

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİSİTENİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ali Emre ATAÇ

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep İYİSAN

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİSİTENİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Emre ATAÇ

(501071302)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Recep İYİSAN (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. M. Şükrü ÖZÇOBAN (YTÜ)

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Kalıcı kayma mukavemetinin doğru bir şekilde belirlenmesi inşaat mühendisliğinde karşılaşılan çeşitli stabilite problemlerinin önlenmesi için büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde kayma mukavemetinin belirlenmesi için yaygın olarak kesme kutusu deneylerine başvurulmaktadır. Bu tez ile kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesindeki en güvenilir yöntem olan halka kesme deneyinin tanıtılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimlerini her zaman paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Sayın Recep İYİSAN'a, laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen Arş. Gör. İnş. Yük. Müh. Sayın Mustafa HATİPOĞLU'na, deneysel sonuçların değerlendirilmesi aşamasındaki desteğinden dolayı Dr. İnş. Yük. Müh. Sayın Gökhan ÇEVİKBİLEN'e, başta Tek. Sayın Semih VİÇ olmak üzere tüm laboratuvar çalışanlarına, deneysel çalışmalardaki özverisinden dolayı sevgili arkadaşım İnş. Müh. Sayın Ahmet R. ÜRKMEZ'e, Arş. Gör. Yük. Müh. Sayın Z. Nil TAYLAN'a ve annem, babam, kardeşim başta olmak üzere beni bugünlere getiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2009

Ali Emre ATAÇ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam.....	2
2. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİ	3
2.1 Mohr - Coulomb Göçme Hipotezi	3
2.2 Efektif Gerilmeler ve Kayma Mukavemeti	5
2.3 Kumların ve Killerin Kayma Mukavemeti.....	6
2.4 Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi.....	7
2.4.1 Kesme Kutusu Deneyi	7
2.4.2 Serbest Basınç Deneyi	8
2.4.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi.....	9
2.5 Kalıcı Kayma Mukavemeti ve Geoteknik Mühendisliğindeki Önemi	10
2.6 Kalıcı Kayma Mukavemeti Mekanizması	11
2.7 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Kayma Yerdeğiştirmesi ile Değişimi.....	13
2.8 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi.....	14
2.9 Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkiyen Faktörler.....	15
2.9.1 Mineralojinin Etkisi	16
2.9.2 Efektif Normal Gerilmenin Etkisi.....	20
2.9.3 Kesme Hızının Etkisi	21
2.10 Kalıcı Kayma Mukavemet Açısı ile Endeks Özellikleri Arasındaki İlişkiler	27
3. DENEYSEL ÇALIşMA	35
3.1 Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri	35
3.2 Numune Hazırlama Yöntemi	37
3.3 Halka Kesme Deney Düzenegi.....	38
3.3.1 Halka Kesme Deney Aletine Numune Yerleştirilmesi	39
3.3.2 Deney Numunesinin Halka Kesme Deney Aleti ile Kesilmesi.....	42
3.4 Kesme Kutusu Deney Aleti.....	52
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	53
4.1 Halka Kesme Deneyi Hesaplamaları.....	54
4.1.1 Kayma Gerilmelerinin Belirlenmesi	54
4.1.2 Düşey Sürtünme Kuvvetinin Hesaplanması	55
4.1.3 Düşey Deformasyonun Belirlenmesi	55
4.1.4 Numune Üzerindeki Normal Gerilmenin Belirlenmesi	55
4.2 Halka Kesme Deney Sonuçları.....	56

4.3 Tekrarlı Kesme Deneyi Hesaplamaları	57
4.4 Tekrarlı Kesme Deney Sonuçları	58
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
5.1 Kalıcı Kayma Mukavemet Açıları ile Kıvam Limitleri Arasındaki İlişkiler ...	61
5.2 Halka Kesme Deneyleri ile Tekrarlı Kesme Deneylerinin Karşılaştırılması ...	66
5.3 Halka Kesme Deney Sonuçlarının Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması	67
6. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	75

SEMBOL LİSTESİ

A_c	: Aktivite
c	: Kohezyon
I_p	: Plastisite indisi
KY	: Kil yüzdesi
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit
q_u	: Drenajsız serbest basınç mukavemeti
α'	: Hız etkisi katsayısı
γ_n	: Doğal birim hacim ağırlığı
ΔL	: Yatay yerdeğiştirme
ΔPI	: A hattına uzaklık
σ_1	: Büyük asal gerilme
σ_1	: Efektif gerilmeler cinsinden büyük asal gerilme
σ_3	: Küçük asal gerilme
σ_3	: Efektif gerilmeler cinsinden küçük asal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
ϕ	: Kayma mukavemeti açısı
ϕ_r	: Kalıcı kayma mukavemeti açısı
ϕ_p	: Pik kayma mukavemeti açısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Killerin serbest basınç dayanımına göre kıvamı (Özaydın, 2000)	8
Çizelge 2.2 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetlerin belirlendiği deplasman değerleri (Skempton, 1985)	13
Çizelge 2.3 : Halka kesme deneyinde incelenilen numunelerin kayma mukavemeti parametreleri, (Tiwari ve diğ., 2005)	15
Çizelge 2.4 : Başlıca kil minerallerinin dane özellikleri (Özaydın, 2000)	18
Çizelge 2.5 : Kil minerallerinin kıvam limit ve aktivite değerleri (Das, 2002)	19
Çizelge 2.6 : Geri analiz ve laboratuvar kalıcı mukavemetlerinin karşılaştırılması, (Skempton, 1985)	22
Çizelge 2.7 : Halka kesme deney sonuçları (Suzuki ve diğ., 2001)	25
Çizelge 2.8 : İlgilenilen numunelerin içerdikleri mineraller (Suzuki ve diğ., 2005)	30
Çizelge 3.1 : Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri	36
Çizelge 3.2 : Amplifikatör Başlangıç Değerleri	49
Çizelge 4.1 : Halka kesme deney sonuçları	57
Çizelge 4.2 : Tekrarlı kesme deney sonuçları	59
Çizelge 5.1 : ϕ_t - w_L arasında elde edilen bağıntılar	62
Çizelge 5.2 : ϕ_t - I_p arasında elde edilen bağıntılar	63
Çizelge 5.3 : ϕ_t - ($w_L + \Delta PI$) arasında elde edilen bağıntılar	63
Çizelge 5.4 : ϕ_t - w_p arasında elde edilen bağıntılar	64
Çizelge 5.5 : ϕ_t - (w_p/w_L) arasında elde edilen bağıntılar	65
Çizelge 5.6 : Halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonuçları	66
Çizelge A.1 : E1 numunesi elek analizi	77
Çizelge A.2 : E1 numunesi hidrometre analizi	77
Çizelge A.3 : E2 numunesi elek analizi	79
Çizelge A.4 : E2 numunesi hidrometre analizi	79
Çizelge A.5 : E3 numunesi elek analizi	81
Çizelge A.6 : E3 numunesi hidrometre analizi	81
Çizelge A.7 : E4 numunesi elek analizi	83
Çizelge A.8 : E4 numunesi hidrometre analizi	83
Çizelge A.9 : E7 numunesi elek analizi	85
Çizelge A.10 : E7 numunesi hidrometre analizi	85
Çizelge A.11 : E8 numunesi elek analizi	87
Çizelge A.12 : E8 numunesi hidrometre analizi	87
Çizelge A.13 : E9 numunesi elek analizi	89
Çizelge A.14 : E9 numunesi hidrometre analizi	89
Çizelge A.15 : E10 numunesi elek analizi	91
Çizelge A.16 : E10 numunesi hidrometre analizi	91
Çizelge A.17 : E11 numunesi elek analizi	93
Çizelge A.18 : E11 numunesi hidrometre analizi	93
Çizelge A.19 : E12 numunesi elek analizi	95
Çizelge A.20 : E12 numunesi hidrometre analizi	95
Çizelge A.21 : E13 numunesi elek analizi	97
Çizelge A.22 : E13 numunesi hidrometre analizi	97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Coulomb sürtünme teorisi (Bardet, 1997).....	3
Şekil 2.2 : Mohr gerilme daireleri ve göçme zarfı.....	4
Şekil 2.3 : Göçme durumunu gösteren toplam ve efektif gerilme daireleri ve kırılma zarfları	5
Şekil 2.4 : Üç eksenli basınç deneyi (Önalp, 2007).....	9
Şekil 2.5 : Kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi.....	11
Şekil 2.6 : Aşırı konsolide ve normal konsolide zeminlerin kayma mukavemetindeki düşüş (Skempton,1985).....	12
Şekil 2.7 : Kayma mukavemeti mekanizması (Lupini, 1981)	12
Şekil 2.8 : Halka kesme deney aleti.....	14
Şekil 2.9 : Örselenmemiş ve yoğurulmuş numunelerin kayma mukavemetlerinin deformasyonla değişimi (Tiwari ve diğ., 2005).....	16
Şekil 2.10 : Dane çapı-dane şekli ilişkisi (Mitchell, 1993)	16
Şekil 2.11 : Kaolinit ve kuvars minerallerinin elektron mikroskupu altındaki görünümü (Mitchell, 1993)	17
Şekil 2.12 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi (Skempton,1985)	20
Şekil 2.13 : Kil mineralojisinin kalıcı kayma mukavemete etkisi (Stark, 1994).....	20
Şekil 2.14 : Efektif normal gerilmenin kalıcı kayma mukavemete etkisi (Hawkins ve Privett, 1985).....	21
Şekil 2.15 : Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985) .	23
Şekil 2.16 : Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985) .	23
Şekil 2.17 : Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985) .	24
Şekil 2.18 : τ/σ_N ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001) .	25
Şekil 2.19 : τ/σ_N ile kesme hızı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)	25
Şekil 2.20 : α' ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).....	26
Şekil 2.21 : α' ile plastisite indisi arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).....	26
Şekil 2.22 : α' ile aktivite arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).....	27
Şekil 2.23 : kaolin numunesinin yüzeyinin elektron mikroskopi altındaki görünümü (Suzuki ve diğ., 2001)	27
Şekil 2.24 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).....	28
Şekil 2.25 : ϕ_r ile likit limit, kil yüzdesi ve efektif normal gerilme arasındaki ilişki (Stark, 1994).....	29
Şekil 2.26 : ϕ_r ile $w_L + \Delta PI$ arasındaki ilişki (Wesley, 2003).....	30
Şekil 2.27 : Kalıcı kayma mukavemetinin likit limit ile değişimi (Suzuki ve diğ., 2005).....	31
Şekil 2.28 : Kalıcı kayma mukavemetinin plastisite indisi ile değişimi (Suzuki ve diğ., 2005)	31
Şekil 2.29 : Kalıcı kayma mukavemeti ile plastik limit-likit limit oranı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2005).....	32

Şekil 2.30 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi (İyisan ve diğ., 2006).....	33
Şekil 2.31 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi (İyisan ve diğ., 2006).....	33
Şekil 2.32 : Halka kesme ile tekrarlı kesme deneylerinin karşılaştırılması (İyisan ve diğ., 2006).....	34
Şekil 3.1 : Numunelerin Casagrande Kartındaki Yeri	36
Şekil 3.2 : Rowe hücresi deney düzeneği	37
Şekil 3.3 : Rowe hücresiyle hazırlanmış deney numunesi.....	37
Şekil 3.4 : Halka Kesme Deney Aleti	38
Şekil 3.5 : Rowe hücresinden çıkarılan numuneden fazlalıkların kesilmesi	39
Şekil 3.6 : Numuneye dış ringin batırılması	40
Şekil 3.7 : Dış ring içerisine dairesel plakanın yerleştirilmesi	40
Şekil 3.8 : Numunelerin halka haline getirilmesi	41
Şekil 3.9 : İç kısmın oyularak çıkarılması	41
Şekil 3.10 : En alt dış ringin montajı	42
Şekil 3.11 : İç ringin montajı	43
Şekil 3.12 : Dış ringin alt ringe bağlanması.....	43
Şekil 3.13 : Deney numunesinin sisteme yerleştirilmesi	44
Şekil 3.14 : Çekme çubuklarının çekme metaline montajı	44
Şekil 3.15 : Basınç plakasının yerleştirilmesi.....	45
Şekil 3.16 : Somunların basınç plakasına değdirilmesi	45
Şekil 3.17 : Düşey yük şaftının yerleştirilmesi	46
Şekil 3.18 : Su yatağının yerleştirilmesi	46
Şekil 3.19 : Tork kolunun yerleştirilmesi	47
Şekil 3.20 : Ring çekme metalinin bağlanması.....	47
Şekil 3.21 : Somunların gevşetilmesi	48
Şekil 3.22 : Düşey deformasyon saatinin yerleştirilmesi.....	48
Şekil 3.23 : Amplifikatör ayarlanması.....	49
Şekil 3.24 : Basınç panelinden gerilme uygulanması	50
Şekil 3.25 : Hız kontrol kutusu	51
Şekil 3.26 : Kesilmiş bir numunenin deney sonrası görünümü	51
Şekil 3.27 : Halka kesme deney aleti.....	52
Şekil 4.1 : E1 numunesi halka kesme deney sonucu	56
Şekil 4.2 : E1 numunesi halka kesme deneyi göçme zarfı.....	56
Şekil 4.3 : E1 numunesi tekrarlı kesme deneyi sonucu	58
Şekil 4.4 : E1 numunesi tekrarlı kesme deneyi göçme zarfları	59
Şekil 4.5 : E1 numunesi halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonucu, $\sigma_n=100$ kPa	60
Şekil 4.6 : E1 numunesi halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonucu, $\sigma_n=200$ kPa	60
Şekil 5.1 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi.....	62
Şekil 5.2 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi.....	62
Şekil 5.3 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının $w_L + \Delta PI$ ile değişimi	63
Şekil 5.4 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi	64
Şekil 5.5 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının w_p/w_L oranı ile değişimi	64
Şekil 5.6 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ile değişimi.....	65
Şekil 5.7 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi	65
Şekil 5.8 : Halka kesme ile tekrarlı kesme deneylerinin karşılaştırılması	66
Şekil 5.9 : $\phi_t - w_L$ ilişkilerinin karşılaştırılması	67
Şekil 5.10 : $\phi_t - I_p$ ilişkilerinin karşılaştırılması	68
Şekil A.1 : E1 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	78

