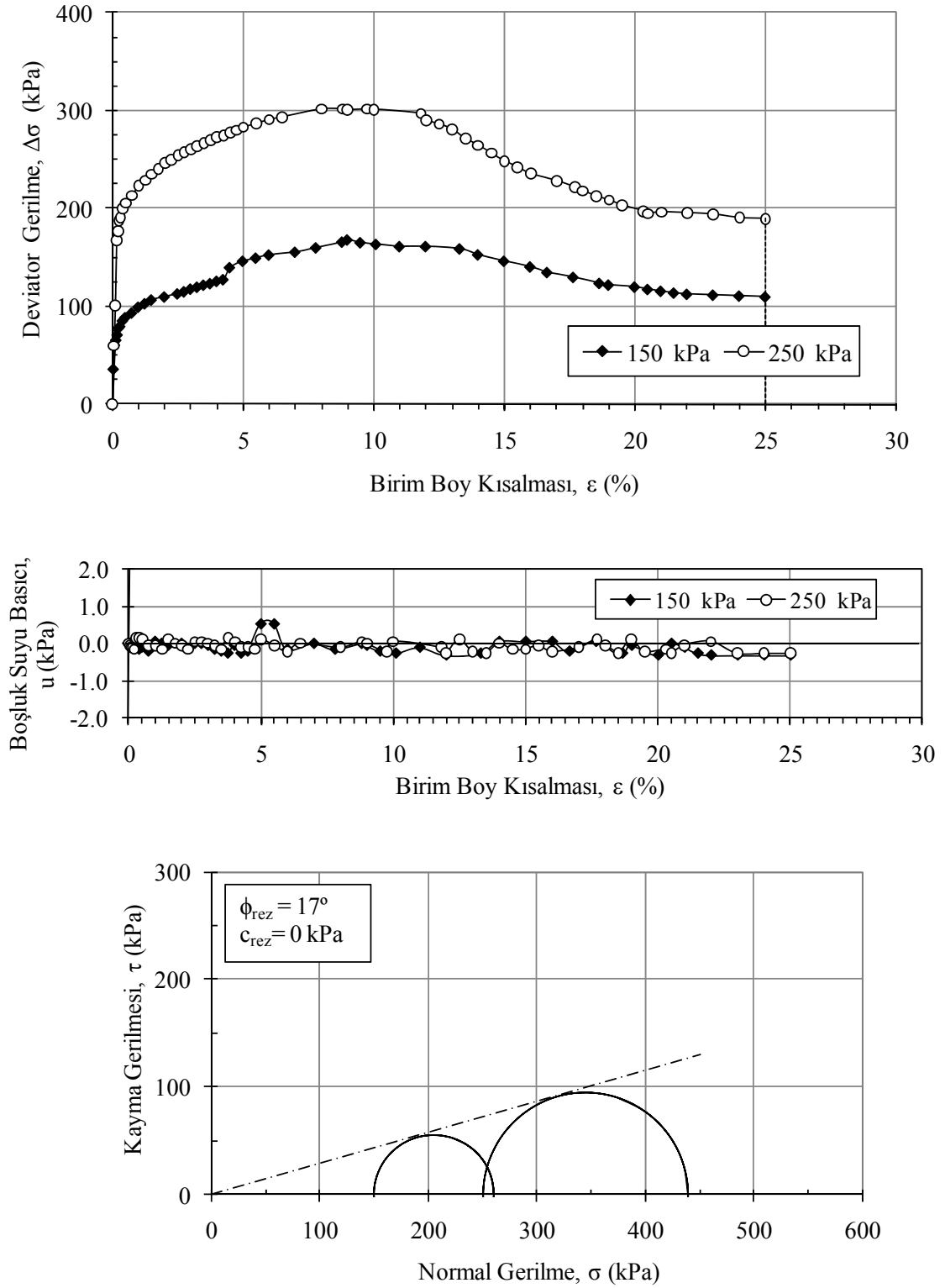


Şekil B. 11: AYS-6 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri

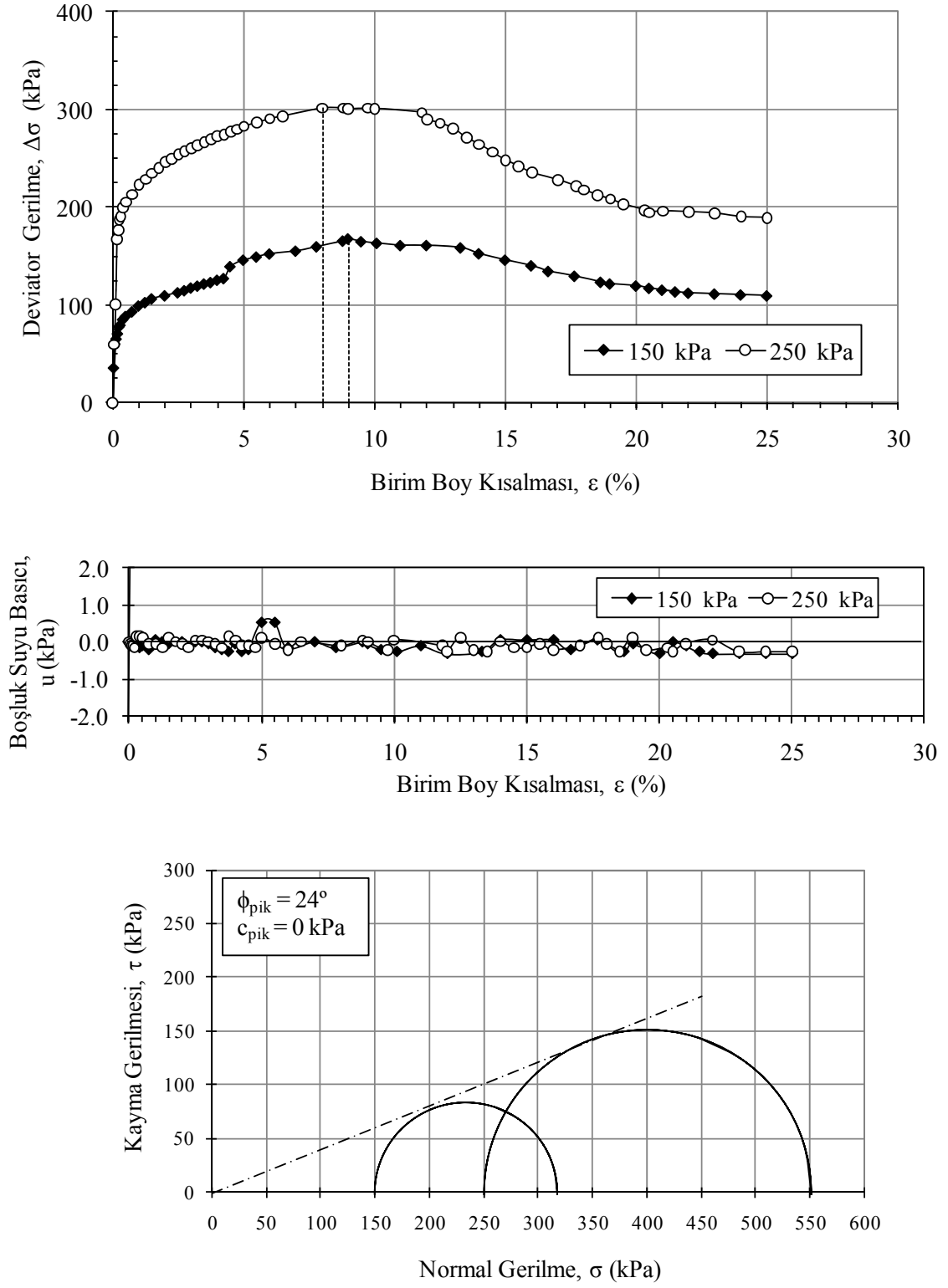


Şekil B. 12: AYS-6 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr daireesi

B.1.7 AYS-7 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

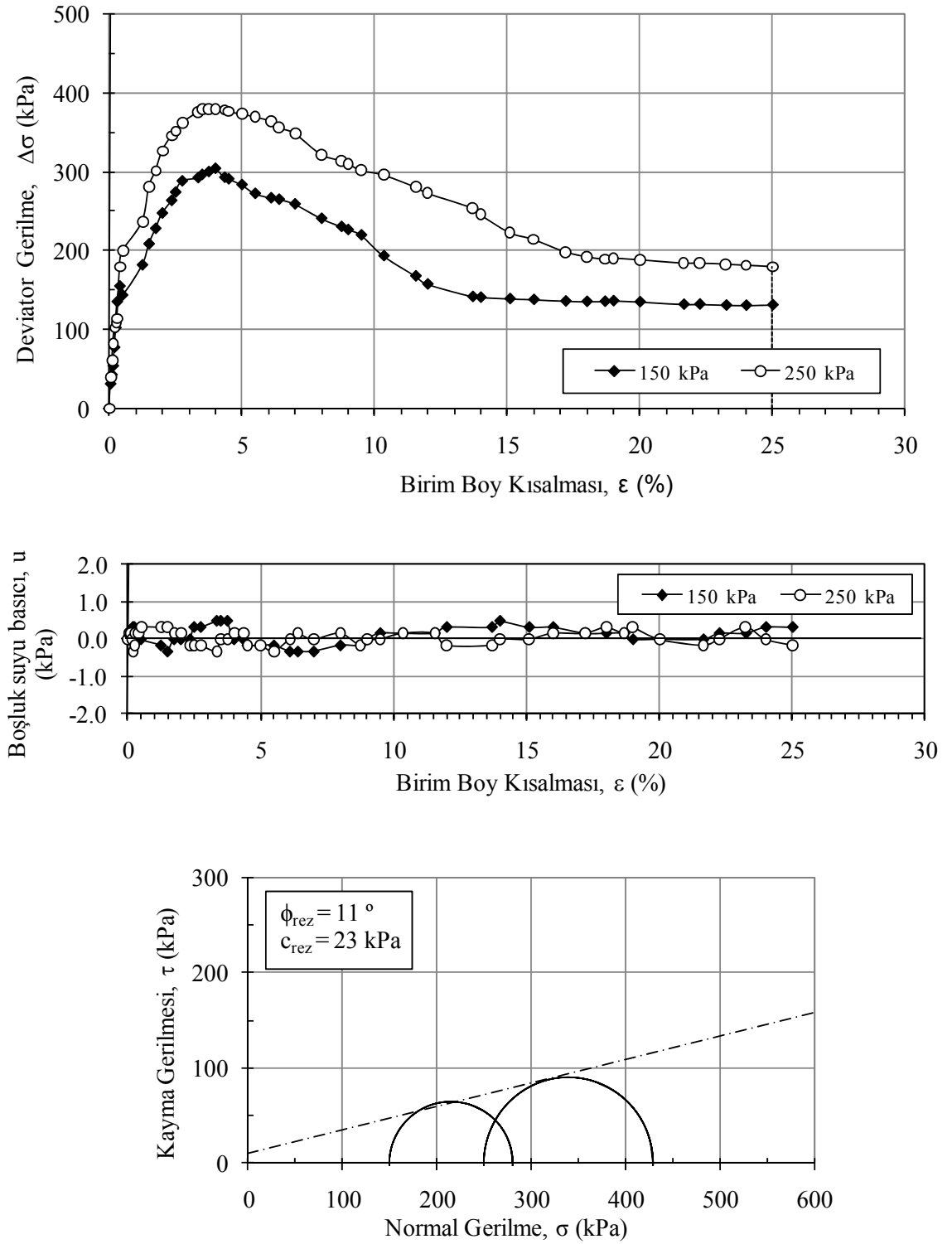


Şekil B. 13: AYS-7 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

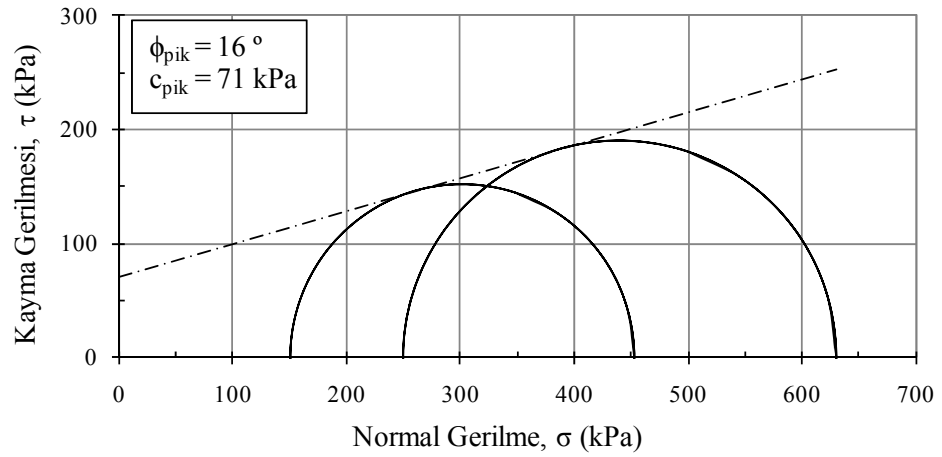
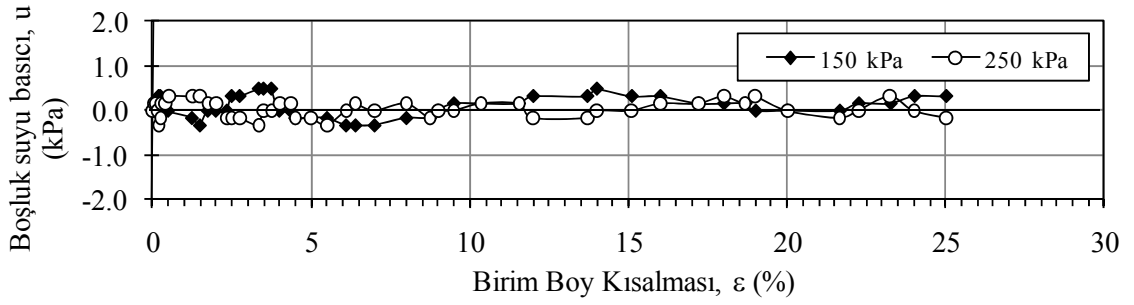
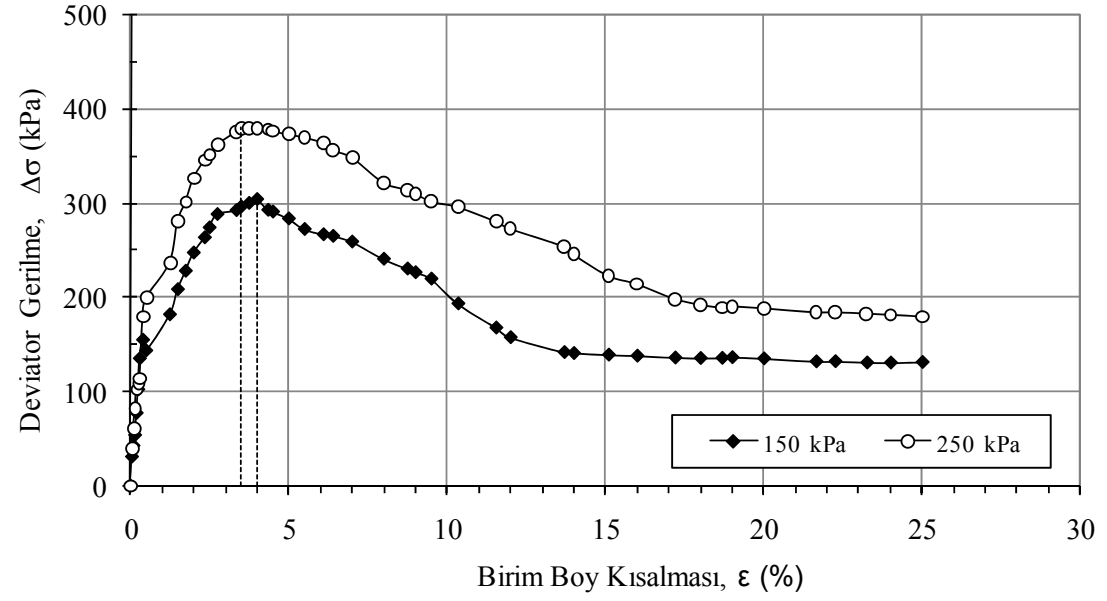