Şekil A.2 : E2 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	80
Şekil A.3 : E3 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	82
Şekil A.4 : E4 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	84
Şekil A.5 : E7 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	86
Şekil A.6 : E8 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	88
Şekil A.7 : E9 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	90
Şekil A.8 : E10 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	92
Şekil A.9 : E11 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	94
Şekil A.10 : E12 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	96
Şekil A.11 : E13 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi.....	98
Şekil B.1 : E2 numunesi halka kesme deney sonucu.....	99
Şekil B.2 : E2 numunesi kalıcı göçme zarfı.....	99
Şekil B.3 : E3 numunesi halka kesme deney sonucu	100
Şekil B.4 : E3 numunesi kalıcı göçme zarfı	100
Şekil B.5 : E4 numunesi halka kesme deney sonucu	101
Şekil B.6 : E4 numunesi kalıcı göçme zarfı	101
Şekil B.7 : E5 numunesi halka kesme deney sonucu	102
Şekil B.8 : E5 numunesi kalıcı göçme zarfı	102
Şekil B.9 : E6 numunesi halka kesme deney sonucu	103
Şekil B.10 : E6 numunesi kalıcı göçme zarfı	103
Şekil B.11 : E7 numunesi halka kesme deney sonucu	104
Şekil B.12 : E7 numunesi kalıcı göçme zarfı	104
Şekil B.13 : E8 numunesi halka kesme deney sonucu	105
Şekil B.14 : E8 numunesi kalıcı göçme zarfı	105
Şekil B.15 : E9 numunesi halka kesme deney sonucu	106
Şekil B.16 : E9 numunesi kalıcı göçme zarfı	106
Şekil B.17 : E10 numunesi halka kesme deney sonucu	107
Şekil B.18 : E10 numunesi kalıcı göçme zarfı	107
Şekil B.19 : E11 numunesi halka kesme deney sonucu	108
Şekil B.20 : E11 numunesi kalıcı göçme zarfı	108
Şekil B.21 : E12 numunesi halka kesme deney sonucu	109
Şekil B.22 : E12 numunesi kalıcı göçme zarfı	109
Şekil B.23 : E13 numunesi halka kesme deney sonucu	110
Şekil B.24 : E13 numunesi kalıcı göçme zarfı	110
Şekil B.25 : E14 numunesi halka kesme deney sonucu	111
Şekil B.26 : E14 numunesi kalıcı göçme zarfı	111
Şekil B.27 : E15 numunesi halka kesme deney sonucu	112
Şekil B.28 : E15 numunesi kalıcı göçme zarfı	112
Şekil C.1 : E4 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa	113
Şekil C.2 : E4 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	113
Şekil C.3 : E4 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	114
Şekil C.4 : E4 numunesi göçme zarfları.....	114
Şekil C.5 : E5 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa	115
Şekil C.6 : E5 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	115
Şekil C.7 : E5 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	116
Şekil C.8 : E5 numunesi göçme zarfları.....	116
Şekil C.9 : E6 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa	117
Şekil C.10 : E6 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	117
Şekil C.11 : E6 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	118
Şekil C.12 : E6 numunesi göçme zarfları.....	118

Şekil C.13 : E7 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa.....	119
Şekil C.14 : E7 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	119
Şekil C.15 : E7 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	120
Şekil C.16 : E7 numunesi göçme zarfları.....	120
Şekil C.17 : E8 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa.....	121
Şekil C.18 : E8 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	121
Şekil C.19 : E8 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	122
Şekil C.20 : E8 numunesi göçme zarfları.....	122
Şekil C.21 : E10 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa.....	123
Şekil C.22 : E10 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	123
Şekil C.23 : E10 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	124
Şekil C.24 : E10 numunesi göçme zarfları.....	124
Şekil C.25 : E11 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa.....	125
Şekil C.26 : E11 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa	125
Şekil C.27 : E11 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa	126
Şekil C.28 : E11 numunesi göçme zarfları.....	126

PLASTİSİTENİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNE ETKİSİ

ÖZET

Zeminlerin kayma mukavemeti, zemin kütlesinde göçme olmadan karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir. Taşıma gücü, şev stabilitesi, istinat yapılarına gelen yanal toprak basıncı gibi stabilite problemlerinin analizi için zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi gerekmektedir. Sıkı kumlarda ve aşırı konsolide killerde göçme gerilmesine ulaşınca kadar kayma gerilmesi ve şekil değiştirme artmaktadır. Göçme durumundan sonra kayma gerilmesi azalmaya başlamakta ve büyük deformasyonlar sonrası sabit bir değerde kalmaktadır. Sabit kalan mukavemete kalıcı kayma mukavemeti denilmektedir. Killi zeminlerde kalıcı duruma ulaşıldığında daneler arasındaki bağlar etkinliklerini yitirdiğinden genelde kohezyon etkisi görülmemektedir. Kalıcı kayma mukavemeti mineraloji, efektif normal gerilme seviyesi ve kesme hızından etkilenmektedir. Laboratuvar koşullarında kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla yaygın olarak halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney yöntemleri kullanılmaktadır. Kesme kutusu deneyinde, kalıcı mukavemete ulaşınca kadar numune ileri-geri kesilmektedir. Bu nedenle numune sürekli aynı yönde kaymaya maruz bırakılmamaktadır. Halka kesme deneyi, numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya izin verecek şekilde geliştirildiğinden ve kohezyonlu zeminlerde görülen rotasyonel kaymayı modellemesinden dolayı tekrarlı kesme kutusu deneyinden güvenli sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada farklı özelliklere sahip kil numuneler üzerinde halka kesme deneyleri ve tekrarlı kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve plastisite indisi ile değişimi incelenmiştir. Deney sonuçları önceki çalışmalarla karşılaştırılarak pratik amaçlar için çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir.

THE EFFECT OF PLASTICITY ON RESIDUAL SHEAR STRENGTH

SUMMARY

The shear strength of a soil mass is the internal resistance per unit area that the soil mass can offer to resist failure and sliding along any plane inside it. One must understand the nature of shearing resistance in order to analyze soil stability problems, such as bearing capacity, slope stability and lateral pressure on earth retaining structures. In dense sands and overconsolidated clays, the resisting shear stress increases with shear displacement until a failure shear stress is reached. After that, the shear resistance remains approximately constant for any further increase in the shear displacement. This constant value is called residual shear strength. In clayey soils, cohesion is not observed at residual state due to the bond weakening in clay particles. Residual shear strength is mainly effected from mineralogy, effective normal stress level and shearing speed. Ring shear test and reversal direct shear tests are widely used methods to determine the residual strength parameters. The ring shear test is more reliable than the reversal direct shear test method because of its suitability for large displacement conditions and analogy of its shearing mechanism to rotational landslide movement. In this study, ring shear tests and reversal direct shear tests were carried out for different types of clays. The effect of plasticity on residual shear strength was studied. Variations of the residual shear strength angle with liquid limit and plasticity index were examined.

1. GİRİŞ

Zemine uygulanan yükler, derinlik boyunca zemin tabakalarında gerilme artışlarına ve dolayısıyla zeminin şekil değiştirmesine neden olmaktadır. Zeminlerin gerilme - şekil değiştirme ilişkisi, zeminin yük altındaki davranışına, başlangıç gerilme durumuna, gerilme tarihçesine, yükleme hızına ve yükleme sırasında zemin suyunun drenaj koşullarına bağlı olmaktadır. Zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmelerin genellikle gerilme seviyesi ile doğrusal olarak artmadığı ve uygulanan yükler kaldırıldığında kalıcı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle zeminlerdeki gerilme - şekil değiştirme davranışının genellikle doğrusal olmayan viskoz - plastik bir davranış biçimi olduğu kabul edilmiştir.

Zeminler üzerine uygulanan yüklerin yol açtığı gerilmeler, zeminin kayma mukavemetini aştığı zaman göçme meydana gelmektedir. Zeminlerde gözlenen göçme türü, zeminin cinsine ve özelliklerine bağlı olmakla beraber, genellikle izin verilen şekil değiştirmelerin aşılması olarak tanımlanmaktadır. Temellerin taşıma gücü, şevlerin stabilitesi, istinat yapılarına gelen yanal toprak basınçlarının belirlenmesi ve zeminlerin yerdeğiştirmeye karşı direncinin hesabı gibi stabilite problemlerinde, göçmeye yol açan kuvvetler ile karşı koyan kuvvetlerin karşılaştırılması ve göçmeye karşı bir güvenlik sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Göçmeye karşı koyan kuvveti, olası göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma direnci oluşturmaktadır (Özaydın, 2000).

Zeminlerin kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkileri incelendiğinde, kayma gerilmesinin aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda deformasyonun artmasıyla önce belirli bir pik değere kadar arttığı daha sonra azalarak sabit bir değer aldığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin bu sabit değeri zeminin kalıcı (residual) mukavemeti olarak tanımlanmıştır. Normal konsolide killerde veya gevşek kumlarda ise belirli bir pik gerilme görülmemekle birlikte, kayma gerilmesinin yönlendiği değer kalıcı kayma mukavemetini oluşturmaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti mineralojik yapıdan, efektif normal gerilme seviyesinden ve kesme hızından etkilenmektedir (Skempton, 1985 ; Mitchell, 1993).

Zemin tabakalarının gerilme - şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek için birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde yaygın olarak halka kesme ve kesme kutusu deneyleri kullanılmaktadır. Halka kesme deneyi numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya izin verecek şekilde geliştirilmiştir. Bu özelliğe ek olarak, kohezyonlu zeminlerde görülen rotasyonel kaymayı modellemesinden kalıcı kayma mukavemeti güvenli bir şekilde belirlenebilir (Bishop, 1971).

1.1 Amaç

Bu çalışmada zeminlerin kalıcı kayma mukavemet parametrelerini belirlemek ve plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisini araştırmak amacıyla halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde farklı endeks özelliklerine sahip kil numuneleri kullanılmıştır. Tüm numuneler en az iki gün süre ile konsolide edildikten sonra farklı normal gerilmeler altında kesilmiştir. Halka kesme deneyleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan deney aletinin en düşük hızı olan 20 mm/dk kesme hızında, tekrarlı kesme deneyleri ise 0.035 mm/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney sistemlerinde boşluk suyu basınçlarındaki değişimleri belirleme imkanı bulunmadığından, toplam gerilmelere göre çalışılmıştır.

1.2 Kapsam

Çalışmanın ikinci bölümü, zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti hakkında genel bilgileri ve konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmaları içermektedir. Üçüncü bölümde, bu çalışmada incelenen numunelerin genel özellikleri ile kullanılan deney yöntemleri yer almaktadır.

Tezin dördüncü bölümünde, yapılan deneylerin sonuçları ve değerlendirmeleri bulunmaktadır. Çalışmanın beşinci bölümünde ise kullanılan numunelerin kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenerek pratik amaçlar için belirlenen çeşitli korelasyonlara değinilmiştir.

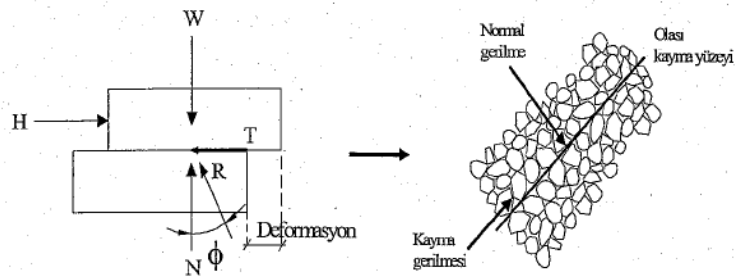
2. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİ

Zeminlerde göçme meydana gelmesi için, olası bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması gereklidir. Belirli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin ortaklaşa etkisi sonucu göçme ortaya çıkmaktadır. Zeminin kayma mukavemeti ise, göçmeye meydan vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır.

Bu bölümde; zeminlerin kayma mukavemeti, zeminde göçme durumu, kalıcı kayma mukavemeti mekanizması, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan laboratuvar deneyleri, kalıcı kayma mukavemetinin geoteknik mühendisliğindeki önemi, kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörler ve kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri arasında kurulan ilişkiler anlatılmıştır.

2.1 Mohr - Coulomb Göçme Hipotezi

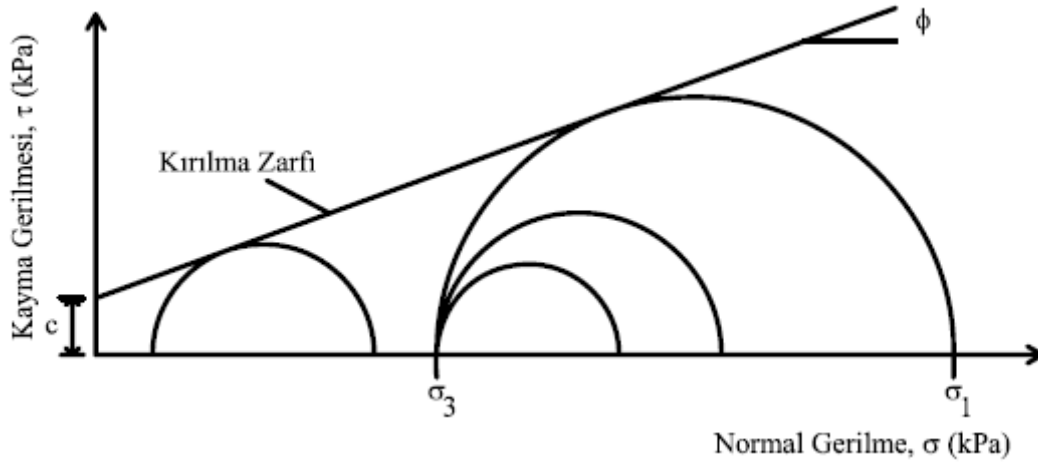
Zeminlerin kayma direncinin matematiksel bir ifade ile gösterimi Coulomb (1776) ve Tresca (1869) ile başlamıştır. Zeminler için ilk geçerli göçme hipotezi ilk kez 1911 yılında Mohr tarafından geliştirilmiştir. Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan Mohr hipotezini yıllar içinde başka teoriler izlemiştir. Bunlar arasında en basit olanı ve uygulamada yaygın olarak kullanılanı Mohr - Coulomb göçme hipotezidir. Bu hipoteze göre zeminlerin kayma mukavemeti, Coulomb sürtünme yasasına dayanmaktadır. Şekil 2.1’de birbirleri üzerinde kaydırılmaya çalışılan iki blok yer almaktadır. Hareketin gerçekleşmesi için uygulanan H kuvvetinin bloklar arasındaki sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir (Bardet, 1997).



Şekil 2.1 : Coulomb sürtünme teorisi (Bardet, 1997)

Mohr hipotezi zamanla Coulomb'un yatay bağıntısı ile birleştirilerek Mohr-Coulomb göçme hipotezi oluşturulmuştur. Buna göre zeminin kayma mukavemeti Şekil 2.2'de gösterilen kırılma zarfı ile temsil edilmektedir. Bu şekilde, normal gerilmeler yatay eksen, kayma gerilmeleri düşey eksen üzerinde gösterilmektedir. Kırılma zarfının altında kalan gerilme durumları için göçme ortaya çıkmazken, bu zarfa ulaşıldığı anda zeminde göçme meydana gelmektedir. 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 mukavemetini veren bağıntı;

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



Şekil 2.2 : Mohr gerilme daireleri ve göçme zarfı

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte, c ve ϕ kayma mukavemeti parametrelerini göstermektedir. ϕ açısı zeminin kayma mukavemeti açısı olarak bilinmektedir. Kayma mukavemeti açısı dane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci ve danelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Mohr - Coulomb göçme hipotezindeki diğer kayma mukavemeti parametresi c ise kohezyondur. Bu katsayısının yaygın bilinen açıklaması danelerin birbirini tutma özelliğinden kaynaklandığı şeklindedir. Kayma mukavemeti parametreleri, belirli bir zemin için sabit olmayıp, deney sırasında hakim olan yükleme ve drenaj koşullarına göre değişirler (Özaydın, 2000).

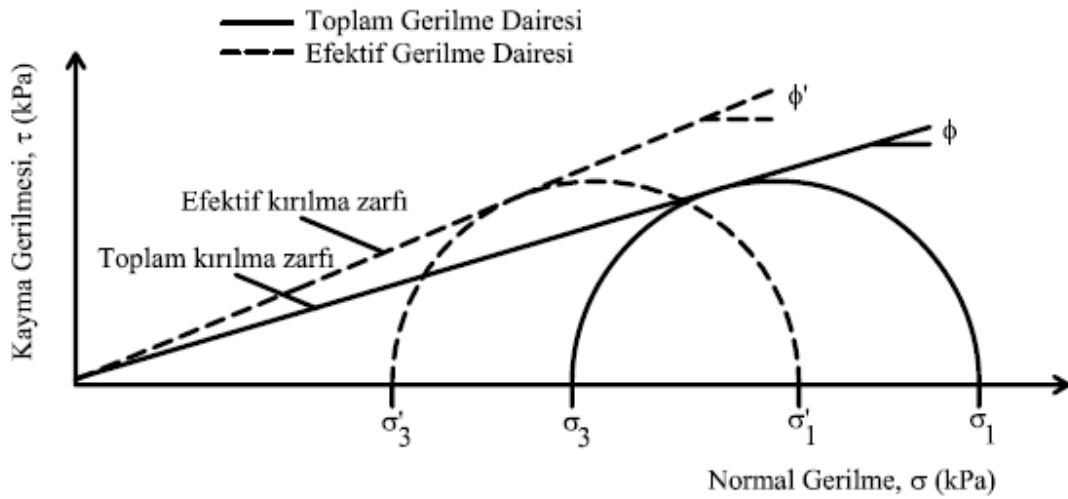
2.2 Efektif Gerilmeler ve Kayma Mukavemeti

İnşaat mühendisliğinde stabilite problemlerinin analizinin hangi yaklaşımla yapılacağına zemin türü, yükleme hızı ve drenaj koşullarına bakılarak karar verilir. Boşluk suyu basınçları zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesinde önemli bir etkindir. Zeminin toplam ve efektif gerilme türünden ifade edilen kayma direnci önemli farklar gösterebilmektedir. Bu nedenle zeminin kayma mukavemetini efektif gerilmeler cinsinden ifade etmek daha gerçekçi olmaktadır. Mohr-Coulomb göçme kriterine göre kayma mukavemetinin veren bağıntı efektif gerilmeler cinsinden yazılacak olursa;

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (2.2)$$

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

Mohr gerilme dairelerini, toplam gerilmeler cinsi ile birlikte efektif gerilmeler cinsinden de çizmek mümkün olmaktadır. Şekil 2.3'te toplam ve efektif gerilme daireleri ve bu dairelere teğet olan göçme zarfları gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Göçme durumunu gösteren toplam ve efektif gerilme daireleri ve kırılma zarfları

2.3 Kumların ve Killerin Kayma Mukavemeti

Kumlarda c , kohezyon parametresi sıfır değerini aldığından kayma mukavemeti bağıntısı

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

şeklini almaktadır. Arazide, statik yüklemeler altında kumlarda drenajlı koşulların geçerli olduğu kabul edilmektedir. Yükleme sırasında boşluk suyunun zeminden dışarı çıkabilmesiyle, boşluk suyu basınçlarında herhangi bir değişiklik oluşmamaktadır. Bu nedenle kumların arazi yüklemeleri altındaki davranışı incelenirken, drenajlı kayma mukavemeti açısının belirlenmesi yeterli olmaktadır.

Suya doymun ince kum tabakalarının arazide deprem yüklerine maruz kalması durumunda, zemin suyunun dışarı çıkmaya fırsat bulamaması nedeniyle, boşluk suyu basınçlarında büyük artışlar meydana gelmektedir. Gevşek kumlarda, boşluk suyu basınçlarının çevre basıncına eşit hale gelmesi durumunda kum tabakası mukavemetini tamamen kaybetmektedir. Geoteknik mühendisliğinde bu olay sıvılaşma olarak tanımlanmıştır (Özaydın, 2000).

Kumlarda kayma mukavemeti açısı, kumun sıklık derecesinden, dane çapı dağılımından, dane biçiminden ve danelerin mineral yapısından etkilenmektedir.

Killerin kayma mukavemetinin arazide oluşacak koşullar altında belirlenmesi kumlara göre daha karışıktır. Arazide, bir kil tabakasının suya doymunluk derecesi, başlangıç gerilme durumu ile kayma gerilmelerinin oluşması sırasında geçerli yükleme ve drenaj koşulları zeminlerin kayma mukavemetini büyük ölçüde etkilemektedir. Killerde ölçülecek kayma mukavemeti parametrelerinin toplam ve efektif gerilmelere göre belirlenmesi tasarımların güvenli yapılabilmesi için önem taşımaktadır. Arazide hızlı yükseltilecek killer için genellikle drenajsız kayma mukavemeti parametrelerinin kullanıldığı toplam gerilme analizleri uygulanırken, yavaş yüklemeli durumlarda efektif kayma mukavemeti parametrelerinin kullanıldığı analizler yapılmalıdır.

2.4 Zeminlerin Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışının ve kayma mukavemetinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için, deney koşulları ile doğal koşulların olabildiğince benzer olması gerekmektedir. Kayma mukavemeti zeminin arazide yüklenmeden önce yerindeki başlangıç durumunu yansıtan konsolidasyon basıncı, boşluk oranı, su muhtevası, suya doygunluk derecesi gibi faktörlerden, arazi yükleme türü ve hızından ve drenaj koşullarından etkilenmektedir (Özaydın, 2000).

Uygulamada birbirinden farklı koşullar ile karşılaşılması nedeniyle, zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Örselenmemiş numune alınan zor olduğu kumlu zeminlerde ve yumuşak killerde arazi deney sonuçlarından yararlanılmaktadır. Killi zeminlerin drenajsız kayma mukavemetleri ile arazi deneylerinde yapılan ölçümler arasında çeşitli geliştirilmiş korelasyonlar bulunmaktadır. Kayma mukavemetini belirlemek amacıyla yapılan arazi deneylerinin başlıcaları SPT, CPT ve arazi veyn deneyidir.

Zeminlerin kayma mukavemetlerini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemlerinden en yaygın olanları kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve üç eksenli basınç deneyidir. Basit kesme, halka kesme ve laboratuvar veyn deneyi ise diğer yöntemlerdir. Aşağıda sırasıyla kesme kutusu, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneylerine değinilmiştir. Halka kesme deneyi ise sonraki bölümlerde anlatılmıştır.

2.4.1 Kesme Kutusu Deneyi

Bu deney kayma direnci parametrelerinin ölçümünde kullanılmış ilk yöntemdir. Zemin numunesi dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutunun içine yerleştirilmektedir. Numune, belirli bir normal gerilme altında konsolidasyonunu tamamladıktan sonra uygulanan kesme kuvveti ile gereken hızda kesilir. Uygulanan kesme kuvveti altında, kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket etmektedir ve zemin kaymaya zorlanmaktadır. Deney sırasında yatay hareket, düşey deformasyon ve kesme kuvveti ölçülmektedir.

Deneyin en sakıncalı yanı, kesilmeye zorlanan yüzeyin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmayabileceğidir. Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncının ölçülememesi, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması ve kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır. Ayrıca, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebildiği deformasyona ulaşmak için deneyin durdurularak geriye alınması ve çevrimler halinde yapılması da birtakım sorunlar yaratabilmektedir (Önalp, 2007).

Kesme kutusu deneyi daha çok kumların kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Kum zeminler için elde edilen kayma mukavemeti açısı drenajlı yükleme durumlarını temsil etmektedir. Deney numunesinin arazi boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmasına dikkat edilmelidir.

2.4.2 Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi üzerine yalnızca eksenel doğrultuda yük uygulanmaktadır. Bu deneyin ön koşulu zeminin kendisini desteksiz tutacak kadar dayanıma sahip olmasıdır. Bu nedenle kumlarda uygulanamamaktadır. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediğinden, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenajsız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir. Deneyde eksenel yüklemeye önce zemini konsolide etmek ve eksenel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün değildir. Bu olumsuzluklara karşın killerin kıvamını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de killerin kıvamı ve serbest basınç mukavemeteleri arasındaki ilişki görülmektedir.