Şekil B. 14: AYS-7 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireesi

B.1.8 AYS-8 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

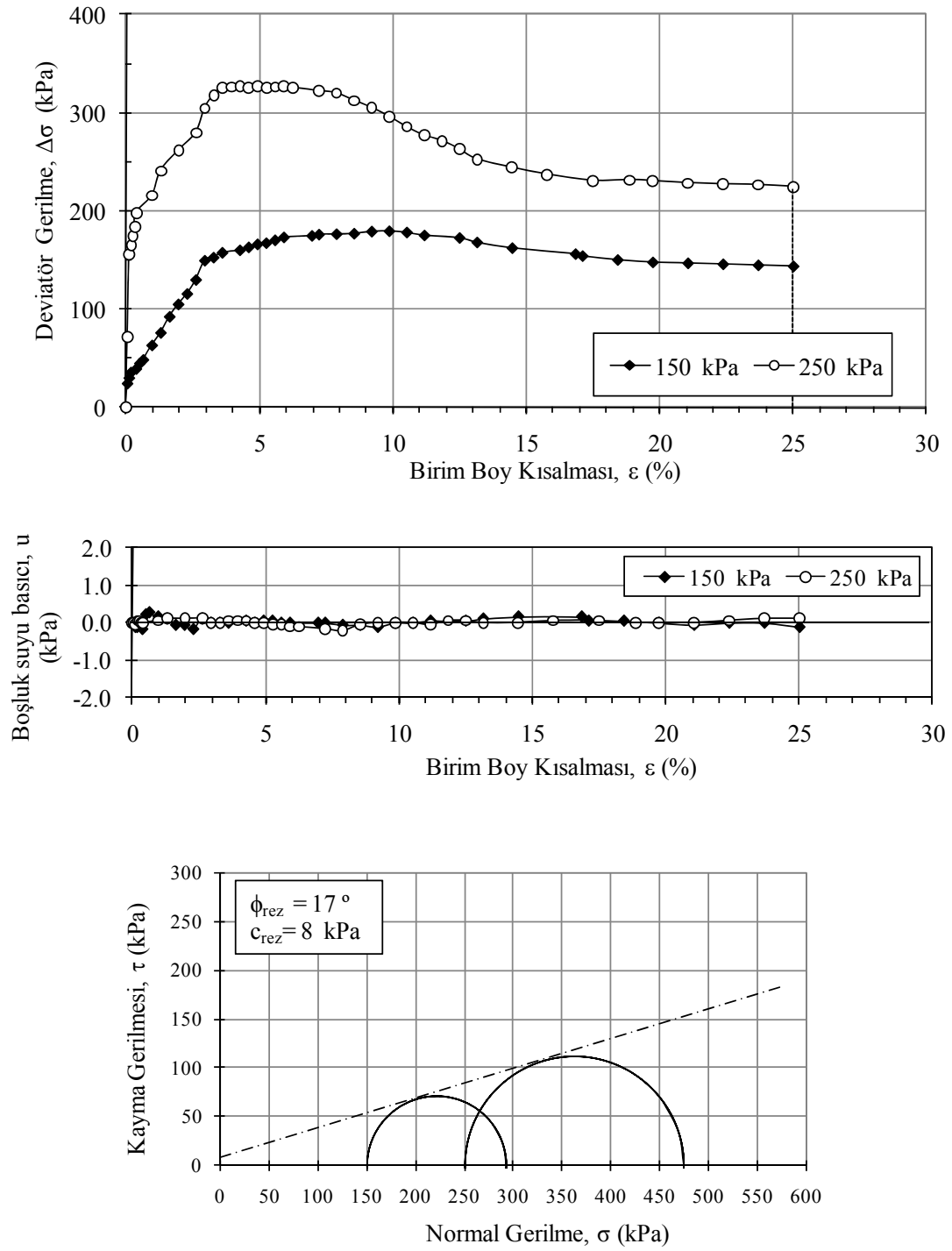


Şekil B. 15: AYS-8 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

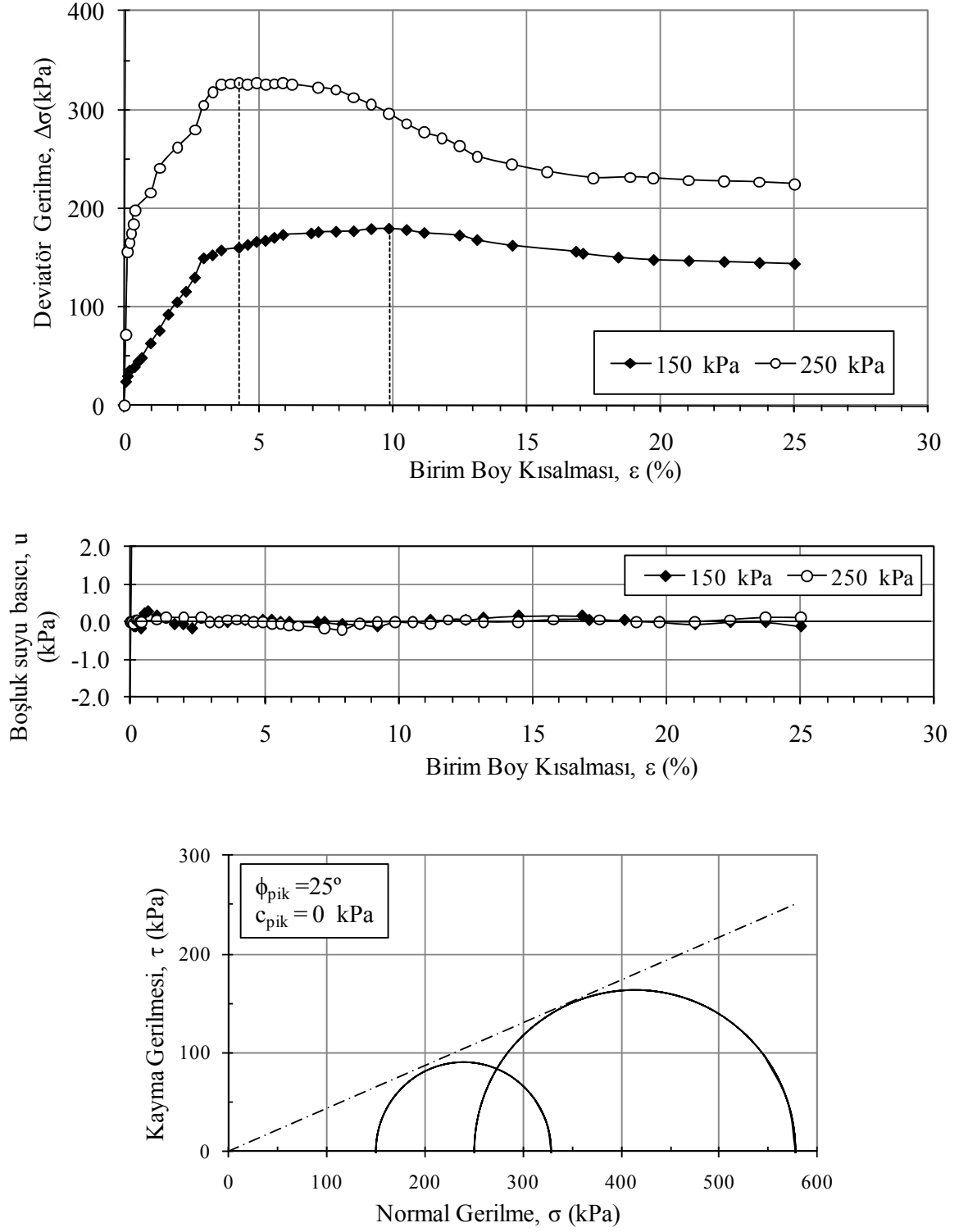


Şekil B. 16: AYS-8 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

B.1.9 AYS-9 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

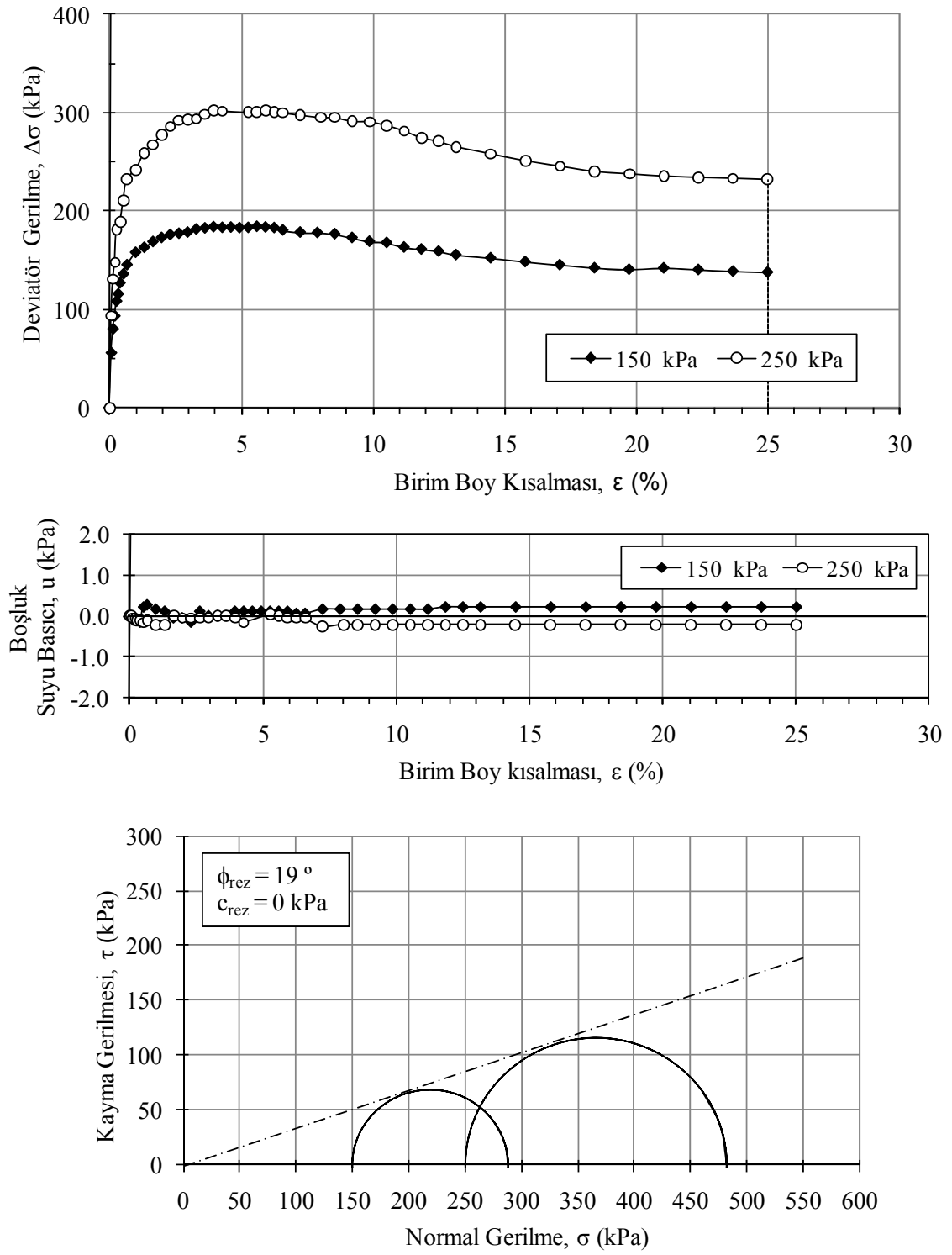


Şekil B. 17: AYS-9 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireleri

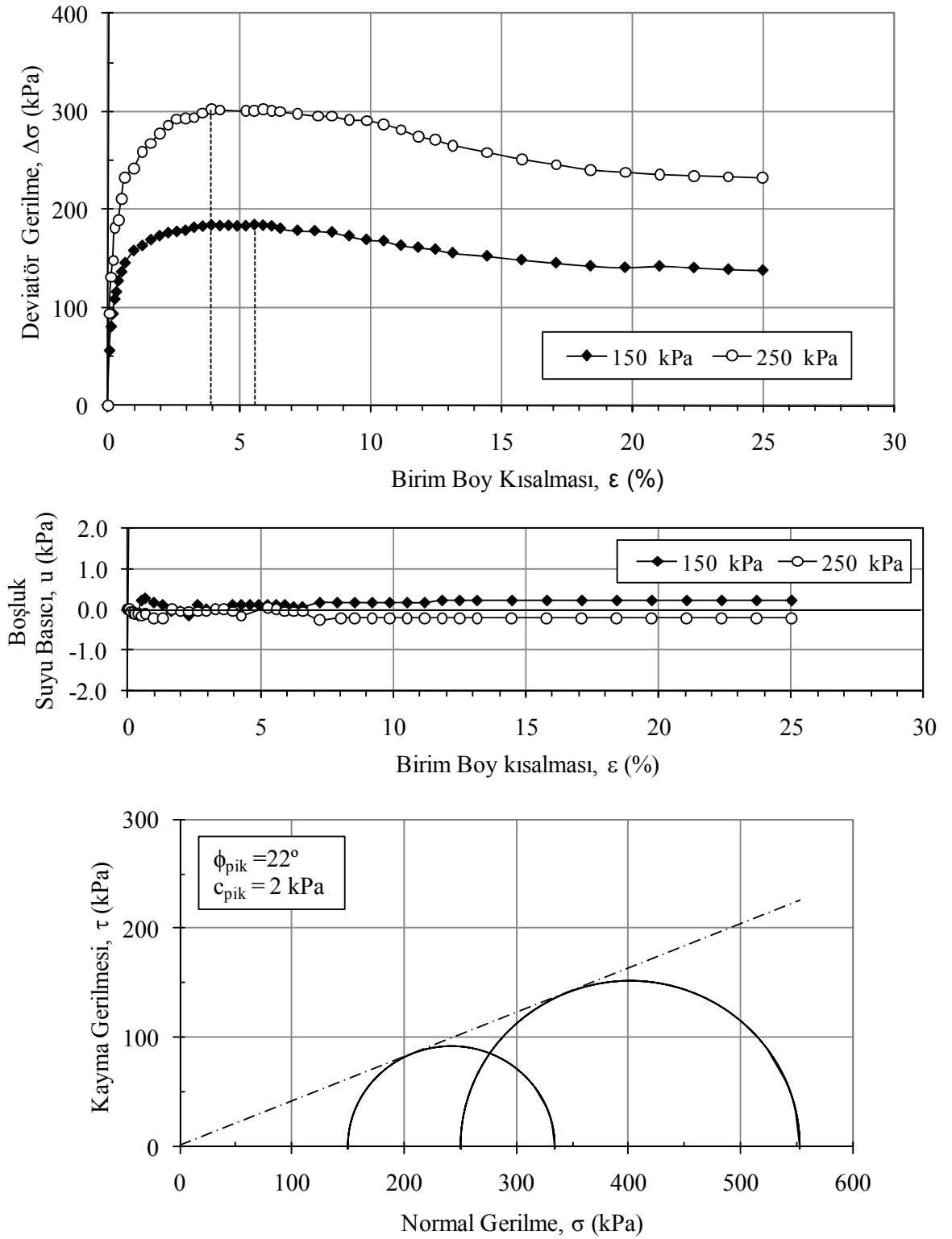


Şekil B. 18: AYS-9 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

B.1.10 AYS-10 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

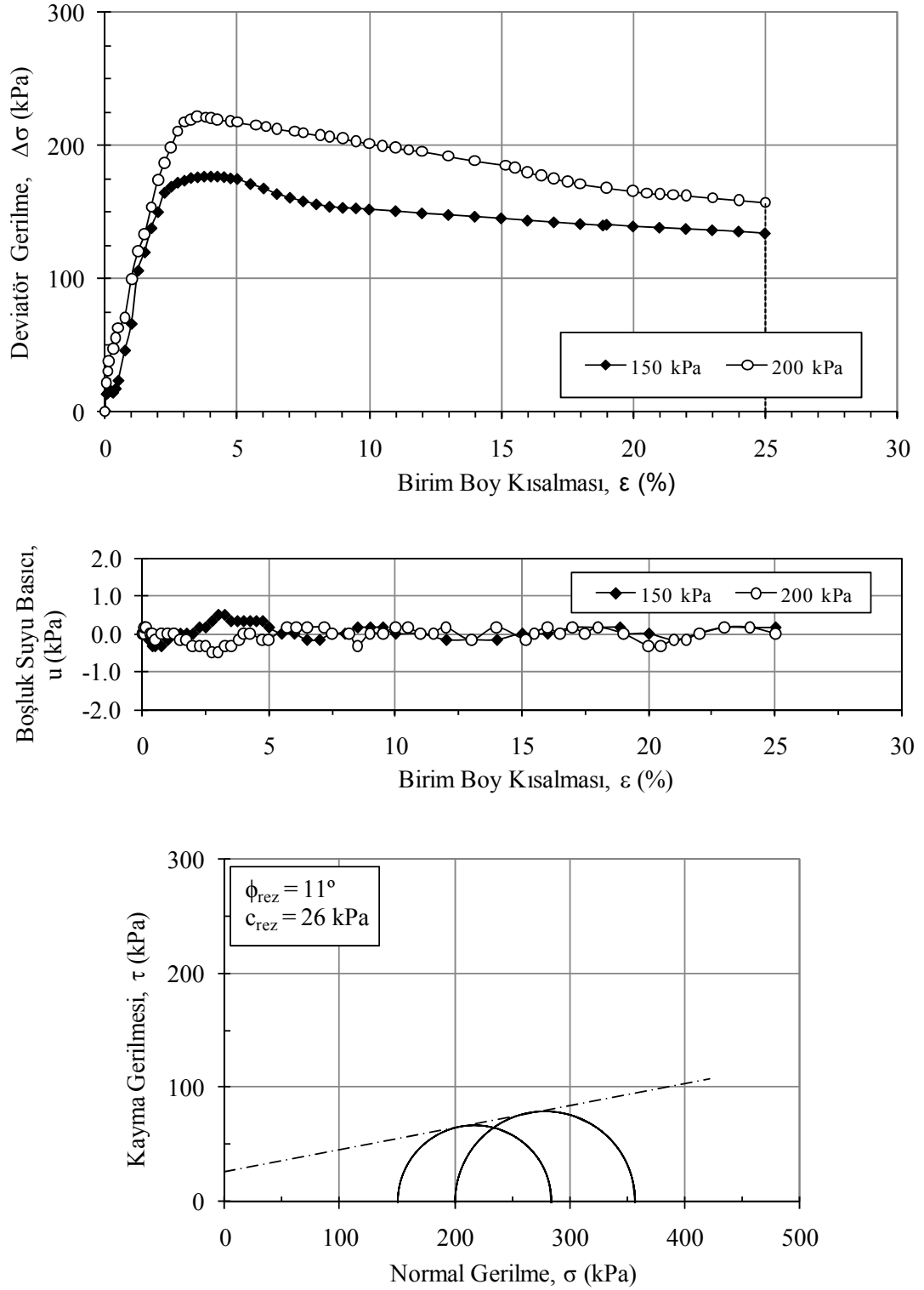


Şekil B. 19: AYS-10 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi

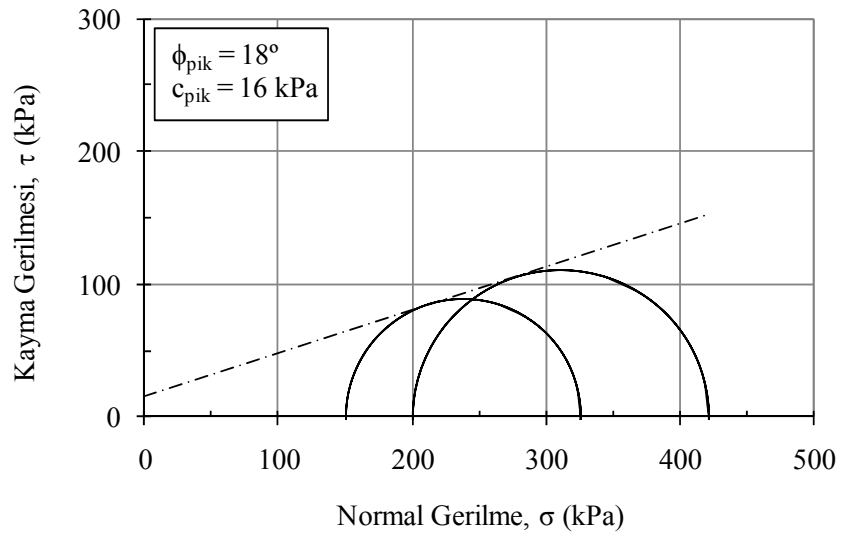
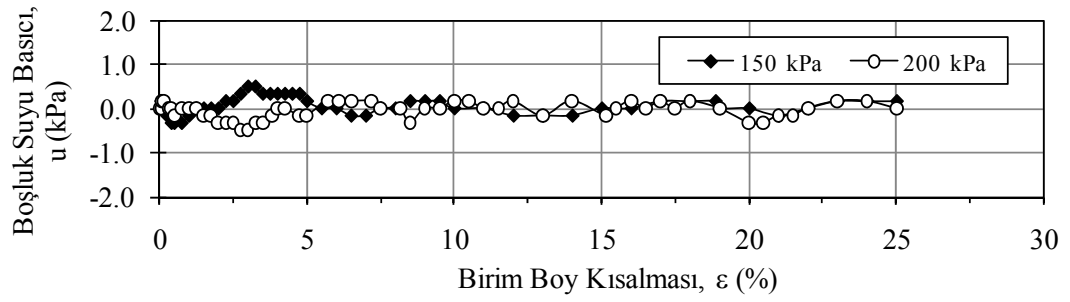
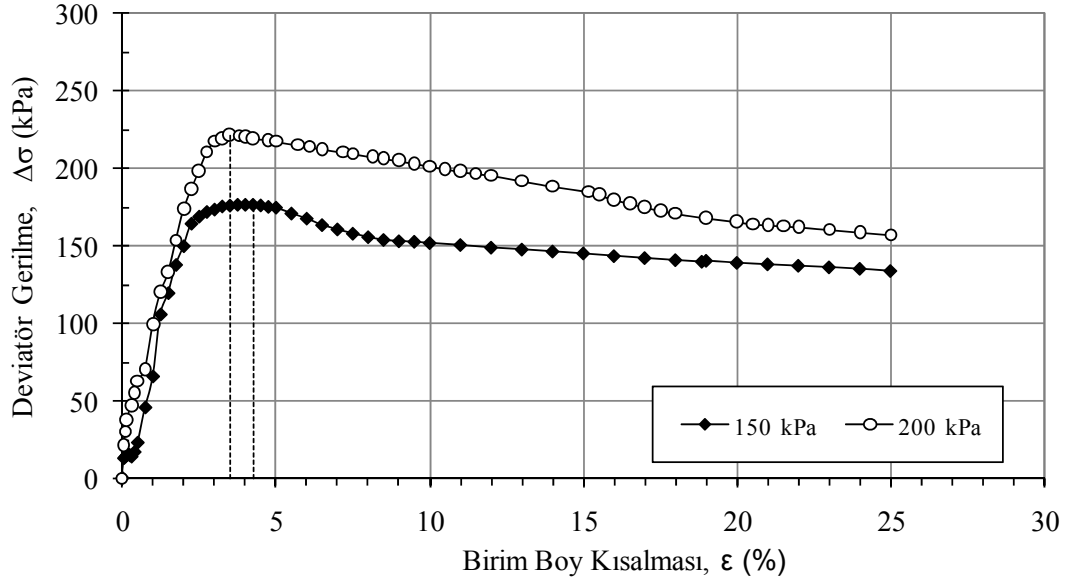


Şekil B. 20: AYS-10 numunesi pik kayma direnci için deviyör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi

B.1.11 AYS-11 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

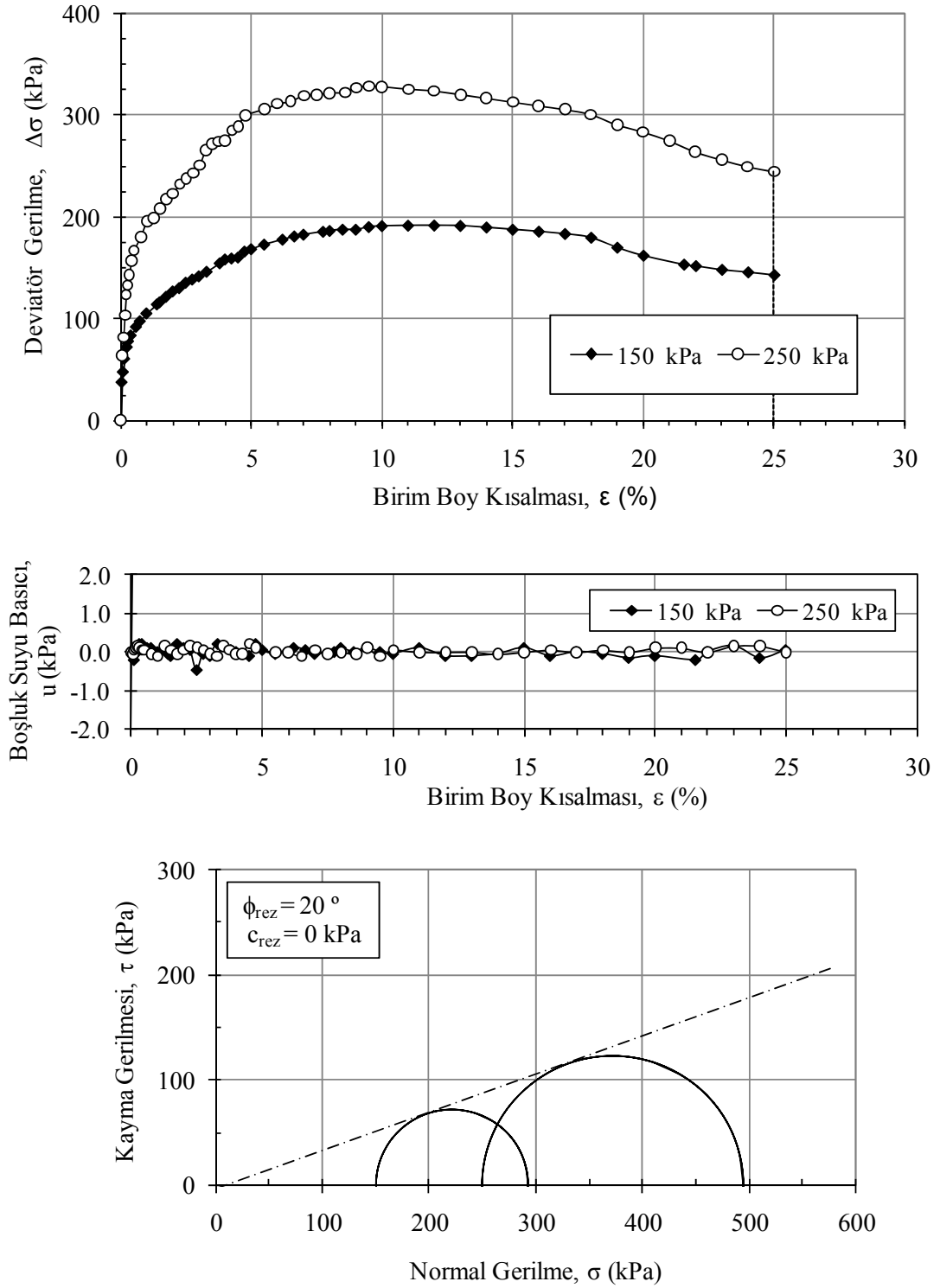


Şekil B. 21: AYS-11 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr daireesi

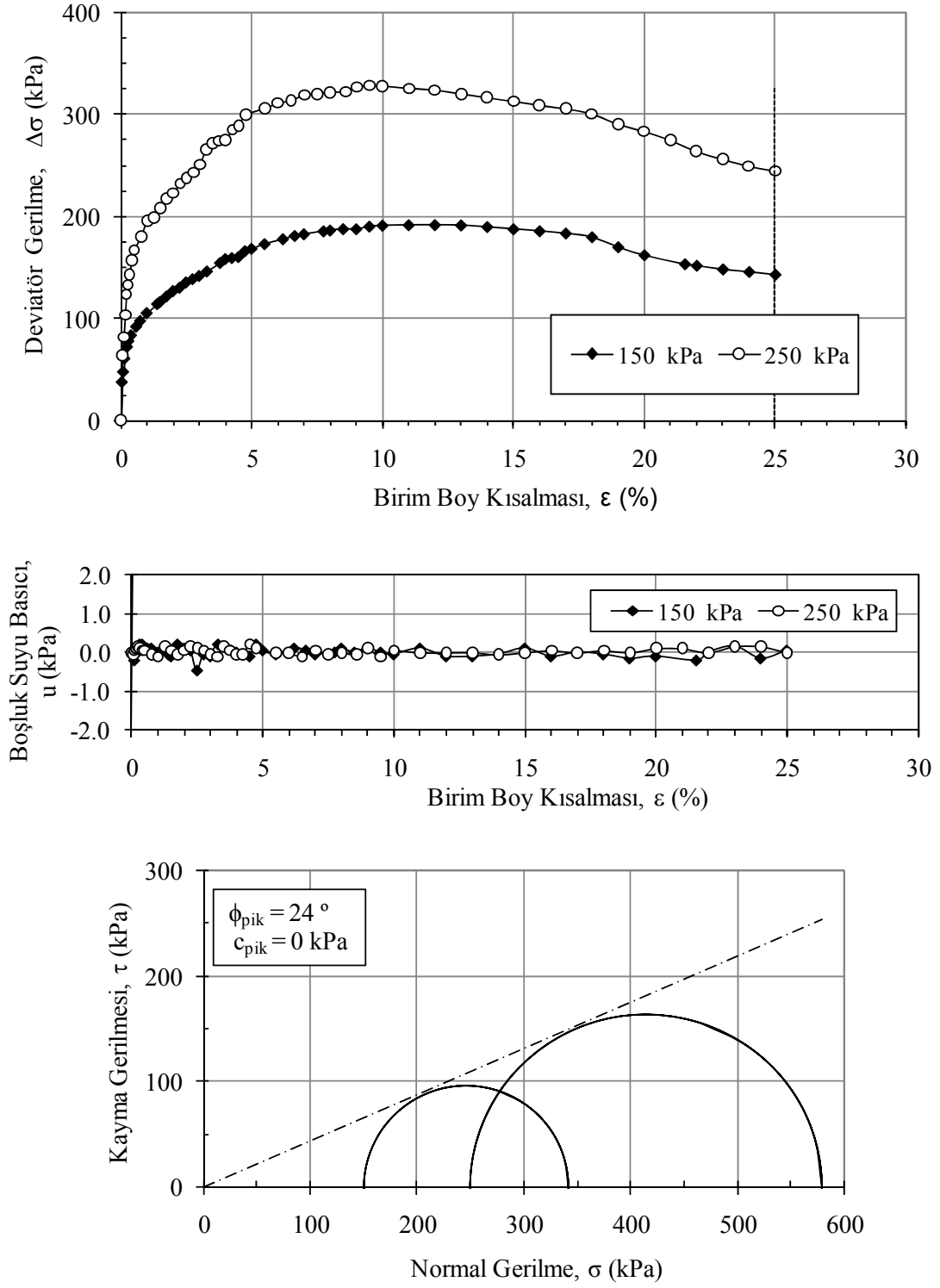


Şekil B. 22: AYS-11 numunesi pik kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daresi