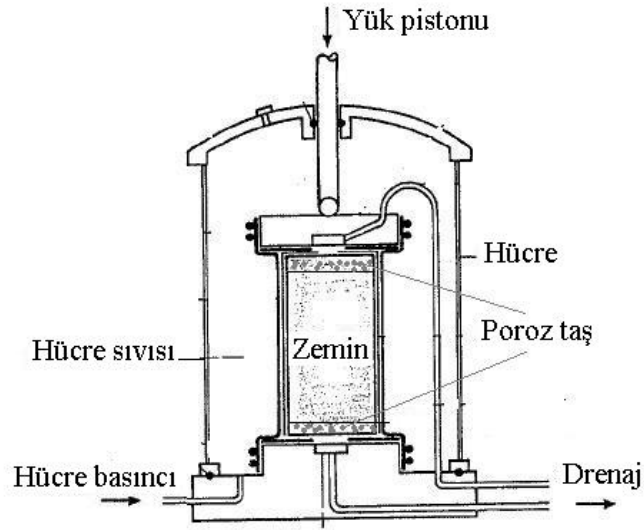
Çizelge 2.1 : Killerin serbest basınç dayanımına göre kıvamı (Özaydın, 2000)

Kıvam	q_u (kPa)
Çok yumuşak	<25
Yumuşak	25-50
Orta Katı	50-100
Katı	100-200
Çok Katı	200-400
Sert	>400

2.4.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan laboratuvar deneyleri arasında en gelişmiş olan yöntem üç eksenli basınç deneyidir. Bu deney ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe en yakın şekilde belirlenebilmektedir. Üç eksenli basınç deneylerinde zemin numunesinin arazi gerilmeleri altında konsolidasyonu sağlanabilmekte ve suya doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir. Deneyi, konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajlı (CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) olacak şekilde üç farklı türde gerçekleştirmek mümkündür. Drenajsız yükleme deneylerinde, zemin numunesinde oluşan boşluk suyu basınçları, drenajlı yükleme deneylerinde ise meydana gelen hacim değişiklikleri ölçülebilmektedir.

Deney düzeni Şekil 3.14'te gösterilen üç eksenli basınç deneyinde, zemin numunesi bir hücre içine yerleştirilmektedir. Numune üst başlığına temas eden bir piston vasıtası ile eksenel gerilme uygulanmakta, numune alt ve üst başlıklarına bağlı ince kanallar ile deney sırasındaki drenaj durumu kontrol edilmektedir (Özaydın, 2000).



Şekil 2.4 : Üç eksenli basınç deneyi (Önalp, 2007)

2.5 Kalıcı Kayma Mukavemeti ve Geoteknik Mühendisliğindeki Önemi

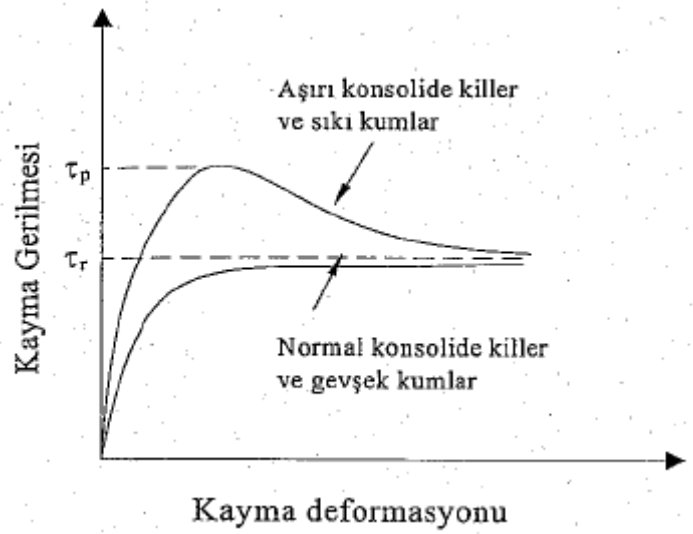
Zeminlerdeki kalıcı kayma mukavemetin önemi, ilk kez 1960'lı yılların başında ortaya konulmuştur. Şev stabilitesi analizlerinde uzun yıllar drenajlı kayma mukavemeti deneyleriyle belirlenen pik kayma mukavemeti parametreleri kullanılmıştır. Ancak, bu yöntemle güvenli olduğu belirlenen fisürlü kil şevlerin bir süre sonra aniden göçtüğü görülmüştür. Skempton (1964), yaptığı geri analizlerle göçme yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesinin, laboratuvar deneyleriyle 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 mukavemeti olarak tanımlanmıştır.

Önceden göçmenin yaşanmış olduğu kayma yüzeyleri içeren şevlerdeki mukavemetin zeminin kalıcı mukavemeti değerinde olduğu ($\tau \approx \tau_r$), ilk defa göçmenin yaşandığı fisürlü kil şevlerde göçme anındaki kayma mukavemetinin pik değerinde olduğu ($\tau \approx \tau_p$) belirlenmiştir. Fisürlü kil şevlerde ise göçmeye yol açan kayma gerilmesinin pik ile kalıcı kayma mukavemeti arasında olduğu ($\tau_r < \tau < \tau_p$) önerilmiştir (Skempton, 1985).

Aşırı konsolidasyon oranı yüksek, bazı nedenlerle belirgin ve sistematik süreksizlikler içeren killer fisürlü kil olarak tanımlanmaktadır. Fisürlü killerin oluşumu kayma hareketleri, faylanma, heyelan, ıslanma/kuruma çevrimleri, jeolojik yükün ani kaybı, büyük kazılar, tektonik kuvvetler, depremler gibi birçok faktöre bağlıdır. Fisürlerin sıklığı aşırı konsolide kilin büyük ölçüde dayanım yitirmesine neden olmaktadır. Buna rağmen, süreksizlik sıklığı düşük olan bir ortamdan alınmış numune tesadüfen süreksizlikleri kesmemişse, laboratuvarında belirlenen kayma mukavemeti arazideki gerçek kayma mukavemeti değerinden büyük olacaktır. Fisürlerin varlığının belirlenememesi yapılacak laboratuvar deneylerinde yanlış sonuçların belirlenmesine neden olacaktır. Son yıllarda yapılan araştırmalarla aşırı konsolide, sert ve fisürlü killerde kayma direncinin yumuşak killerde yapıldığı gibi pik değerlerde alınması durumunda hesaplamalarda önemli hataların yapılabileceği belirlenmiştir (Önalp, 2007).

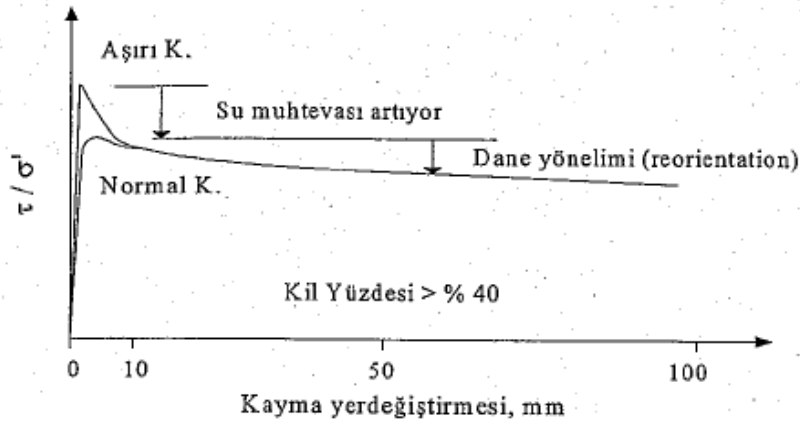
2.6 Kalıcı Kayma Mukavemeti Mekanizması

Zeminlerin gerilme - şekil değiştirme ilişkileri incelendiğinde, kayma gerilmesinin aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda önce belirli bir pik değere kadar arttığı daha sonra azalarak deformasyonla değişmeyen sabit bir değer aldığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin bu sabit değeri zeminin kalıcı (rezidüel) mukavemeti olarak tanımlanmıştır. Normal konsolide killerde veya gevşek kumlarda ise belirli bir pik gerilme görülmemekle birlikte, kayma gerilmesinin yönlendiği değer kalıcı kayma mukavemetini oluşturmaktadır. Şekil 2.5'te zeminlerin kayma gerilmesi - deformasyon ilişkisi görülmektedir.



Şekil 2.5 : Kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi

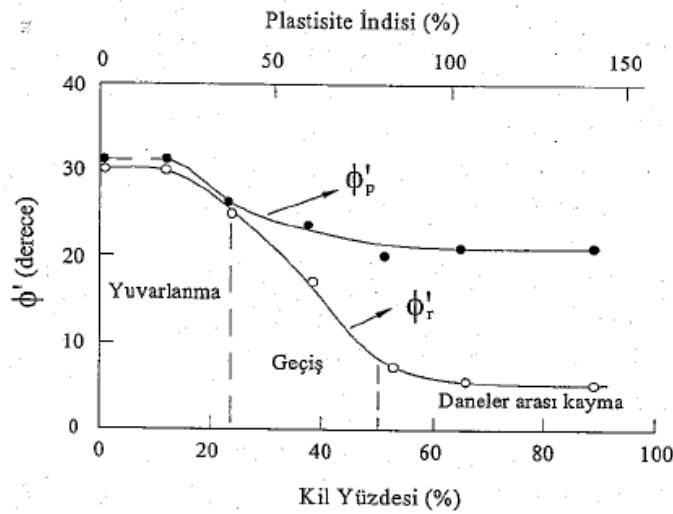
Skempton (1985) yaptığı çalışmalarda kil yüzdesinin %40'tan fazla olduğu aşırı konsolide zeminlerdeki drenajlı kayma mukavemetindeki düşüşün iki kademedен, normal konsolide zeminlerde ise tek kademedен oluştuğunu belirtmiştir. Bu durum Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Buna göre birinci kademedeki düşüşün nedeni zeminin su muhtevastaki artıştır. İkinci kademedeki düşüş ise büyük deformasyonlar sonucu yassı – yapraksı şekilde bulunan kil danelerinin konumlarının değişmesiyle kayma yönüne paralel olarak yeni bir düzleme girmeleri sonucunda oluşmaktadır.



Şekil 2.6 : Aşırı konsolide ve normal konsolide zeminlerin kayma mukavemetindeki düşüş (Skempton, 1985)

Dane yönelmesi (reorientation), yassı-yapraksı şekilli kil minerallerinde ve %20-24 üzerinde kil içeren zeminlerde oluşmaktadır. Kil yüzdesi yaklaşık %50 ise kalıcı kayma mukavemeti, kil danelerinin kayma sürtünmesi tarafından kontrol edilmektedir. Kil yüzdesinin %20'den düşük olduğu zeminlerde ise mukavemet daha çok silt ve kum daneleri tarafından kontrol edilmektedir.

Zeminlerde baskın dane şekli ve yassı dane miktarı kalıcı kayma davranışını etkilemektedir. Lupini (1981) iyi derecelenmiş kuvars kum ve yassı şekilli sodyum bentonit karışımı ile yaptığı halka kesme deneylerinin sonucunda üç tip kayma mukavemeti mekanizması bulunduğunu göstermiştir. Buna göre, hacimli danelerin baskın olarak bulunduğu zeminlerde yuvarlanma kesmesi, yassı dane miktarının fazla olduğu zeminlerde ise kayma kesmesi oluşmaktadır.



Şekil 2.7 : Kayma mukavemeti mekanizması (Lupini, 1981)

Volkanik kökenli yüksek plastisiteli killere ise büyük oranda allophan gibi yassı olmayan kil mineralleri içerdiğinden yüksek kalıcı kayma mukavemeti açısına sahiptirler (Mitchell, 1991).

2.7 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Kayma Yerdeğiştirmesi ile Değişimi

Kesme kutusu veya halka kesme deneyi ile kesilen aşırı konsolide kil numunelerinin pik kayma gerilmesine 1 mm'lik yerdeğiştirmeler sonucu ulaşılmaktadır. Normal konsolide killerin pik kayma gerilmesi ise daha büyük deformasyonlarla belirlenmektedir (Skempton, 1985).

600 kPa değerine kadar olan efektif normal gerilmelerle yapılan halka kesme deneyleri sonucunda zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin genellikle 100 mm'den büyük deformasyonlar sonucunda belirlendiği görölmüştür. Bu değer, bazı numunelerde 500 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Çizelge 2.2'de kil yüzdesi %30'dan büyük olan ve 600 kPa değerinden daha düşük efektif normal gerilmelerde kesilen zeminlerin, çeşitli kayma mukavemeti açılarının belirlenmesi için gereken şekil değiştirme değerleri verilmiştir (Skempton, 1985).

Çizelge 2.2 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetlerin belirlendiği deplasman değerleri (Skempton, 1985)

Kayma Mukavemeti Açısı	Deplasman (mm)	
	Aşırı Konsolide	Normal Konsolide
ϕ_p' (pik)	0.5-3	3-6
$\phi_r' + 1$	30-200	
ϕ_r'	100-500	

Sinclair ve Broker (1967) yaptıkları çalışmalarda, yüksek efektif normal gerilmeler altında kesilen kil numunelerinin kalıcı kayma mukavemetine daha küçük şekil değiştirmeler sonucunda ulaşıldığını belirtmektedir. Uygulanan efektif normal gerilmenin 100 kPa olduğu bir deneyde kalıcı mukavemete 60 mm'den büyük yerdeğiştirmelerle ulaşılmasına rağmen bu değer 2000 kPa'lık bir gerilmenin uygulandığı deneyde 25 mm'ye düşmektedir.