B.1.12 AYS-12 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

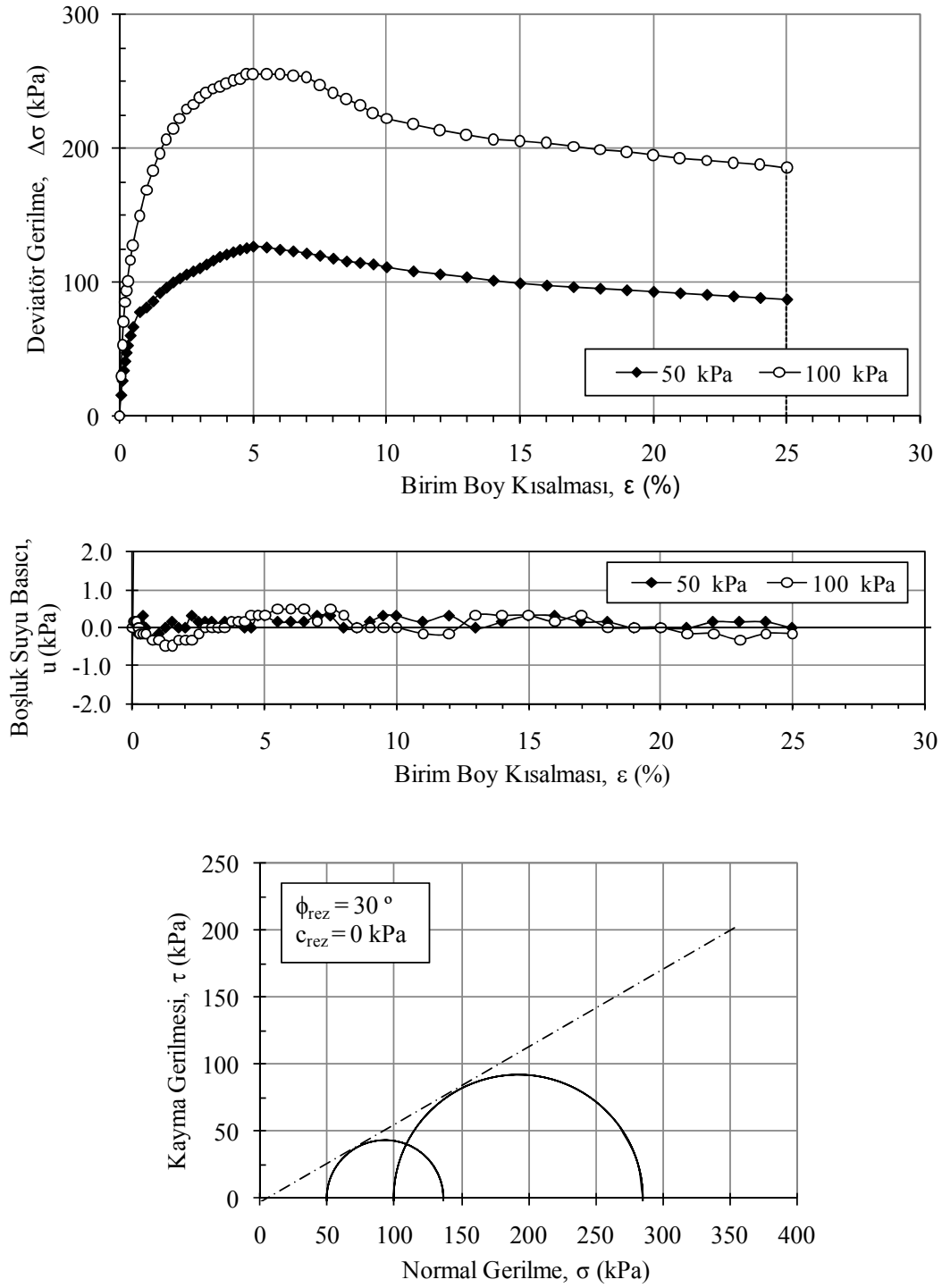


Şekil B. 23: AYS-12 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi

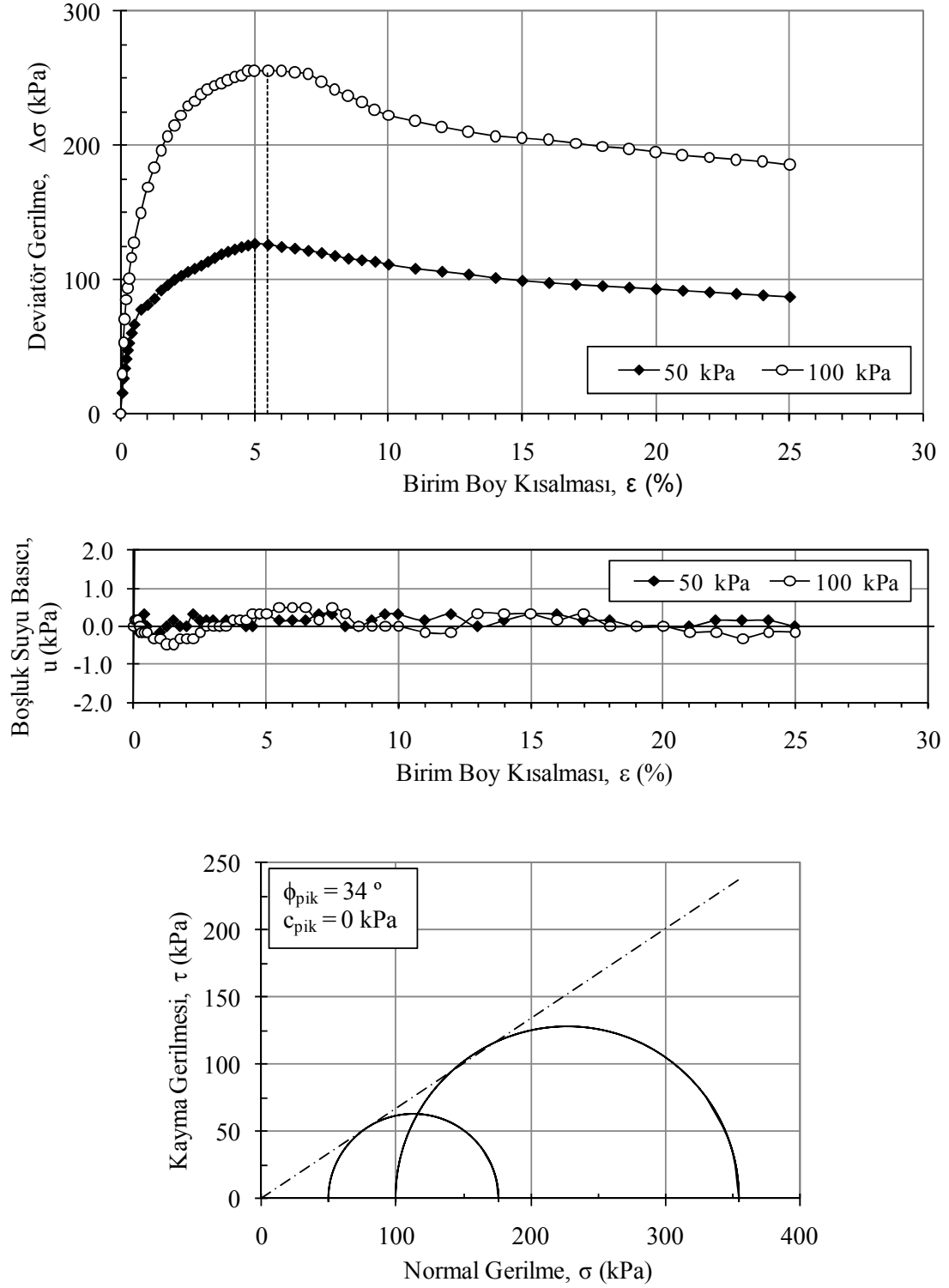


Şekil B. 24: AYS-12 numunesi pik kayma direnci için deviyatör gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

B.1.13 AYS-13 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

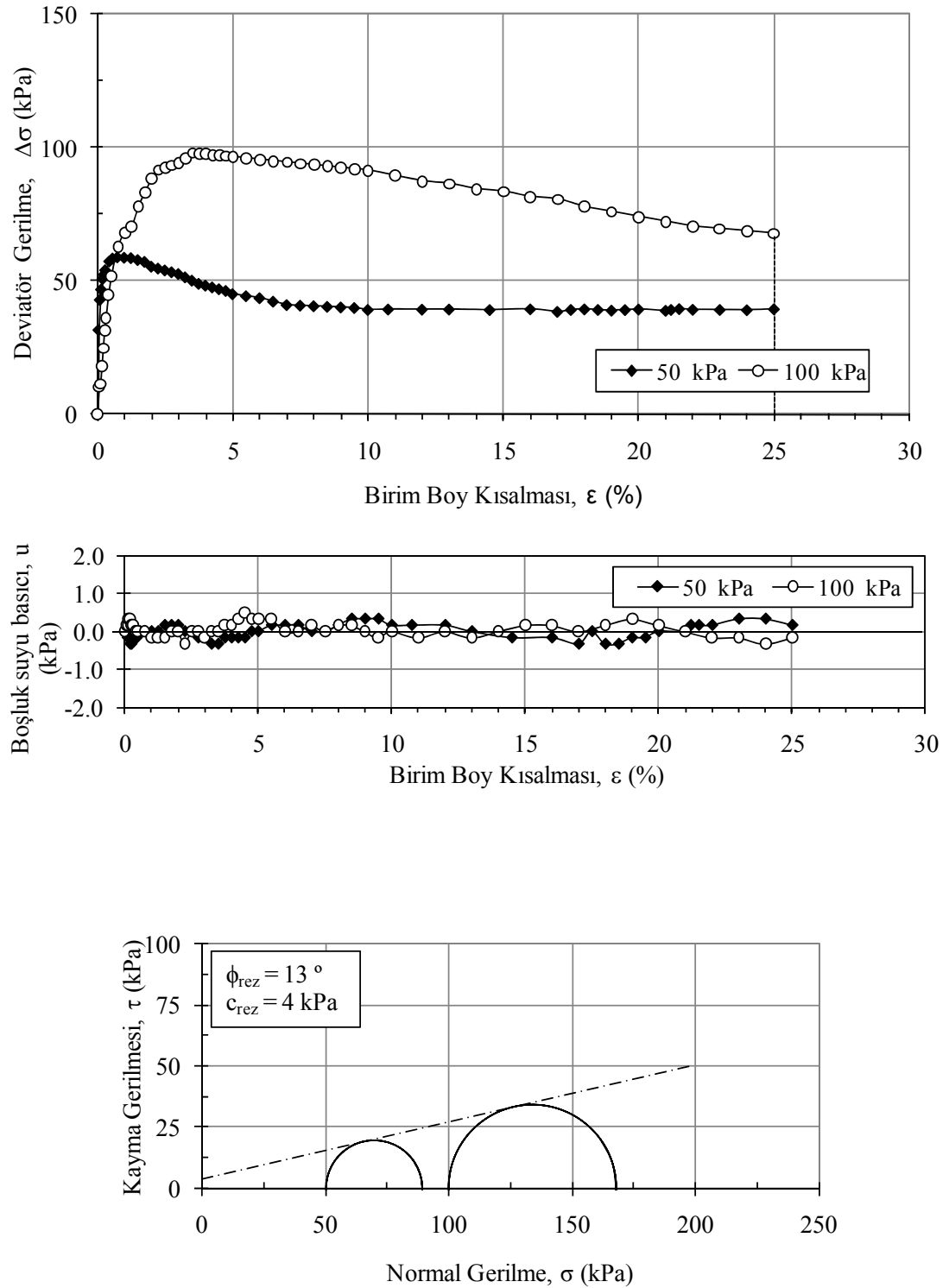


Şekil B. 25: AYS-13 numunesi kalıcı kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi