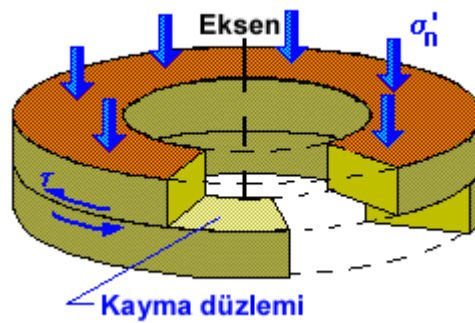
2.8 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti halka kesme, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleriyle belirlenebilmektedir. Ancak, üç eksenli basınç deneylerinde numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı bulunmaktadır. Bu nedenle kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde halka kesme ve kesme kutusu deneyleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Craig, 1987).

Kesme kutusu deneyinde, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin 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, 1983).

Şekil 2.8’de gösterilen halka kesme deneyi ise numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya izin verecek şekilde geliştirildiğinden ve kohezyonlu zeminlerde görülen rotasyonel kaymayı modellemesinden dolayı kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesindeki en güvenilir yöntemdir (Bishop, 1971). Bu deneyde, halka şeklindeki numune aletin alt kısmının sabit olan üst kısmına göre döndürülmesiyle kesilmektedir. Kayma yüzeyinin sabit enkesit alanına sahip olması ve kil danelerinin tümünün kesilen yüzeye paralel olarak yönelmesi deneyin diğer avantajlarını oluşturmaktadır (Stark, 1994).

Yapılan çalışmalarda, halka kesme deneyi ile belirlenen kayma mukavemetinin gerçeğinden daha küçük mukavemet değerleri verdiği ve tekrarlı kesme kutusu deneyleriyle belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açılarının geri analiz ile belirlenen açılardan ortalama 0.5° daha büyük olduğu belirlenmiştir (Skempton, 1985). Yine de, bir alt limit vermesi açısından halka kesme deneyi önem taşımaktadır.



Şekil 2.8 : Halka kesme deney aleti

2.9 Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkiyen Faktörler

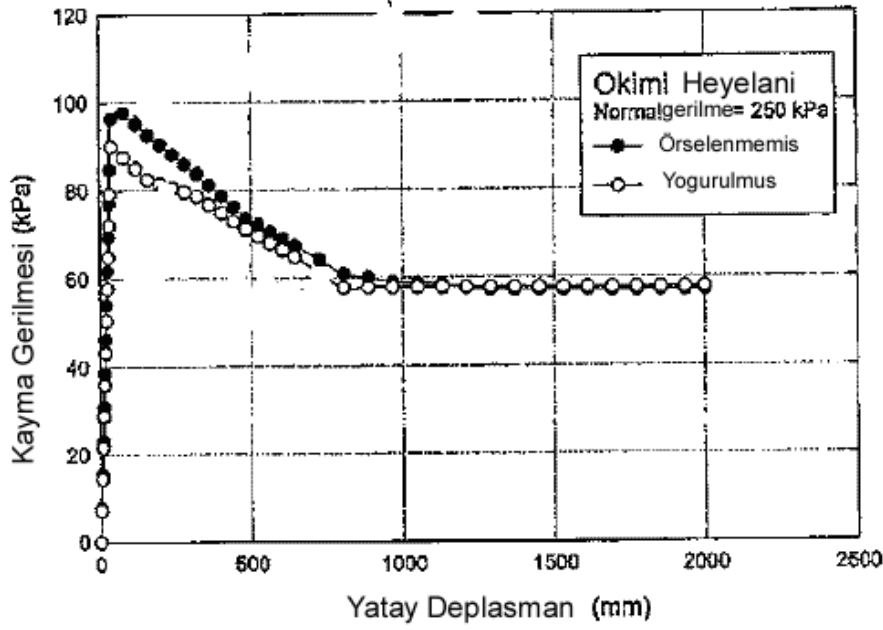
Kalıcı kayma mukavemeti başlıca minerolojik yapıdan, efektif normal gerilme seviyesinden ve kesme hızından etkilenmektedir. Bunların yanısıra pik kayma gerilmesini etkileyen zemin yapısının kalıcı kayma mukavemetine etkisi çeşitli araştırmalarla incelenmiştir.

La Gatta (1970), örselenmemiş ve yoğurulmuş numuneler üzerinde yaptığı deneylerde, numune hazırlama yönteminin kalıcı kayma mukavemetini etkilemediğini belirlemiştir.

Tiwari ve diğ. (2005) benzer iklim koşullarında ve jeohidrolojik durumlarda oluşan 6 farklı toprak kaymasını incelemiştir. Farklı derinliklerden alınan numuneler üzerinde yapılan halka kesme deneyleri sonucunda, örselenmemiş ve yoğurulmuş durumlardaki kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin oldukça yakın olduğu Çizelge 2.3'te görülmektedir. Şekil 2.9'da örselenmemiş numunenin pik kayma gerilmesinin yoğurulmuş numuneye göre daha büyük olduğu ve yoğurulmuş numunenin kalıcı duruma daha küçük deformasyonda ulaştığı görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Halka kesme deneyinde incelenilen numunelerin kayma mukavemeti parametreleri, (Tiwari ve diğ., 2005)

Heyelan Bölgesi	Okimi		Yosio		Mukohidehara	
Kalıcı Kayma Mukavemeti Parametreleri	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Örselenmemiş	3.1	11.7	4.6	12.5	0	20.6
Yoğurulmuş (derin)	5.3	11.6	4	12.2	0	18.7
Yoğurulmuş (yüzeysel)	5.7	11.6	-	-	0	18.7
Heyelan Bölgesi	Engjoi		Iwagama		Tsuboyama	
Kalıcı Kayma Mukavemeti Parametreleri	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Örselenmemiş	8.0/4.9	7.4/10.1	7.2	12.2	4.2	10.2
Yoğurulmuş (derin)	7.9	8	7.9	11.9	2.8	9.8
Yoğurulmuş (yüzeysel)	8.9	7.9	9.2	11.7	1	9.8



Şekil 2.9 : Örselenmemiş ve yoğurulmuş numunelerin kayma mukavemetlerinin deformasyonla değişimi (Tiwari ve diğ, 2005)

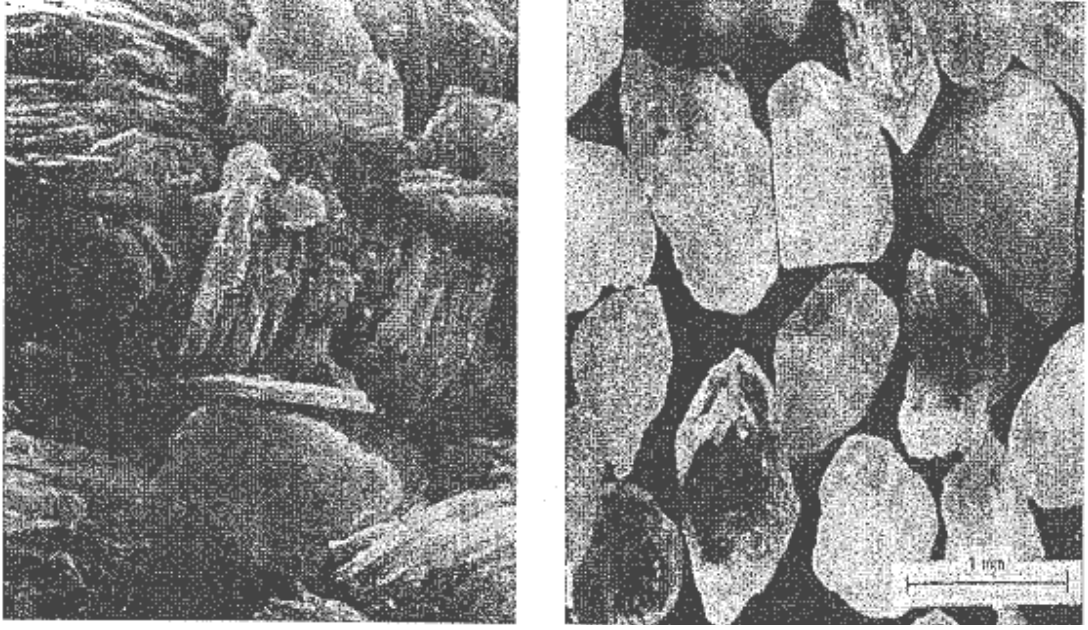
2.9.1 Mineralojinin Etkisi

Doğal zeminleri oluşturan daneler kayaların mekanik ve kimyasal ayrışma sonucu küçük parçalara bölünmesi ile oluşmaktadır. Daneleri oluşturan kayaların birbirinden çok farklı mineralojik yapılara 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).

Şekil 2.10'da dane çapı ile dane şekli arasındaki ilişki, Şekil 2.11'de yassı kaolinit ve hacimli kuvars minerallerinin elektron mikroskobu altındaki görünüşleri verilmiştir.

Elek No: 4		Elek No: 200	
Çakıl	Kum	Silt	Kil
	5 mm	0.074 mm	0.002 mm
Çoğunlukla hacimli, toparlak daneler			Çoğunlukla yassı, yapraksı daneler

Şekil 2.10 : Dane çapı-dane şekli ilişkisi (Mitchell, 1993)



Şekil 2.11 : Kaolinit ve kuvars minerallerinin elektron mikroskupu altındaki görünümü (Mitchell, 1993)

Bütün kil mineralleri $2\ \mu$ 'dan daha küçük boyutta olmadıkları gibi, kil olmayan minerallerin hepsi de $2\ \mu$ 'dan daha büyük değildir. Yani $2\ \mu$ 'dan daha küçük boyutta olup plastiklik özelliği göstermeyen daneler de bulunmaktadır. Bu nedenle kil içeriği (clay content) ile kil yüzdesi (clay-size fraction) birbirinden farklı kavramlardır. Kil içeriği, dane boyutu gözetmeksizin zemindeki mevcut kil minerallerini belirtmektedir. Kil minerallerinin zemindeki miktarı ise kil yüzdesiyle ($2\ \mu$ 'dan küçük çaplı dane yüzdesiyle) verilmektedir (Mitchell, 1993).

Zeminler, özellikle killerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri mineral içeriğinden etkilenmektedir. Geoteknikte bir kilin içerdiği minerallerin türü ve oranlarının belirlenmesi, mekanik davranışın anlaşılması için önem taşımaktadır. Danelerin yüzey alanının, hacim veya ağırlığa oranı özgül yüzey olarak tanımlanmıştır. Kil danelerinin boyutları ve özgül yüzeyleri mineral yapısına bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir. Çizelge 2.4'te başlıca kil minerallerinin dane özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Başlıca kil minerallerinin dane özellikleri (Özaydın, 2000)

Kil Minerali	Dane Kalınlığı (μmm)	Dane Çapı (μmm)	Özgül Yüzey (km ² /kg)
Kaolin	50-2000	300-4000	0.0015
Klorit	30	10000	0.08
İllit	30	10000	0.08
Montmorillonit	3	100-1000	0.8

Dane boyutunun azalması dane yassılığını arttırmaktadır. Yassı şekilli dane miktarının artması, zeminlerde kalıcı mukavemeti düşürmektedir. Montmorillonit, illit ve kaolinit gibi yassı kil minerallerinin efektif kalıcı kayma mukavemeti açıları sırasıyla 5°, 10° ve 15° civarındadır. İğnemsî ve boru şekilli danelerden oluşan kil mineralleri ise çok daha yüksek ϕ_r değerlerine sahiptirler. Kil mineralleri dışındaki minerallerin, kalıcı mukavemetleri ile pik mukavemetleri arasında çok fark bulunmamaktadır (Mitchell, 1993).

İnce daneli zeminlerin mühendislik davranışlarında, zeminlerin içerdiği su muhtevasına bağlı olarak çeşitli değişiklikler gözlemlenmektedir. Killi bir zeminin kıvamı, yalnızca içindeki su muhtevası artırılarak, çok katı bir kıvamdan viskoz bir sıvı kıvamına kadar geniş bir aralık içinde değiştirilebilmektedir. Buna bağlı olarak, mukavemet, yük altında şekil değiştirme ve sıkışma gibi mühendislik özelliklerinde büyük farklılıklar oluşmaktadır. İnce daneli zeminlerin mühendislik özelliklerinde su muhtevasına bağlı olarak meydana gelen değişiklikler, esas olarak daneleri oluşturan minerallerin kristal yapısına, zeminin arazideki çökme koşullarına ve boşluklardaki zemin suyunun kimyasal özelliklerine bağlı olmaktadır.

Killi zeminlerin danelerini oluşturan minerallerin ince plakalardan oluşan bir kristal yapısına sahip oldukları bilinmektedir. Kil danelerinin yüzeyinde ve su molekülleri ile kimyasal maddelerde birbirinden farklı elektriksel yüklerin mevcut olması sonucu aralarında elektriksel çekim ve itki kuvvetleri oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin şiddeti büyük oranda danelerin mineral yapısına bağlı olmaktadır. Elektriksel çekim kuvvetleri sonucu su molekülleri kil danelerinin yüzeyine yapışmakta ve daneler yüzeylerinin adsorbe su olarak nitelendirilen bir su tabakası ile kaplanmasına yol açmaktadır. Zeminin düşük su muhtevasına sahip olduğu durumlarda daneler arasında adsorbe su tabakaları ile temas meydana gelmekte ve bu su tabakasının sahip olduğu yüksek viskoziteden dolayı danelerin birbirine göre hareketi

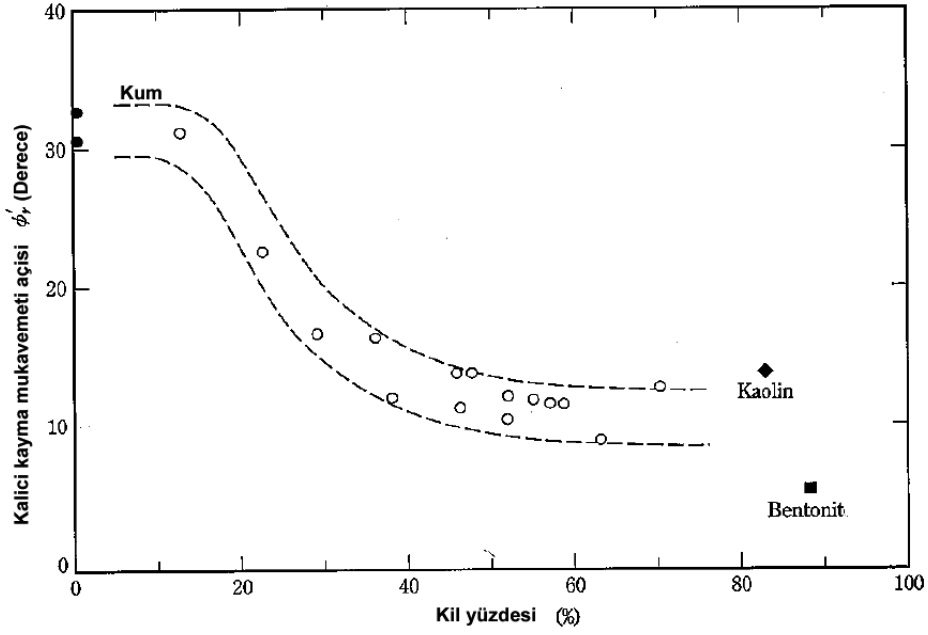
zorlaşmaktadır. Zeminin su muhtevası artması durumunda ise daneler birbirinden uzaklaşmakta ve adsorbe su tabakaları arasında temas kaybolmaktadır.

Killerin kıvamında su muhtevasına bağlı olarak meydana gelen değişimleri deneysel olarak saptayabilmek için bazı sınır su muhtevası değerleri tanımlanmıştır. Zeminlerde başlıca likit limit, plastik limit ve büzülme limiti olmak üzere üç farklı kıvam limiti kullanılmaktadır. Likit limit, zeminin viskoz bir sıvıdan plastik bir kıvama dönüştüğü su muhtevasıdır. Zeminin, likit limit değerinden daha fazla bir su muhtevası, zeminin sıvı gibi akmasına neden olmaktadır. Dane boyutunun azalması yani özgül yüzeyin artması durumunda likit limitin de artması beklenmektedir. Bu yüzden likit limit ile kil minerolojisi arasında bir ilişki olması gerekir. Aynı hacmi dolduran ince daneli zeminlerin özgül yüzeyi, iri danelilerden fazladır. Özgül yüzeyden hareketle, ince daneli zeminlerin doğal su muhtevasının, diğer tüm özelliklerin aynı kalması durumunda iri danelilerden fazla olacağı açıktır. Çizelge 2.5'te bazı kil minerallerinin likit limit, plastik limit ve aktivite A_c (plastisite indisi / kil yüzdesi) yer almaktadır.

Çizelge 2.5 : Kil minerallerinin kıvam limit ve aktivite değerleri (Das, 2002)

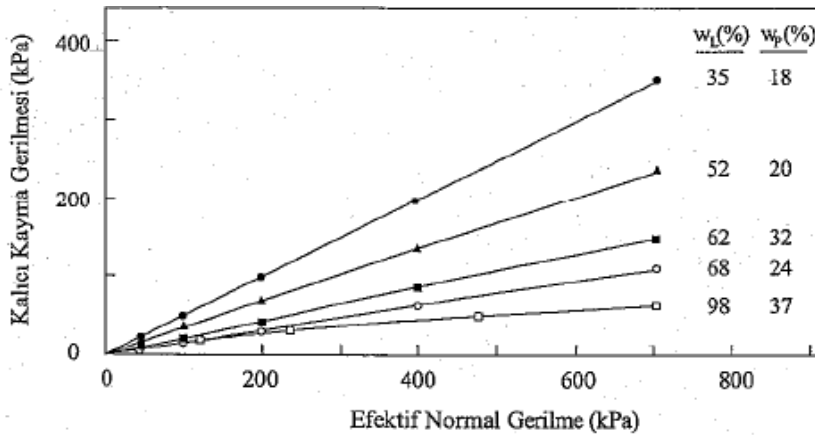
Mineral	w_L (%)	w_P (%)	A_c
Kaolinit	35-100	20-40	0.3-0.5
İllit	60-120	35-60	0.5-1.2
Montmorillonit	100-900	50-100	1.5-7.0
Halloysit (hidratlı)	50-70	40-60	0.1-0.2
Halloysit (hidratsız)	40-55	30-45	0.4-0.6
Attapulgit	150-250	100-125	0.4-1.3
Allophan	200-250	120-150	0.4-1.3

Skempton (1985), yaptığı çalışmada kil yüzdesinin %50'den fazla olan zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin kil minerallerin kaymasıyla kontrol edildiğini ve ϕ_r değerinin 10 - 15° arasında değiştiğini belirlemiştir. Şekil 2.12'de farklı kil yüzdesine sahip zeminlerdeki kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi görülmektedir.



Şekil 2.12 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi (Skempton, 1985)

Stark ve Eid (1994), 32 farklı kil numunesi üzerinde gerçekleştirdikleri halka kesme deneylerinin sonucunda likit limitteki ve aktivitedeki artışın kalıcı kayma mukavemetinde azalışa neden olduğunu belirlemiştir. Ayrıca, likit limiti %60 - %220 arasında değişen ve kil yüzdesi %50'den fazla olan numunelerin kalıcı göçme zarfında eğrilik bulunduğu görülmüştür. Likit limit ve aktivitenin kil mineralojisi, dane boyutu ve şekli için birer gösterge olacağı anlaşılmıştır.



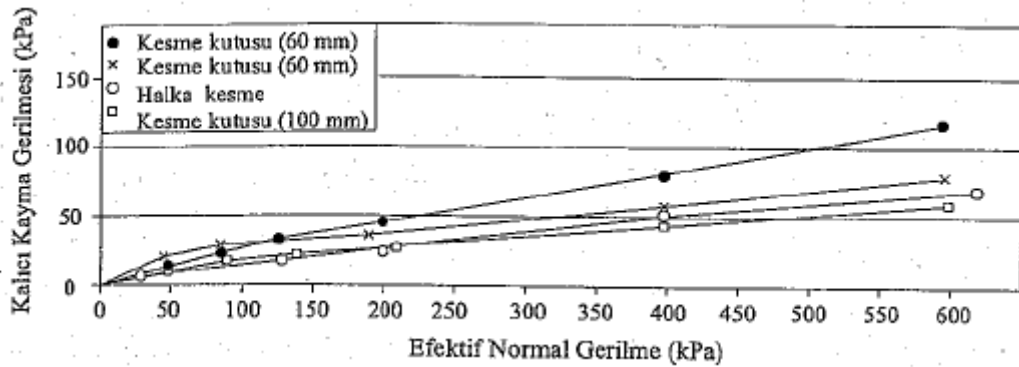
Şekil 2.13 : Kil mineralojisinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi (Stark, 1994)

2.9.2 Efektif Normal Gerilmenin Etkisi

Zeminlerde çevre basıncının artması, genellikle kalıcı mukavemet açısını düşürmektedir. Kilce zengin bir zeminde düşük efektif gerilmeli kayma (yüzeysel

kayma) için bulunan ϕ_r ' değeri, derin kaymadan belirlenen değerden yaklaşık 9° fazladır. Bu durumda zeminin göçme zarfında eğrisellik gözlemlenmektedir. Yüksek normal gerilmelerde, kenar-yüzey etkileşimlerinden yüzey-yüzey etkileşimlerine dönüşüm daha fazla olmaktadır. Temas alanının artması kalıcı kayma mukavemetinin azalmasına neden olur. Aradaki farka bağlı olarak, göçme zarfı doğrusallığını yitirmektedir. Göçme zarflarındaki eğrilik 200 kPa'dan daha düşük efektif normal gerilmelerde oluşmaktadır (Hawkins ve Privett, 1985). Şekil 2.14'te farklı deneysel yöntemlerle kesilen numunenin göçme zarfındaki eğrilik görülmektedir.

Killerin ϕ_r ' değerinin gerilmeye bağlı değişimi elastik birleşme teorisine ile ilişkilidir. Buna göre, kayma yüzeyleri arasındaki gerçek temas alanı, normal efektif gerilmedeki artıştan oransal olarak daha az artmaktadır. Efektif normal gerilme seviyesindeki değişimler, kil mineralleri dışındaki minerallerin (kuvars, feldispat, biotit gibi) kalıcı kayma mukavemetini çok fazla etkilememektedir (Mitchell, 1993).



Şekil 2.14 : Efektif normal gerilmenin kalıcı kayma mukavemete etkisi (Hawkins ve Privett, 1985)

2.9.3 Kesme Hızının Etkisi

Önceden varolan kayma yüzeylerindeki hızlar, yeniden aktif hale geçmiş heyelanlardaki çok yavaş hareketlerden, depremlerle uyarılan çok hızlı hareketlere kadar değişiklik gösterebilmektedir. Kalıcı kayma mukavemetinin doğru olarak belirlenmesinde kayma hızının bilinmesi önemlidir.

Skempton (1985) tarafından iki farklı kil numunesi üzerinde 0.0001 ile 1.0 mm/dak arasında değişen kesme hızlarında deneyler yapılmıştır. Buna göre, yavaş hızlarla (0.002-0.01 mm/dak) gerçekleştirilen deneylerdeki mukavemet değişimlerinin

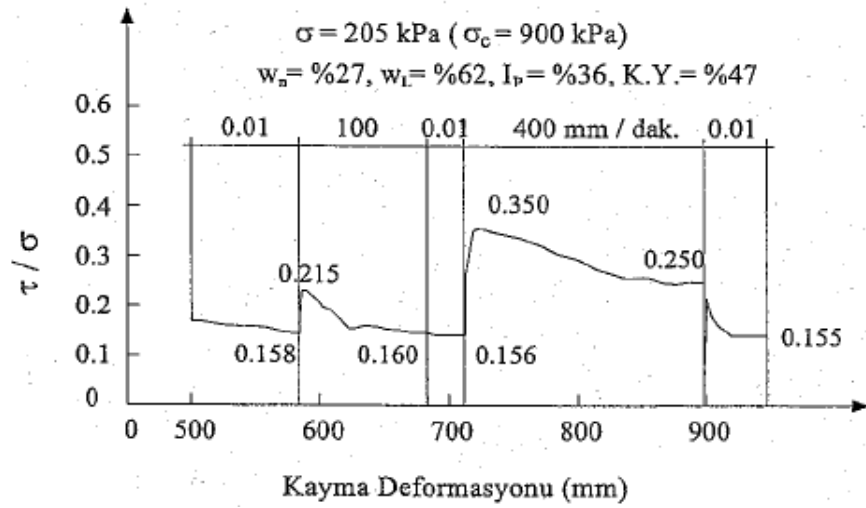
önemsiz olduğu belirlenmiştir. Yeniden aktif hale geçen toprak kaymalarındaki en yüksek ortalama hızın 50 cm/gün ve en düşük ortalama hızın 5 cm/yıl civarında olduğu bilinmektedir. Kesme deneylerinde standart laboratuvar hızı olarak 0.005 mm/dk alınması durumunda -%3 ile %5 arasında değişen mukavemet sapmaları oluşmaktadır.

Çizelge 2.6 : Geri analiz ve laboratuvar kalıcı mukavemetlerinin karşılaştırılması, (Skempton, 1985)

Hız Değişimi	Hız Değeri	Kalıcı Mukavemet Oranı (arazi/laboratuvar)
En düşük ortalama hız	5 cm/yıl = 0.0001 mm/dak	0.97
Standart laboratuvar hızı	0.005 mm/dak	1.00
En yüksek ortalama hız	50 cm/gün = 0.35 mm/dak	1.05

Tiwari ve Marui (2005) yaptıkları halka kesme deneyleri ile ilgilenilen numunenin 0.01-1 mm/dak kesme hızlarında kesilmesi durumunda kalıcı kayma mukavemet açısının 0.2° değiştiğini belirlenmiştir. Bu değer Skempton (1985) tarafından önerilen %5'lik mukavemet sapmasına karşılık gelmektedir.