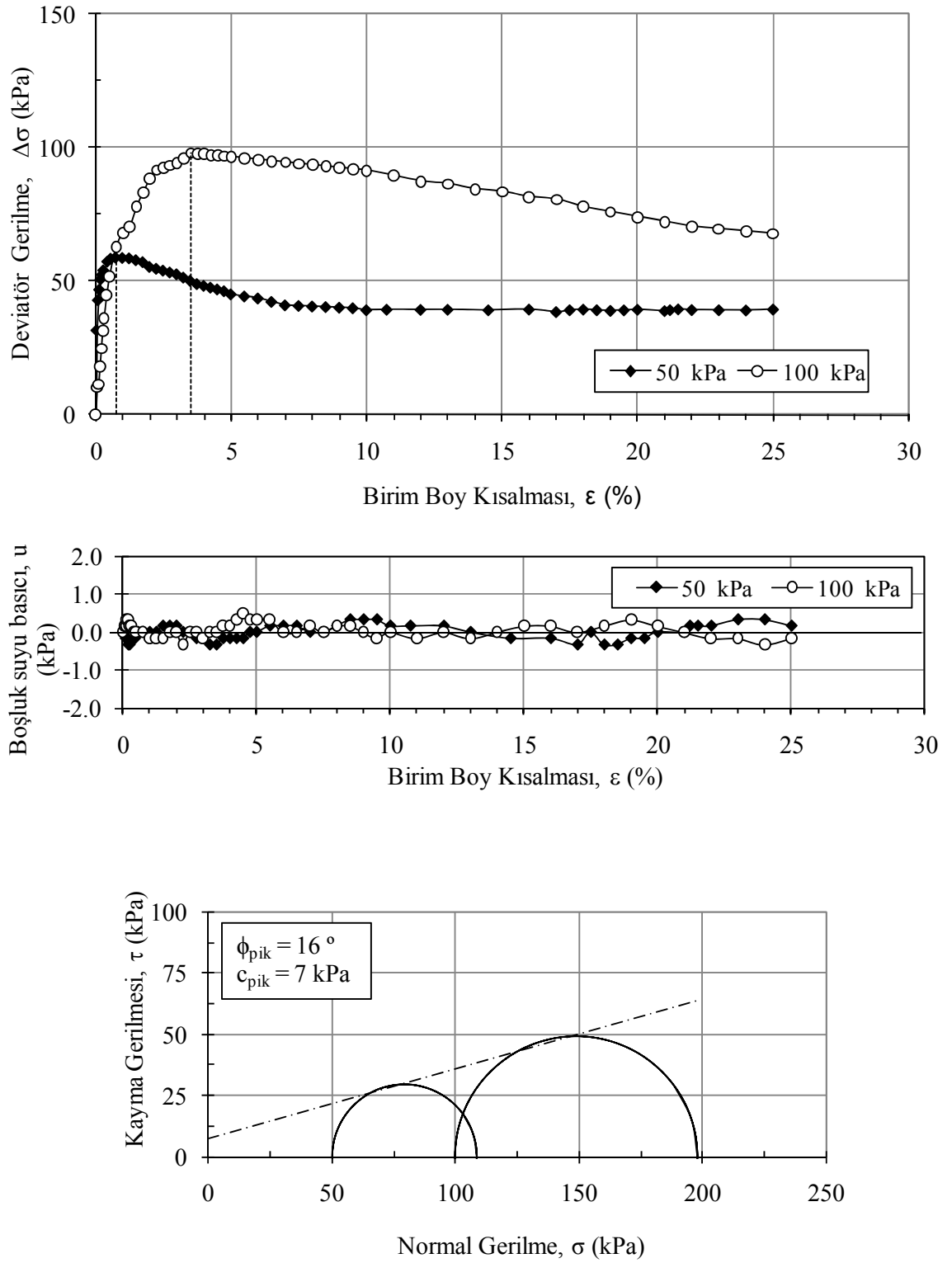


Şekil B. 26: AYS-13 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daresi

B.1.14 AYS-14 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi

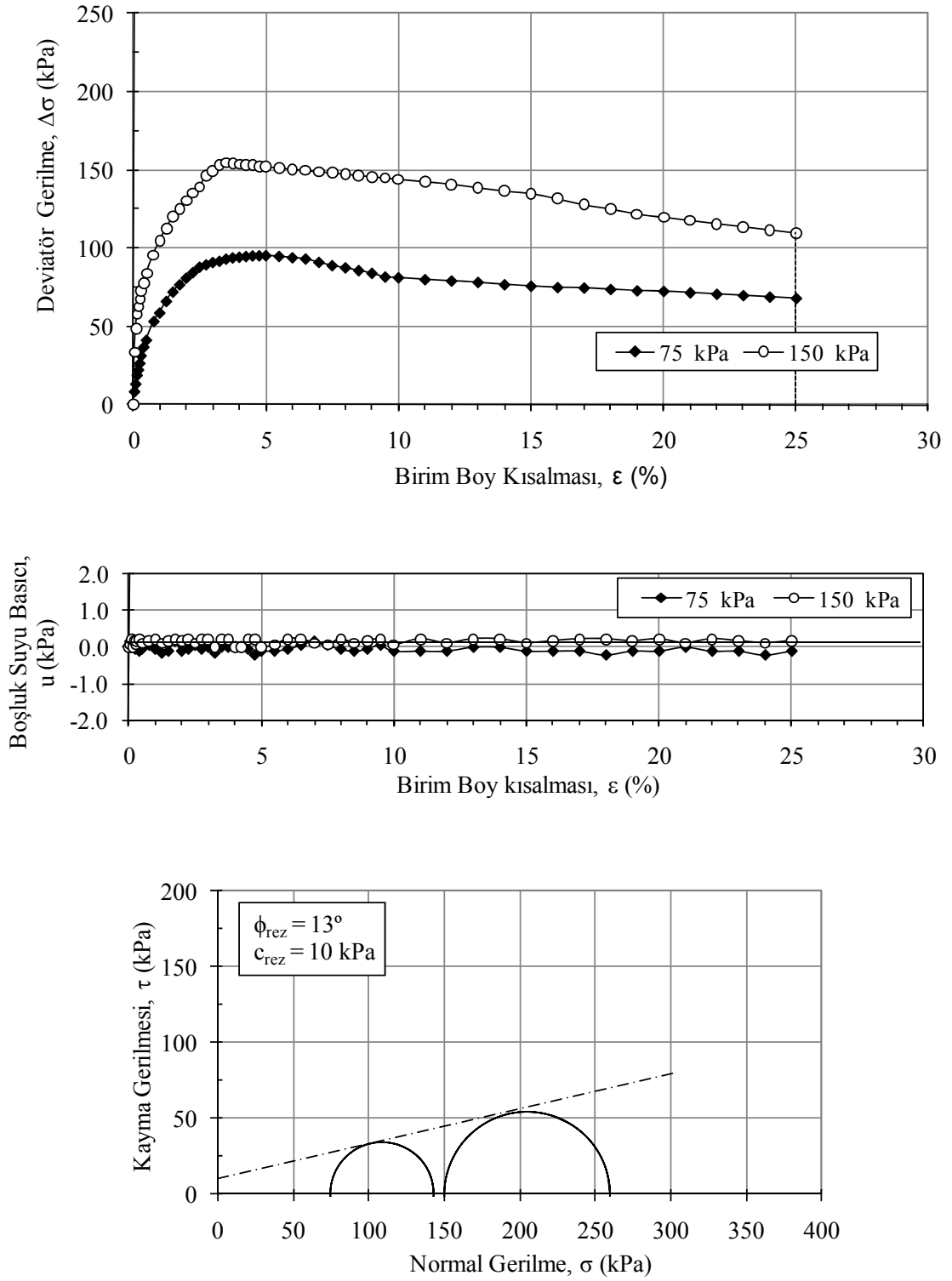


Şekil B. 27: AYS-14 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr daireesi

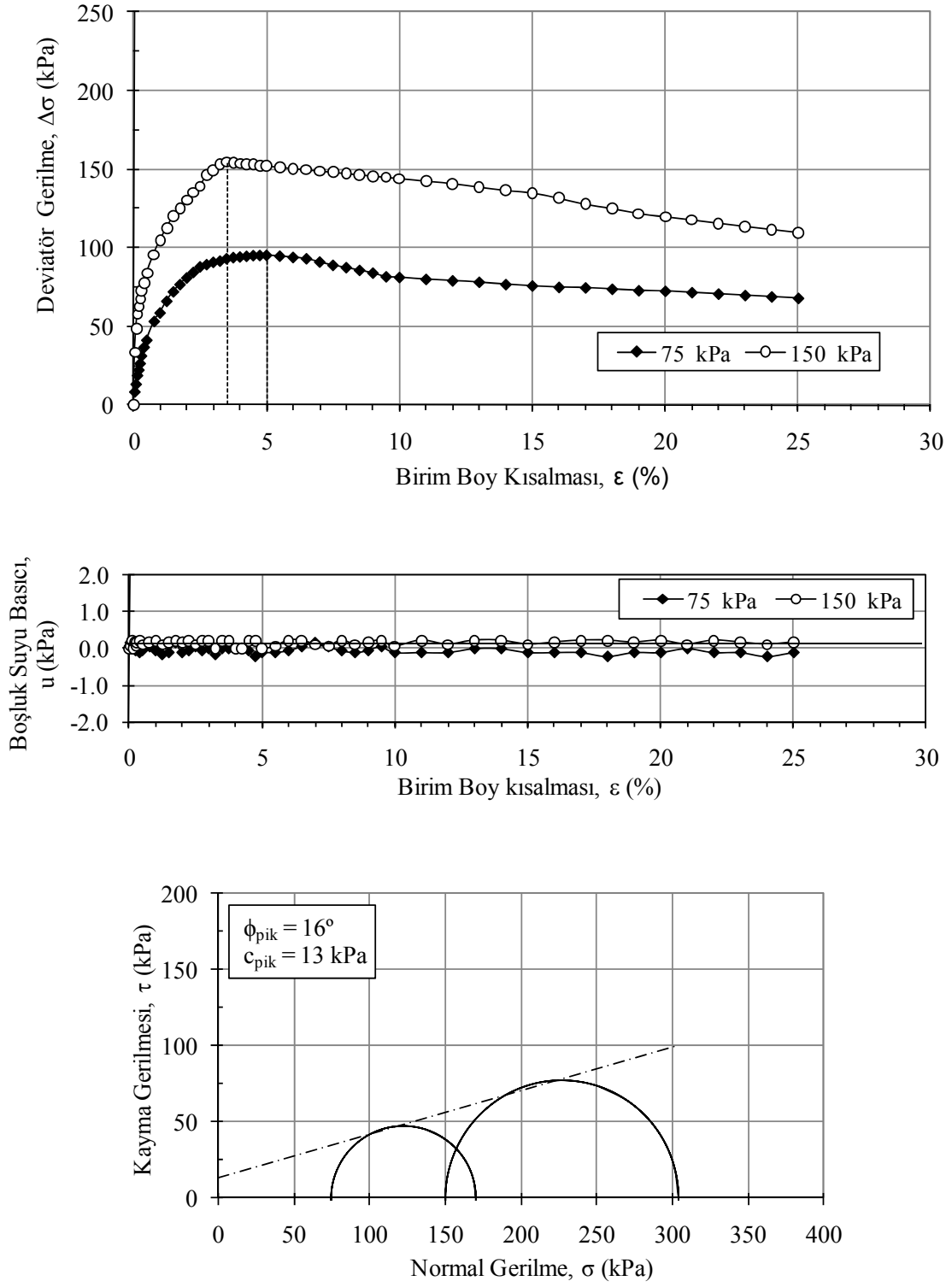


Şekil B. 28: AYS-14 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr daireesi

B.1.15 AYS-15 numunesine ait üç eksenli basınç deneyi



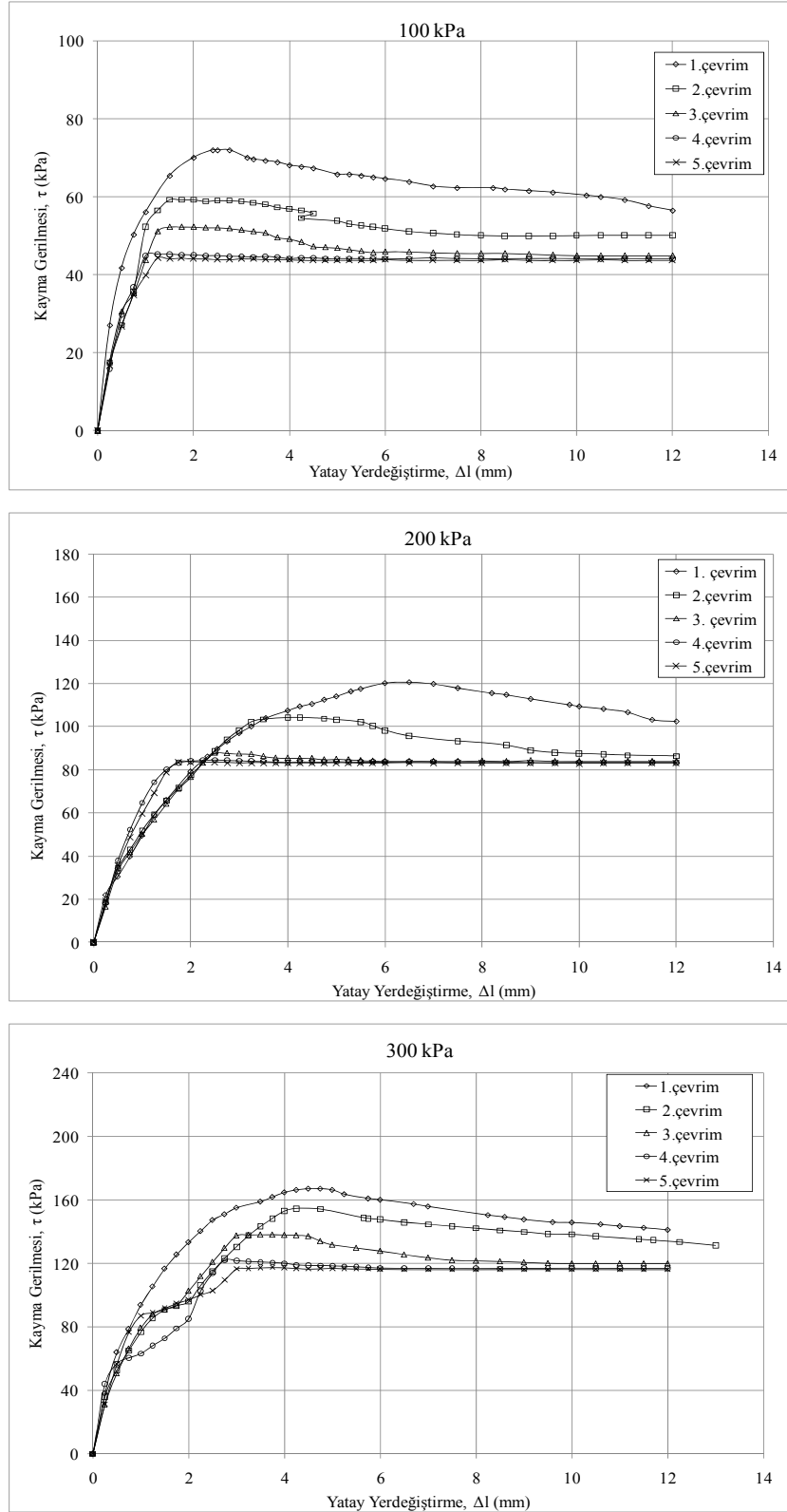
Şekil B. 29: AYS-15 numunesi kalıcı kayma direnci için deviatör gerilme – birim boy kısalma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısalma eğrileri ve mohr dairesi