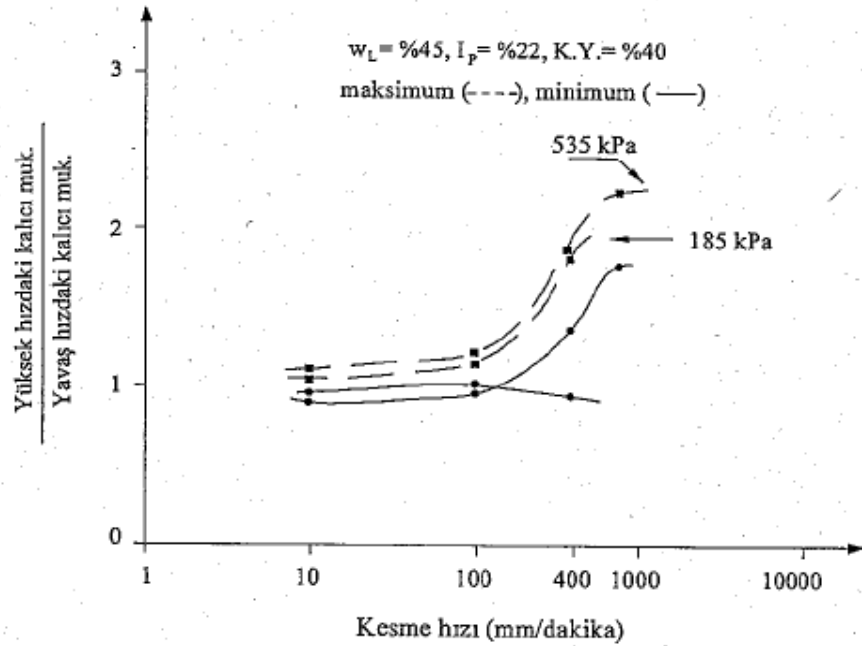
Yüksek kesme hızlarının kayma mukavemetine etkisinin incelenmesi amacıyla numuneler 900 kPa normal gerilme altında konsolide edildikten sonra, 200 ile 500 kPa arasında değişen normal gerilme değerleri altında halka kesme aleti ile kesilmişlerdir. Yavaş hızdaki kalıcı mukavemetin 0.01 mm/dak ile belirlenmesinden sonra kesme hızı 100 mm/dak'ya çıkartılmıştır. Boşluk suyu basıncının sönmelenmesinden sonra numune yeniden 0.01 mm/dak hız ile kesilmiştir. Kalıcı duruma ulaşıldıktan sonra kesme işlemine 400 mm/dak hızda devam edilmiştir. Şekil 2.15'te %47 kil yüzdesine sahip bir zemin üzerinde yapılan halka kesme deneyi gösterilmiştir.



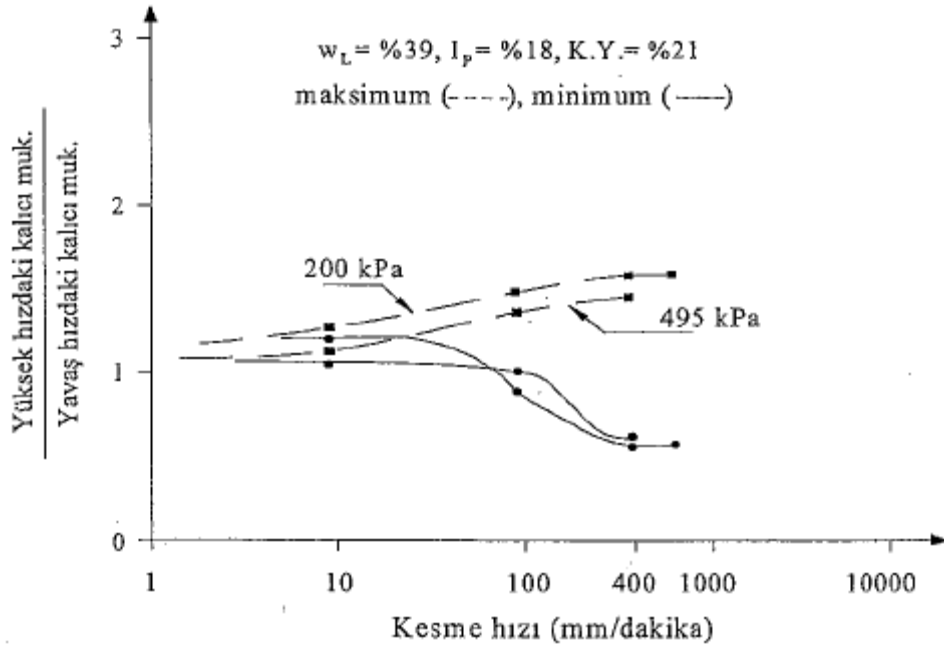
Şekil 2.15 : Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavamete etkisi (Skempton, 1985)

Kil yüzdesi yüksek olan zeminlerde, yüksek hızlarda gerçekleştirilen halka kesme deneylerinde belirlenen kalıcı kayma mukavemetinin yavaş hızda gerçekleştirilen deneylere göre büyük olduğu belirlenmiştir. Buna rağmen düşük kil yüzdeli zeminlerde yapılan deneylerde 800 mm/dak hızlarda bile kalıcı kayma mukavemetinin çok fazla değişmediği görülmüştür (Skempton, 1985).

Şekil 2.16 ve 2.17’de farklı kil yüzdesine sahip kil numunelerin yüksek hızlarda belirlenen kalıcı mukavemetlerin, yavaş hızlardaki mukavemete oranları ile kesme hızı arasındaki değişim yer almaktadır.



Şekil 2.16 : Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985)



Şekil 2.17 : Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985)

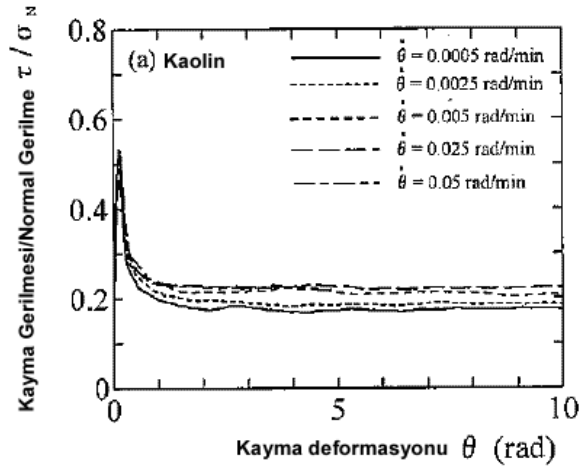
Lemos (1985) farklı endeks özelliklerine sahip zeminlerde yaptığı halka kesme deneyleri ile yüksek kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisini incelemiştir. Yavaş hızda kesilen numunelerin pik kayma gerilmelerine ulaşıldıktan sonra deney aleti hızlandırılmıştır. Büyük deformasyonlara ulaşıldıktan sonra, numune tekrardan ilk hızla kesilmeye başlanmıştır ve kalıcı mukavemet belirlenmiştir. Deneyler farklı normal gerilmelerde ve kesme hızlarında tekrar edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kesme hızındaki artışların zeminlerde kil yüzdesine bağlı olarak üç farklı etkiye yol açtığı görülmüştür. Buna göre kil yüzdesi %50'den fazla olan zeminlerde kesme hızındaki artışlar, kalıcı mukavemette artışlara (pozitif hız etkisi) veya azalışlara (negatif hız etkisi) neden olabilmektedir. %5 ile %40 arasında kil yüzdesine sahip zeminlerde, kesme hızının artması durumunda negatif hız etkisi görülmektedir. Silt veya kum içeren zeminlerde hızlı deneyler gerçekleştirilmesi durumunda kalıcı mukavemet değişmemektedir (nötr hız etkisi) veya azalmaktadır.

Suzuki ve diğ. (2001) kaolin ve çamurtaşı numuneleri üzerinde, 0.02-2 mm/dak arasında değişen kesme hızlarında gerçekleştirdikleri halka kesme deneyleri ile, hızın kalıcı kayma mukavemete etkisini incelemiştir. Hazırlanan numuneler, 167 kPa normal gerilme altında bir gün süre ile konsolide edildikten sonra, halka kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin fiziksel özellikleri ve deney sonuçları Çizelge 2.7'de yer almaktadır. Şekil 2.18 ve 2.19'da kaolin numunesinin halka

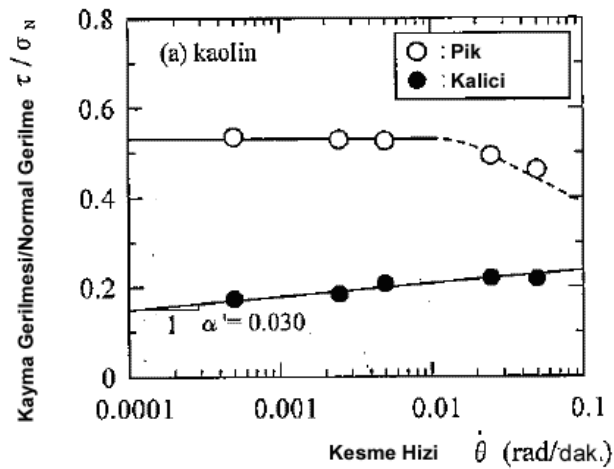
kesme deneyinden elde edilen τ/σ oranı ile açısıl kayma deformasyonu ve açısıl kesme hızı arasındaki ilişkiler gösterilmektedir.

Çizelge 2.7 : Halka kesme deney sonuçları (Suzuki ve diğ., 2001)

Numune	K.Y. (%)	I _p (%)	w _L (%)	ω (rad/dak)	V (mm/dak)	τ_p (kPa)	τ_r (kPa)
Kaolin	35.3	21.8	62.0	0.0005	0.02	98.5	33.6
				0.0025	0.10	97.8	35.8
				0.005	0.20	100.2	40.2
				0.025	1.00	99.0	43.0
				0.05	2.00	87.8	42.5
Çamurtaşı	24.0	25.5	63.0	0.0013	0.05	91.6	31.2
				0.0025	0.10	99.5	38.1
				0.005	0.20	109.5	47.6
				0.025	1.00	52.9	34.3

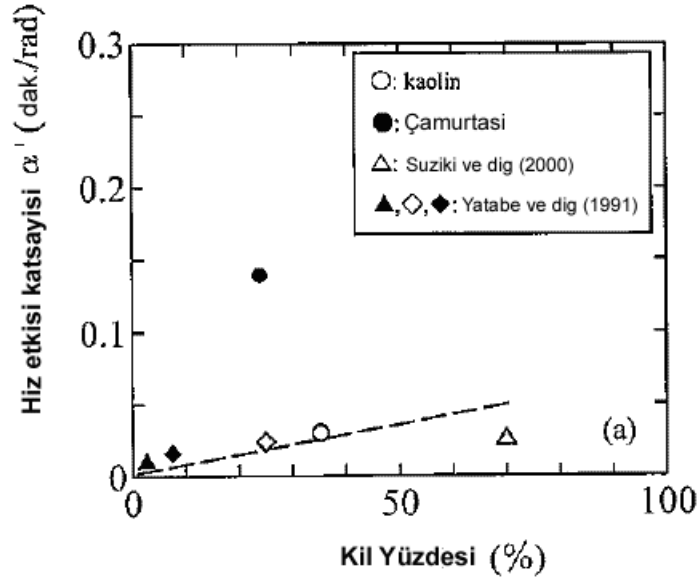


Şekil 2.18 : τ/σ_N ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)

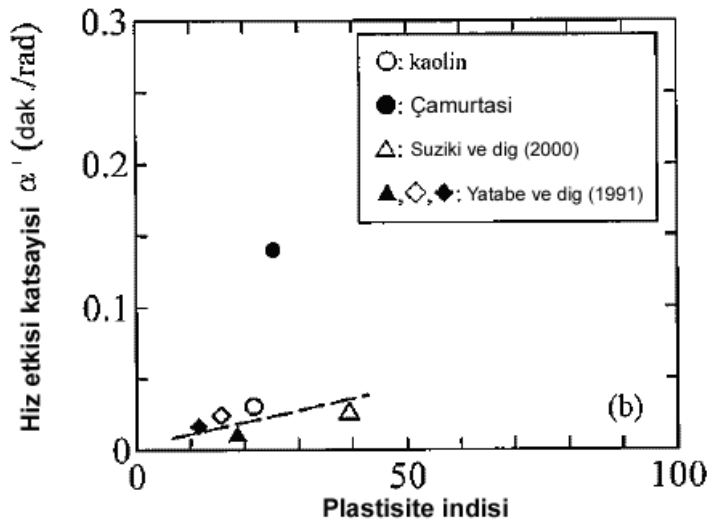


Şekil 2.19 : τ/σ_N ile kesme hızı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)