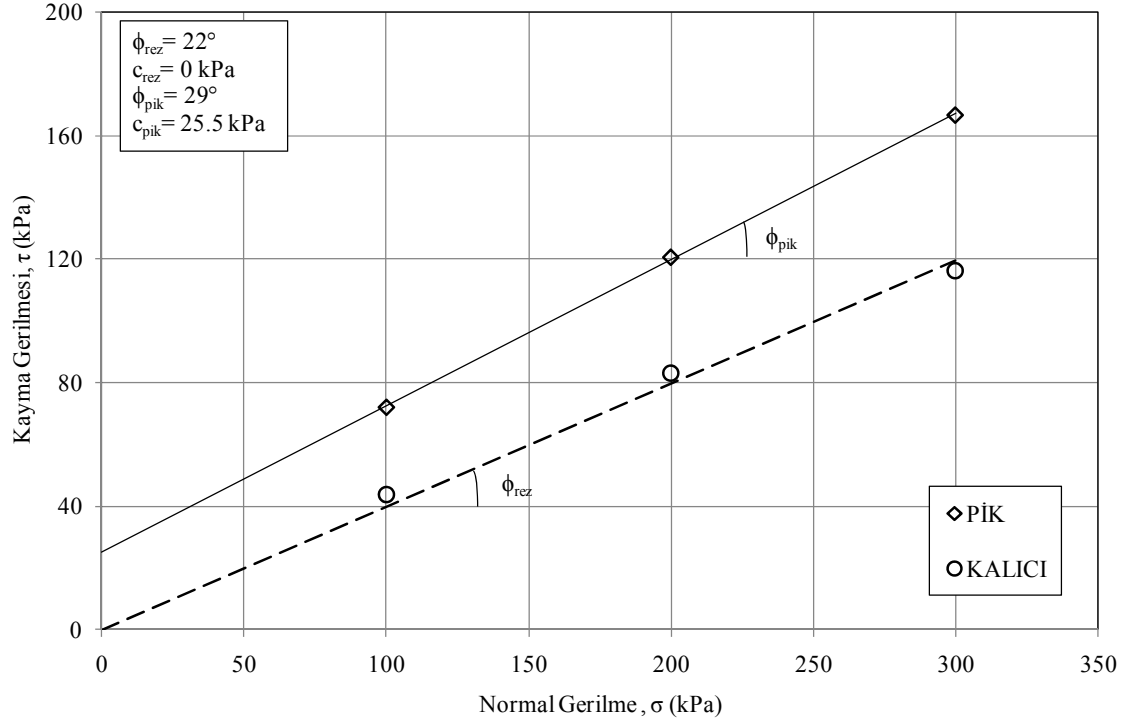
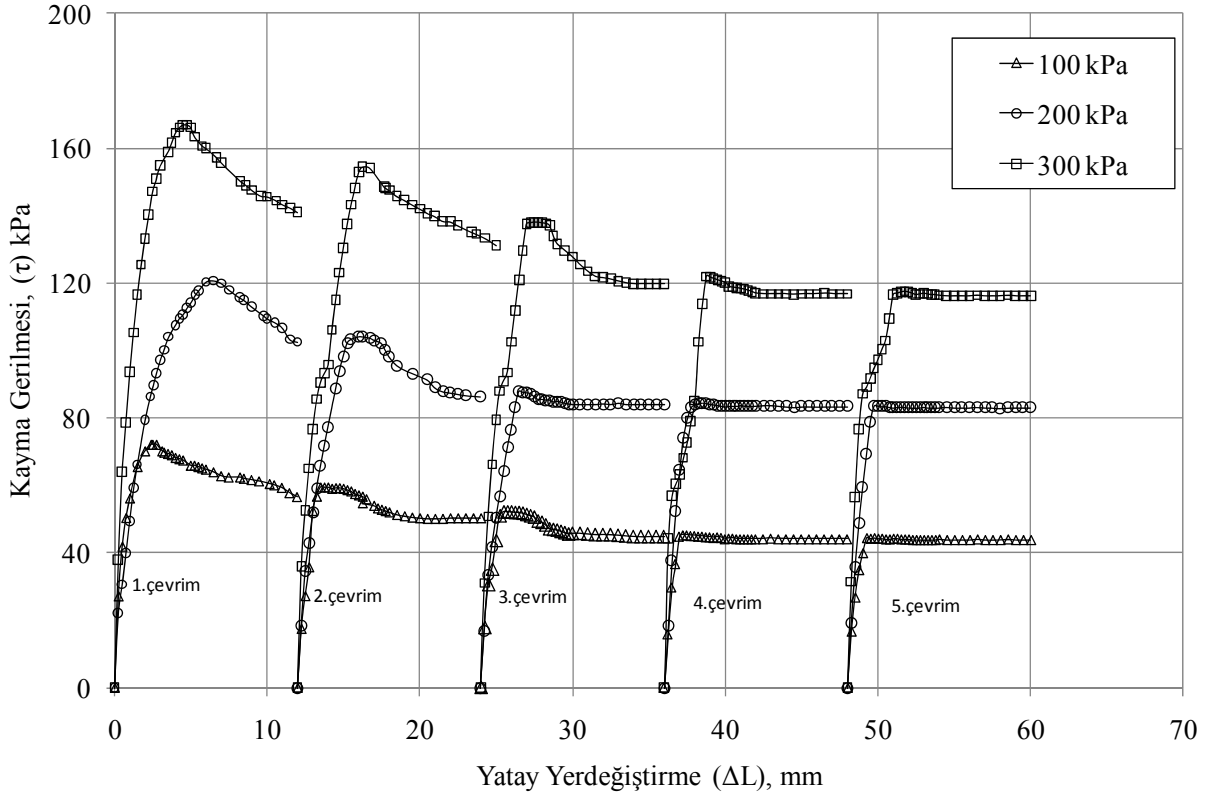
Şekil B. 30: AYS-15 numunesi pik kayma direnci için deviator gerilme – birim boy kısılma, boşluk suyu basıncı–birim boy kısılma eğrileri ve mohr dairesi

B.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri

B.2.1 AYS-2 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi

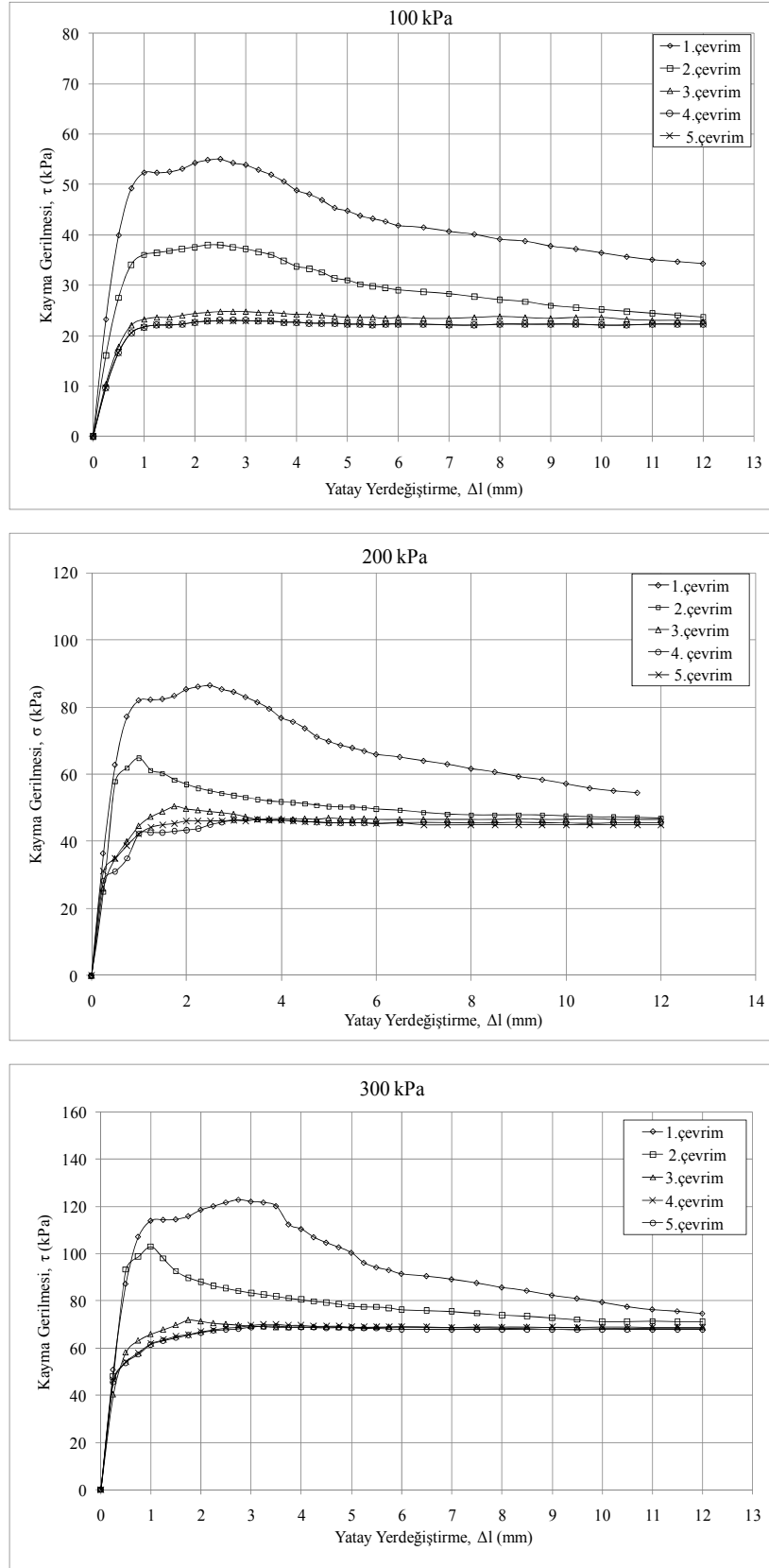


Şekil B. 31: AYS-2 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

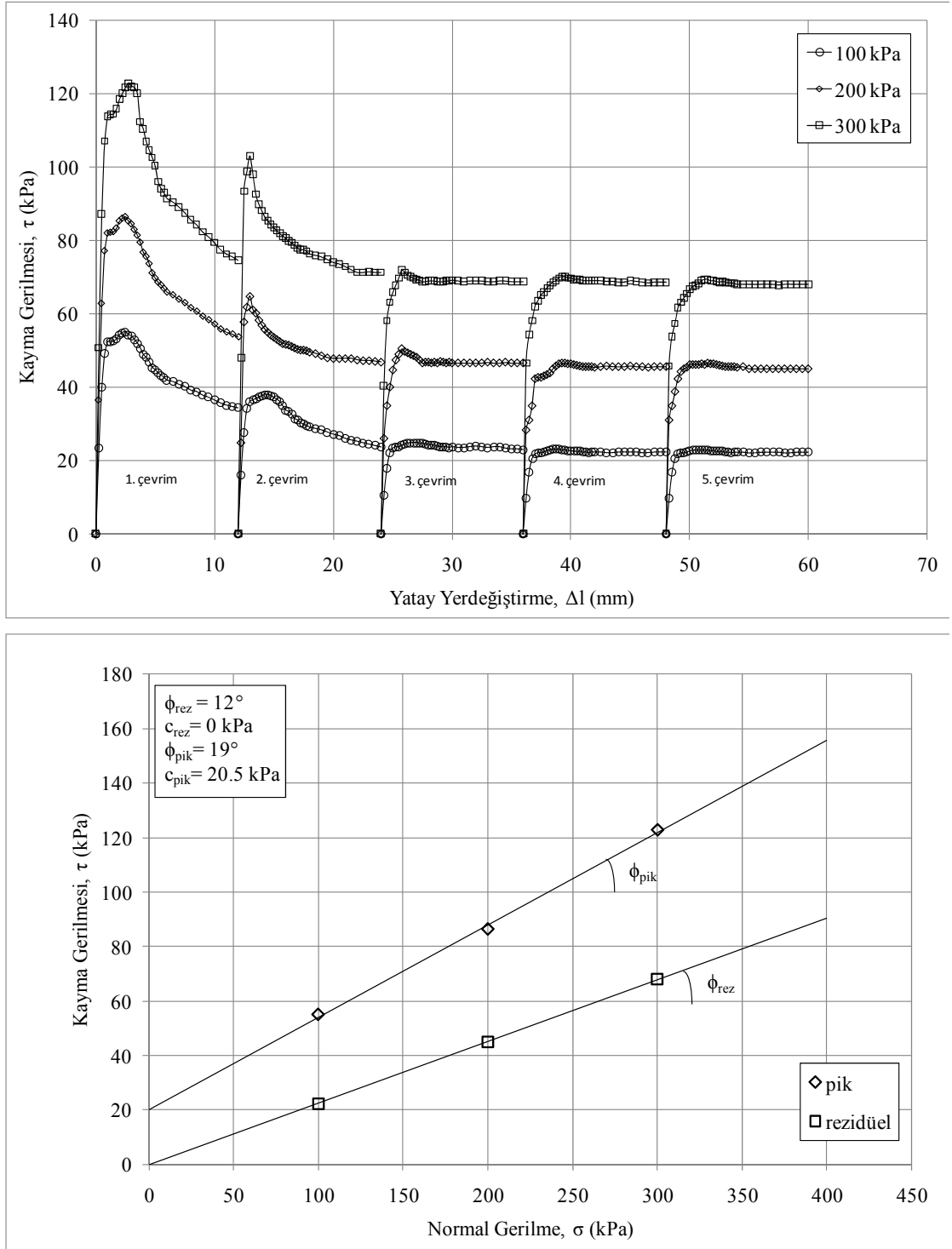


Şekil B. 32: AYS-2 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

B.2.2 AYS-7 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi

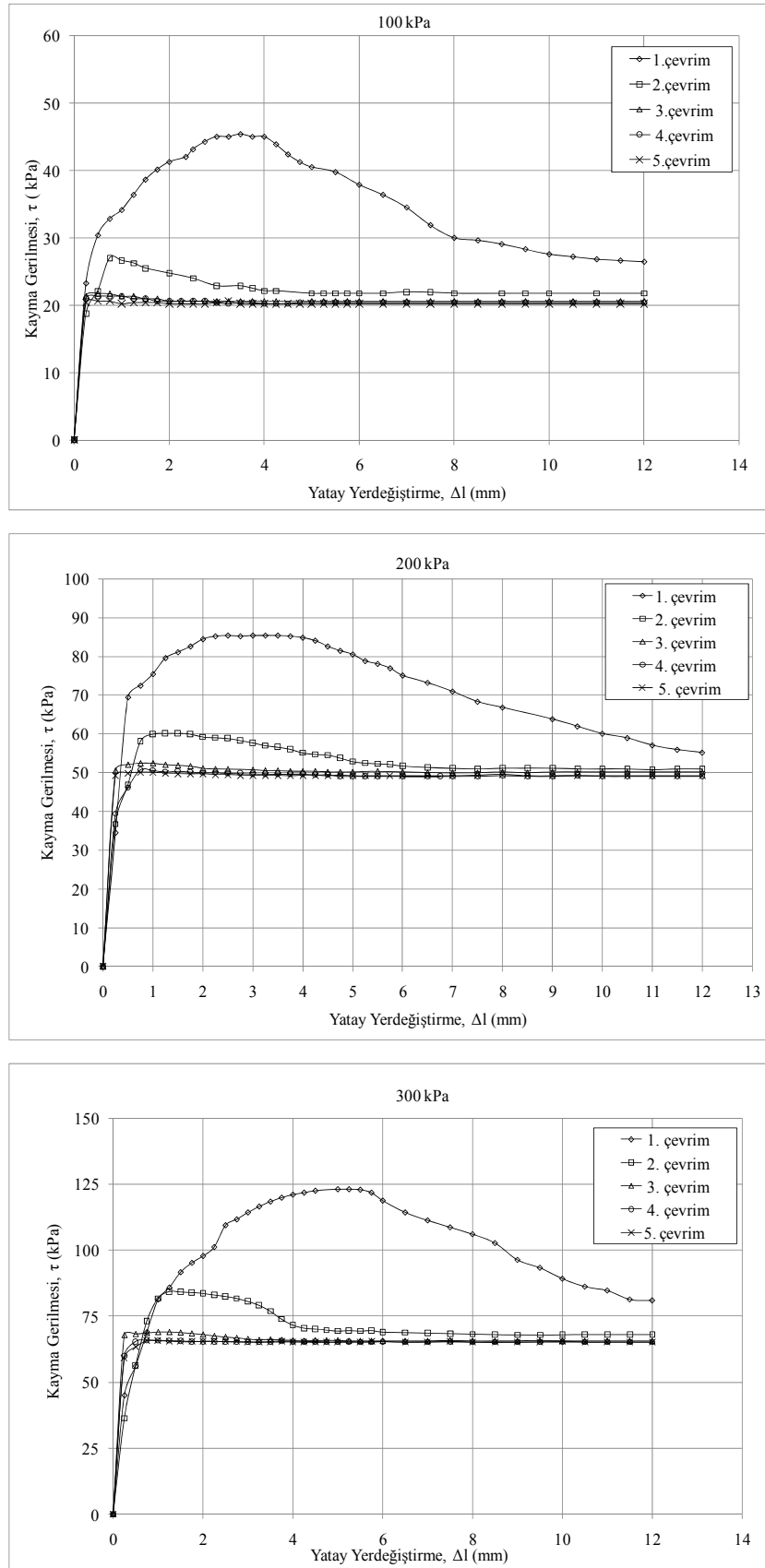


Şekil B. 33: AYS-7 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

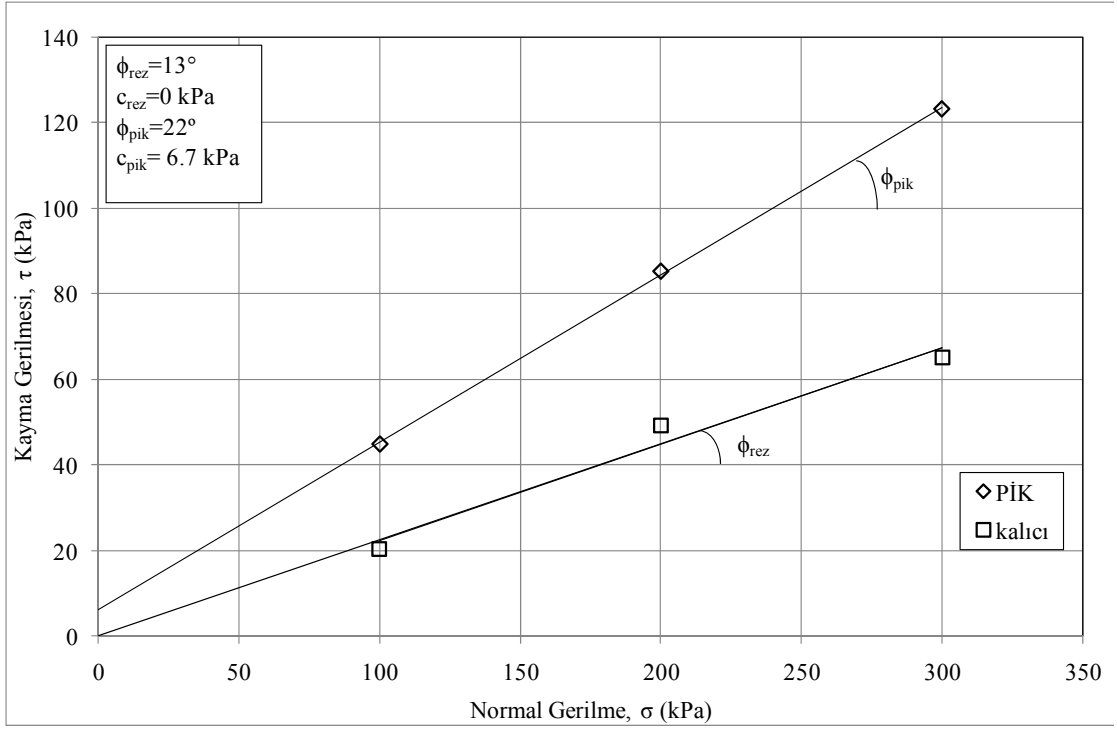
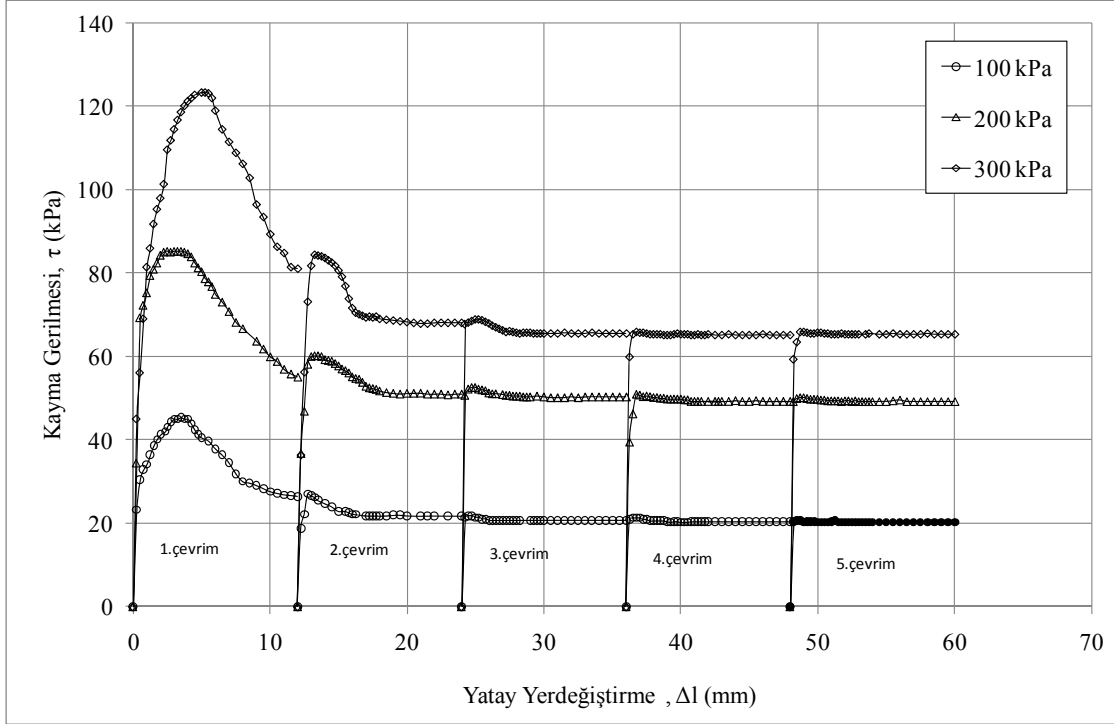


Şekil B. 34: AYS-7 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.3 AYS-9 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi

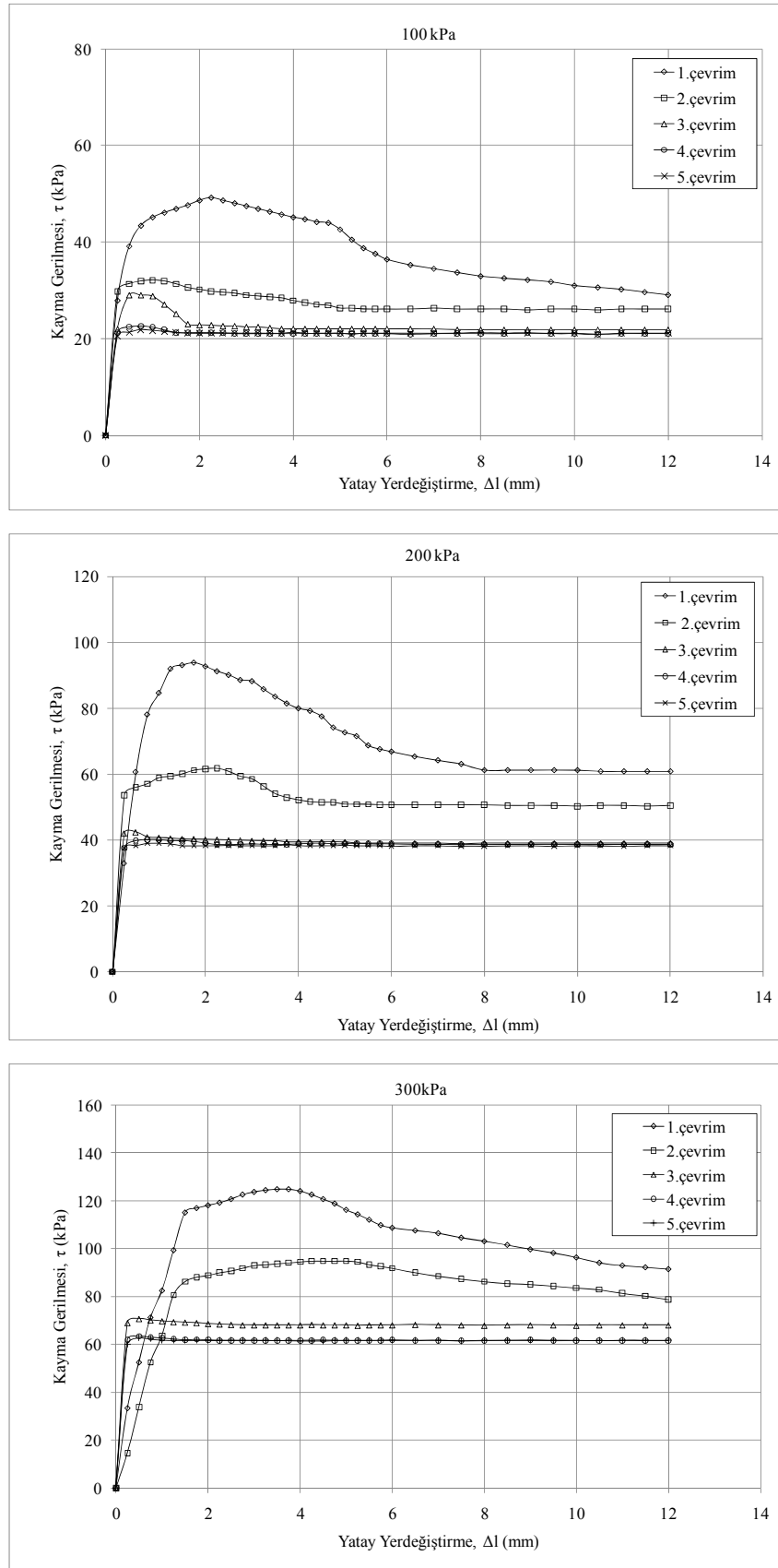


Şekil B. 35: AYS-9 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

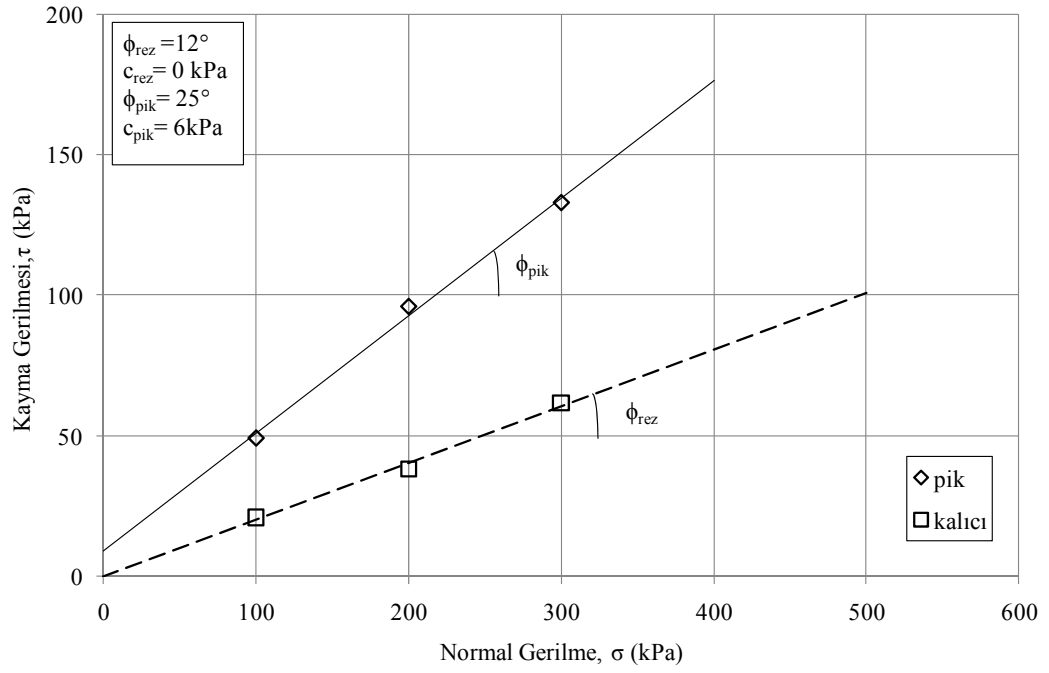
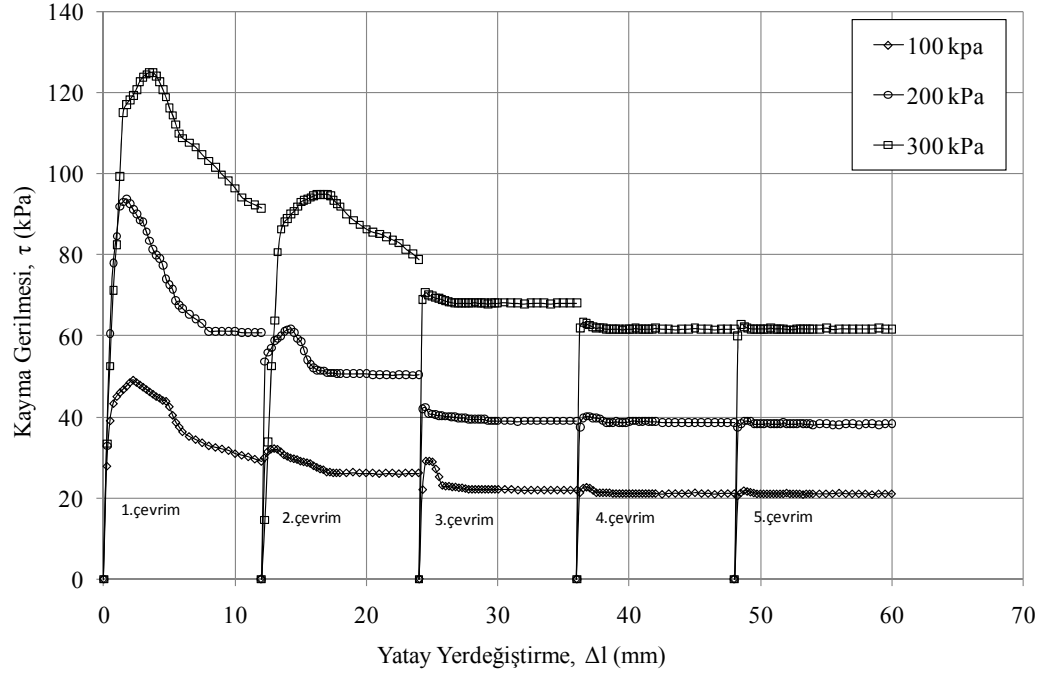


Şekil B. 36: AYS-9 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.4 AYS-10 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi

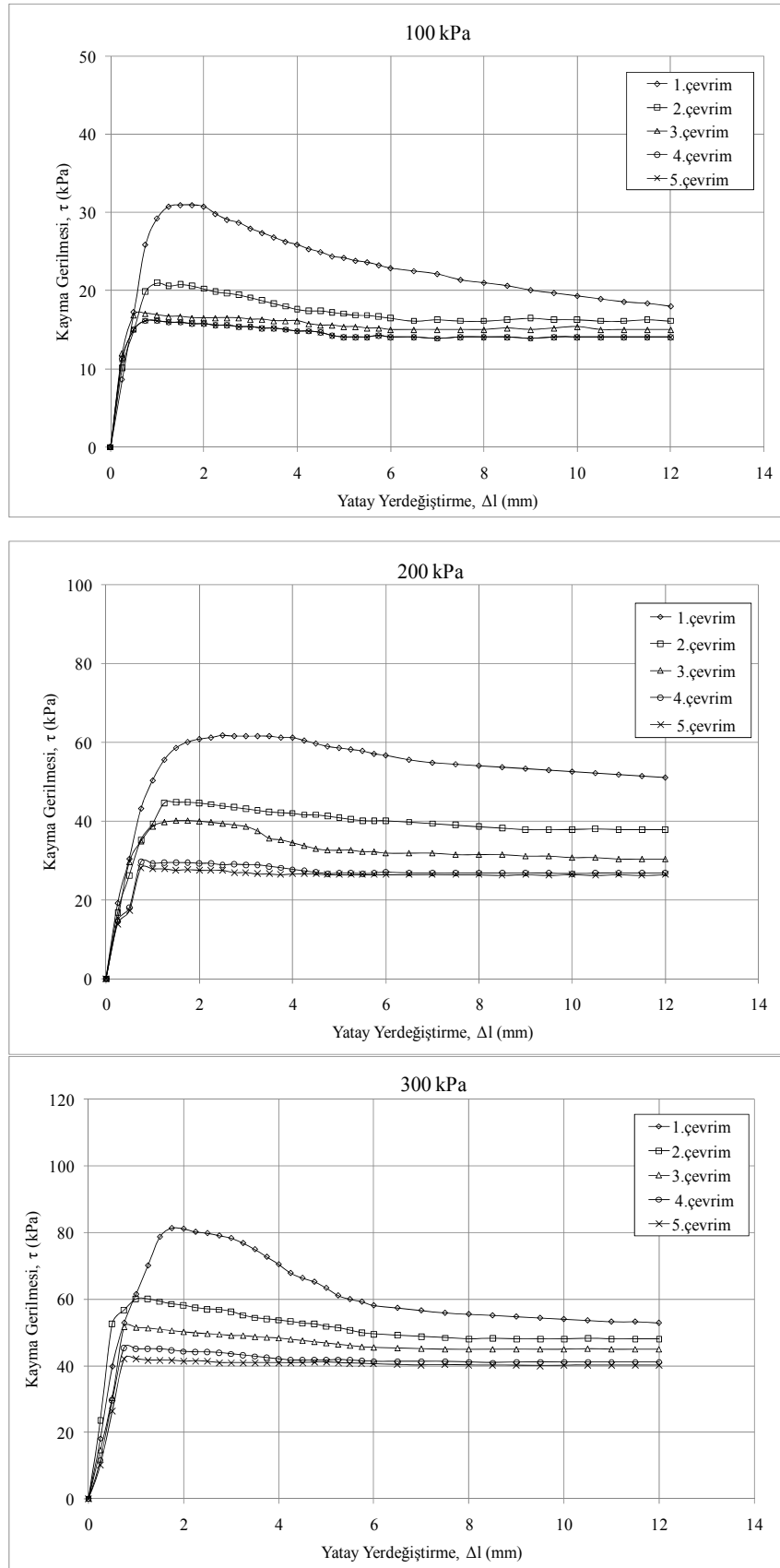


Şekil B. 37: AYS-10 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

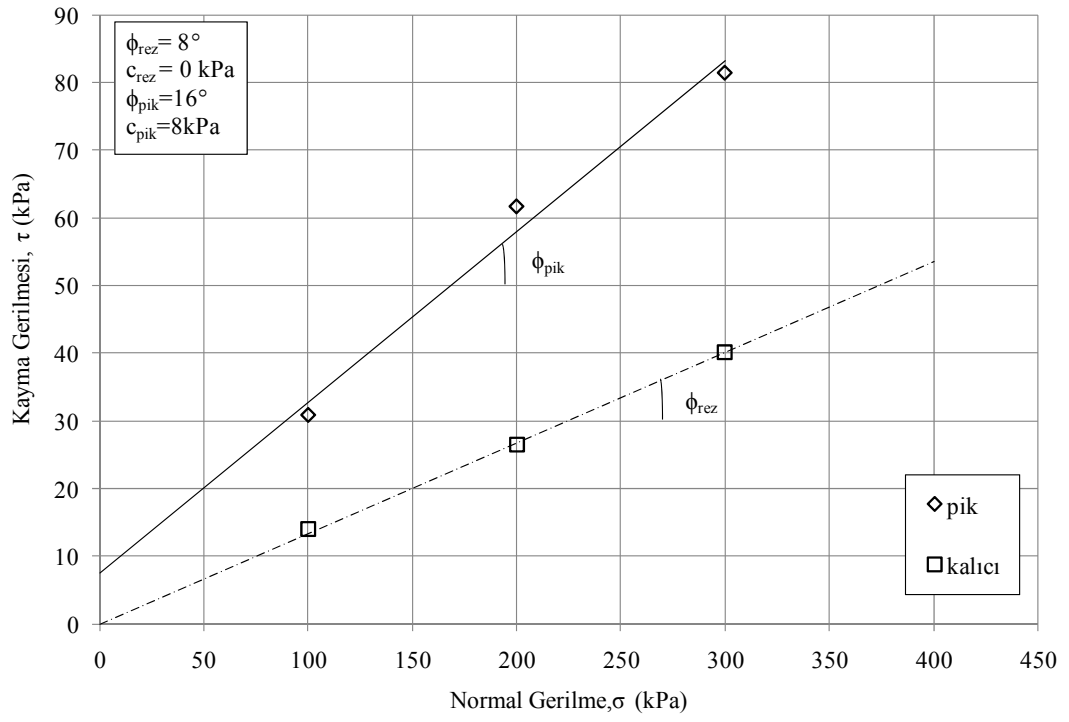
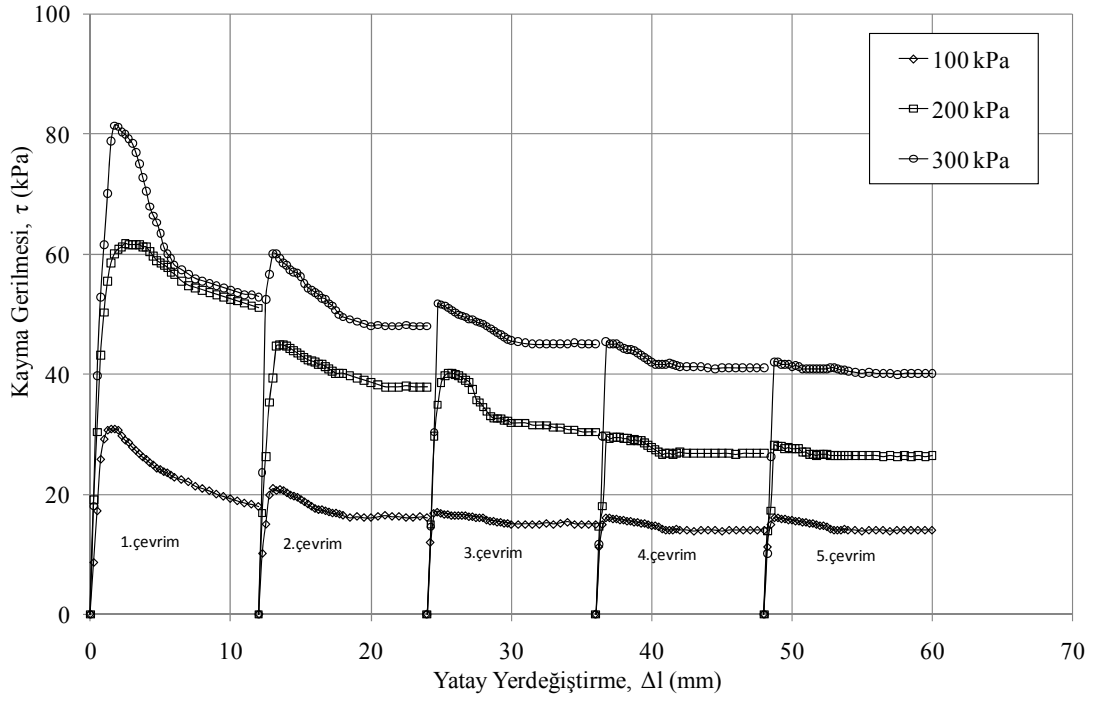


Şekil B. 38: AYS-10 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.5 AYS-11 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi

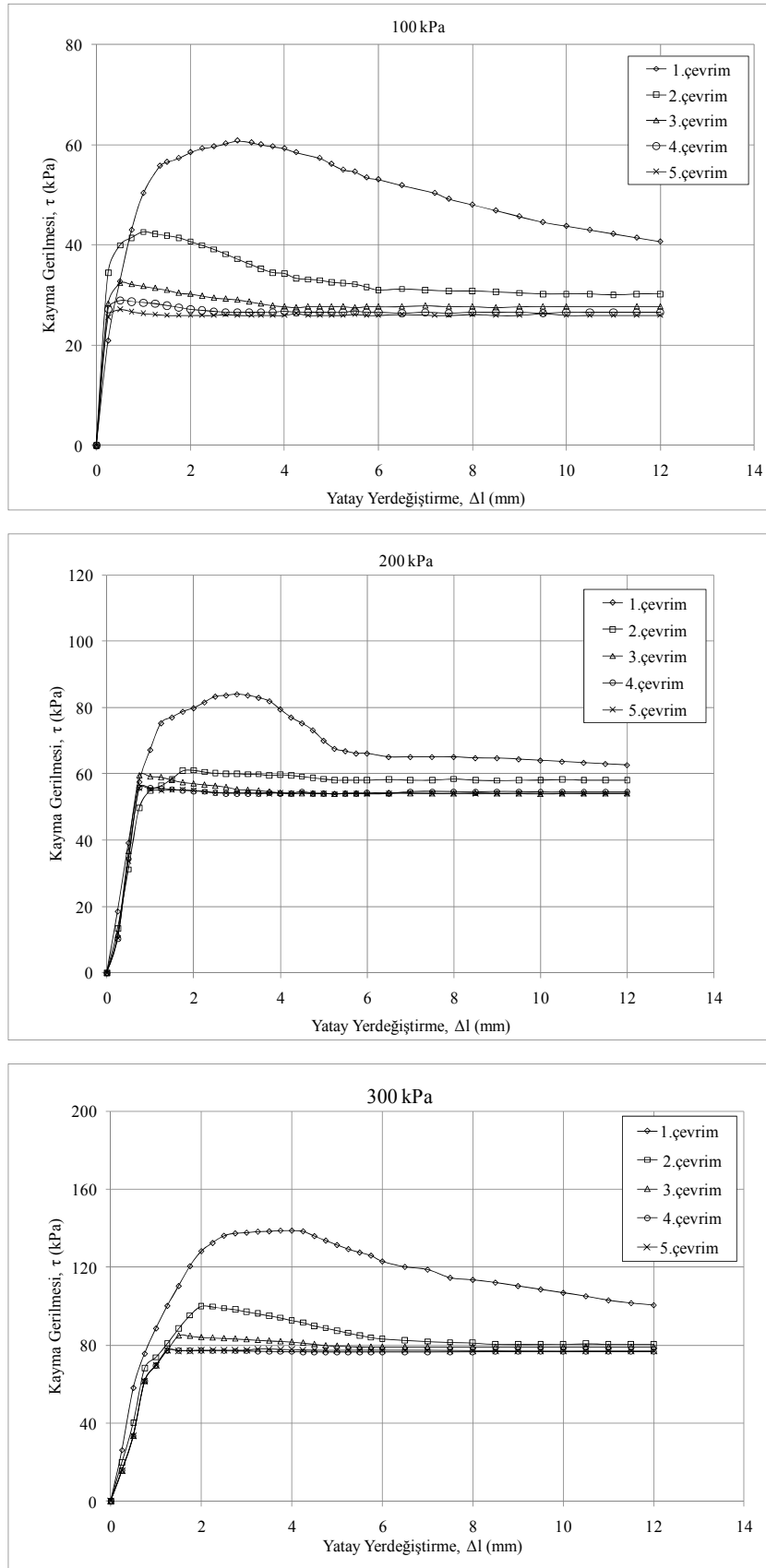


Şekil B. 39: AYS-11 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

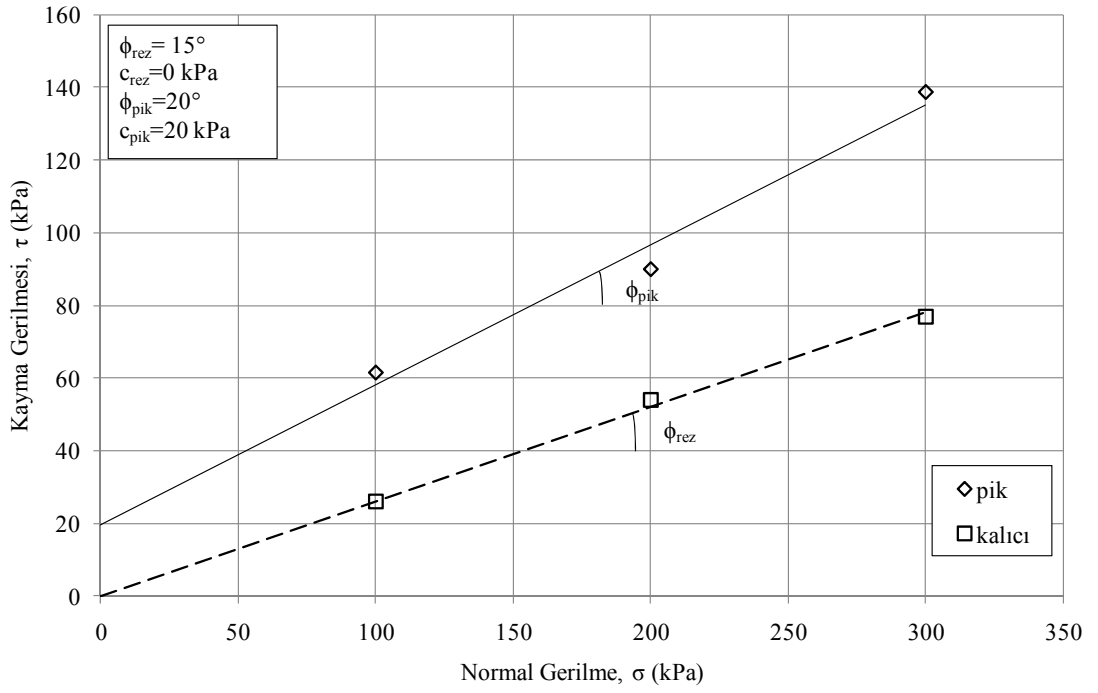
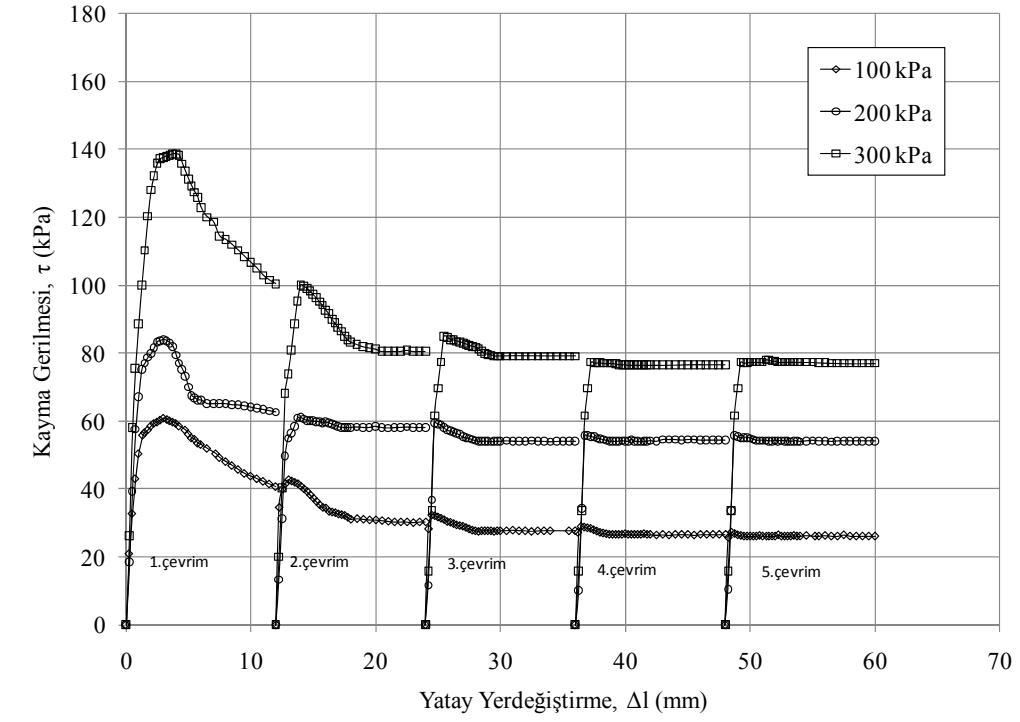


Şekil B. 40: AYS-11 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.6 AYS-12 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



Şekil B. 41: AYS-12 numunesi kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi



Şekil B. 42: AYS-12 numunesine ait kalıcı ve pik göçme zarflar

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ayşegül BAYIN

Doğum Yeri ve Tarihi: Tokat 10.06.1985

Adres: Şehit Ahmet Sk. No:22/4 Mecidiyeköy-Şişli/İstanbul

Lisans Üniversitesi: Cumhuriyet Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2002-2007, İstanbul.

Lise: Tokat Atatürk Lisesi