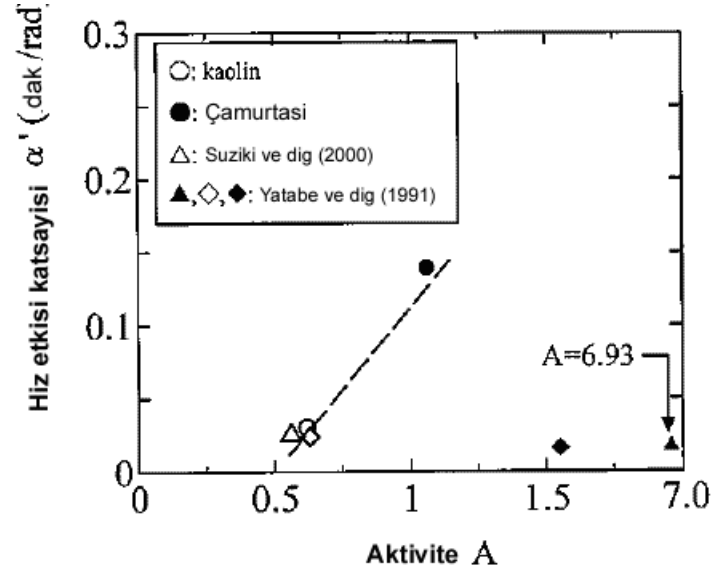
Deneysel çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesi için, τ/σ oranı ile açısıl kesme hızı arasındaki ilişkiden yararlanılarak hız etkisi katsayısı, α' önerilmiştir. Hız etkisi katsayısının, kil yüzdesi ve plastisite indisi ile doğrusal bir ilişkisinin bulunduğu buna rağmen aktivite ile arasında herhangi bir bağıntı olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 2.20 : α' ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)

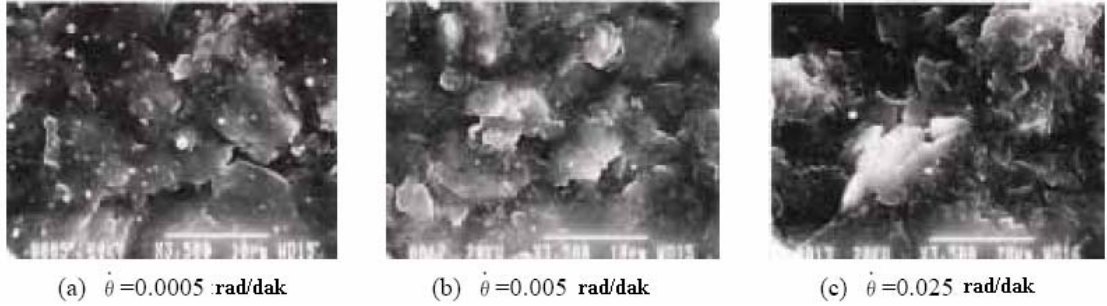


Şekil 2.21 : α' ile plastisite indisi arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)



Şekil 2.22 : α' ile aktivite arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)

Kaolin numunesinin, 0.0005, 0.005 ve 0.025 rad/dak hızlarında kesilen yüzeyleri elektron mikroskupu altında 3500 kat büyütülen görünüşleri şekil 2.23'te yer almaktadır. Kesme hızının artması yüzeylerdeki pürüzlülüğü farkedilir hale getirmektedir.



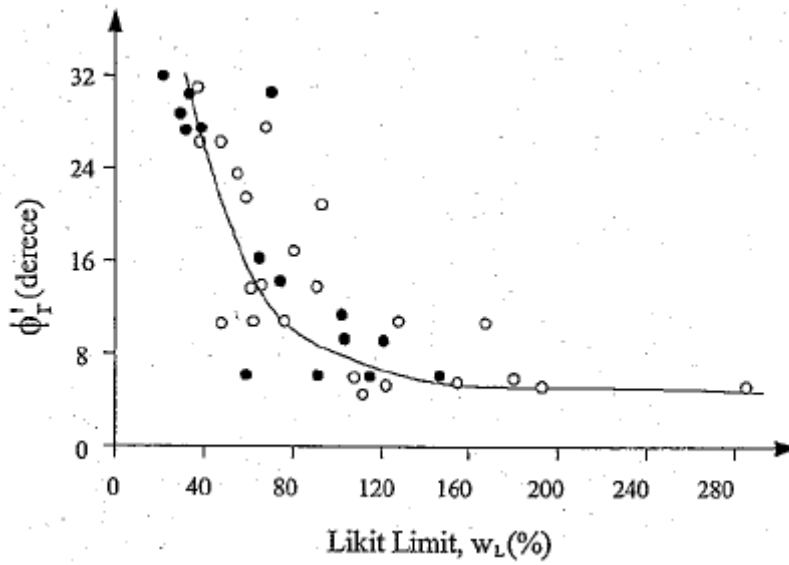
Şekil 2.23 : kaolin numunesinin yüzeyinin elektron mikroskupu altındaki görünümü (Suzuki ve diğ., 2001)

2.10 Kalıcı Kayma Mukavemet Açısı ile Endeks Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Zeminlerin drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kıvam limitleri ve/veya kil yüzdesi arasında birçok araştırmaya yapılmıştır ve çeşitli amprik bağıntılar önerilmiştir. Skempton (1964), Lupini (1981), Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), Stark (1994), Wesley (2003), Suzuki ve diğ. (2005), İyisan ve diğ. (2006) bu amaçlı araştırma yapanların ileri gelenlerindendir. Bu bölümde yapılan çalışmalar özet olarak verilmiştir.

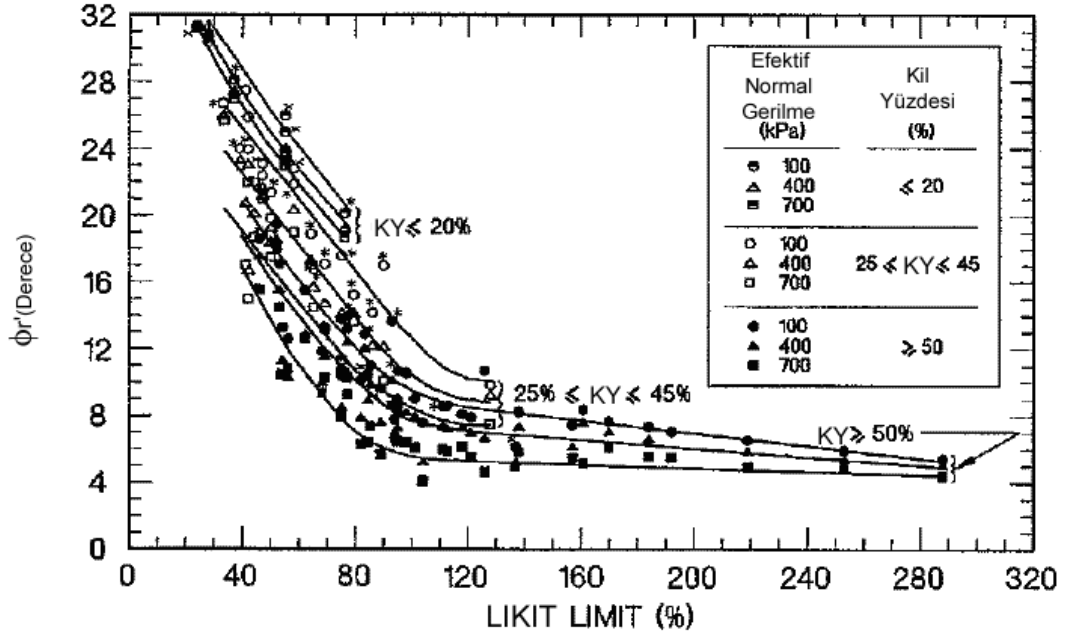
Skempton (1964), çoğunluğu kilce zengin ve plastisite indisi %20'den büyük olan numunelerle dört farklı gerilme altında gerçekleştirdiği deneylerle, kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ve plastisite indisi ile değişimini incelemiştir. Gerçekleştirilen deneylerle %45'ten büyük plastisite indisine ve %60'tan fazla kil yüzdesine sahip zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti açısının düşük değerler aldığı belirlenmiştir.

Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), aşırı konsolide kil şeyler üzerinde, 0.0005 mm/dak'lık kesme hızında tekrarlı kesme kutusu deneyleri yaparak, kalıcı mukavemet açısı ile likit limit arasında Şekil 2.24'te gösterilen ilişkiyi elde etmiştir.



Şekil 2.24 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986)

Stark (1994), 0.018 mm/dak'lık kesme hızında halka kesme deneyleri yaparak, kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit, kil yüzdesi ve efektif normal gerilme arasında yeni bir ilişki geliştirmiştir. Belirli bir efektif normal gerilme değeri için kohezyonlu zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açıları, likit limit-kil yüzdesi ve şekil 2.25'teki eğrilerin enterpolasyonu ile belirlenebilmektedir.

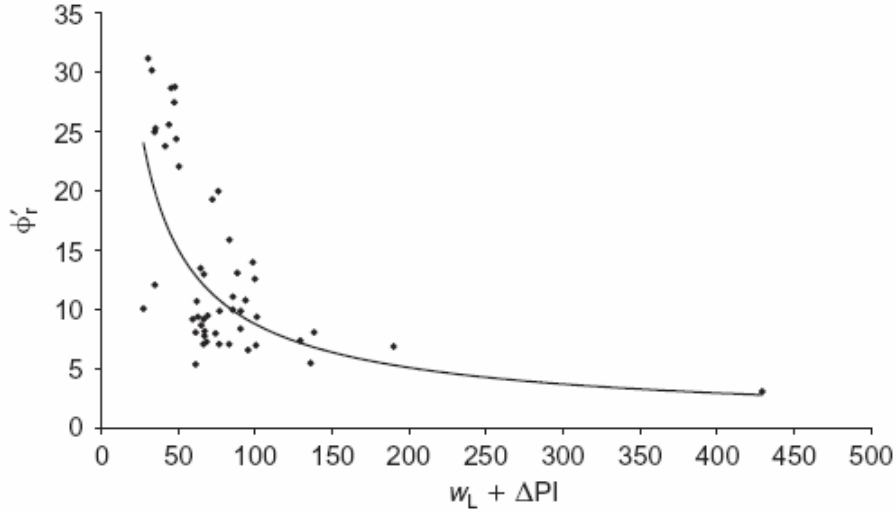


Şekil 2.25 : ϕ_r' ile likit limit, kil yüzdesi ve efektif normal gerilme arasındaki ilişki (Stark, 1994)

Şekilden yararlanarak 100, 400 ve 700 kPa efektif normal gerilmelerdeki kalıcı kayma mukavemeti belirlenerek, kayma gerilmesi-normal gerilme grafiği çizilebilir ve doğrusal olmayan kalıcı göçme zarfı tahmin edilebilir. Stark, drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısının hesaplanmasında likit limit ve kil yüzdesinin birlikte kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceğini belirtmiştir. Gardiner Dam ve Portuguese Bend heyelanlarında varolan korelasyonlarla önerdiği yöntemin karşılaştırmasını yapmıştır. Buna göre önerilen yöntemle Gardiner Dam ve Portuguese Bend heyelanları için güvenlik sayıları sırasıyla 1.02 ve 1.04 olarak belirlenmiştir. Sadece kil yüzdesine, plastisite indisine veya likit limite ilişkilendirilen korelasyonların çelişkili sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Wesley (2003) kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde zeminin plastisite tablosundaki yerinin önemli olduğunu savunmuştur. Farklı likit limite sahip numuneler üzerinde yapılan deneylerle, numunelerin A hattından uzaklıkları (ΔPI) ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki değişim incelenmiştir. ΔPI ve likit limitteki artışların, kalıcı kayma mukavemetini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Kayma mukavemeti açısı ile likit limit ve ΔPI bağlı olarak şu bağıntı geliştirilmiştir:

$$\phi_r' = 322.04(w_L \pm \Delta PI)^{-0.782} \quad (2.4)$$



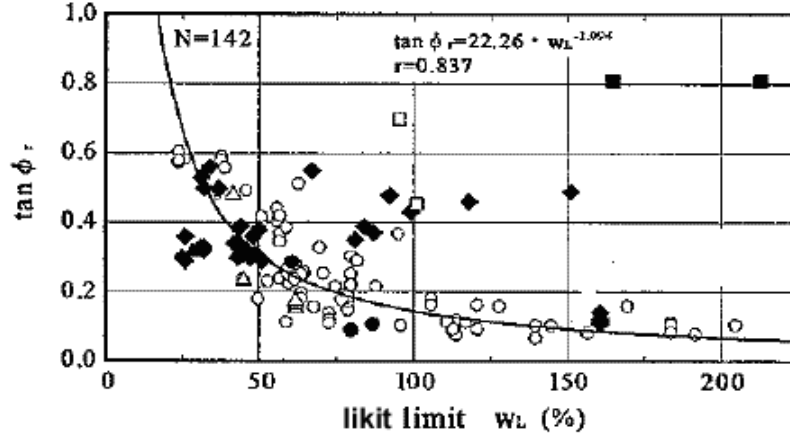
Şekil 2.26 : ϕ_r ile $w_L + \Delta PI$ arasındaki ilişki (Wesley, 2003)

Suzuki ve diğ. (2005) farklı çalışmalarda kullanılan numunelerin kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri arasındaki ilişkileri istatistiksel yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Çizelge 2.8’te ilgilenilen numunelerin içerdikleri kil mineralleri, veri sayıları ve sembolleri yer almaktadır.

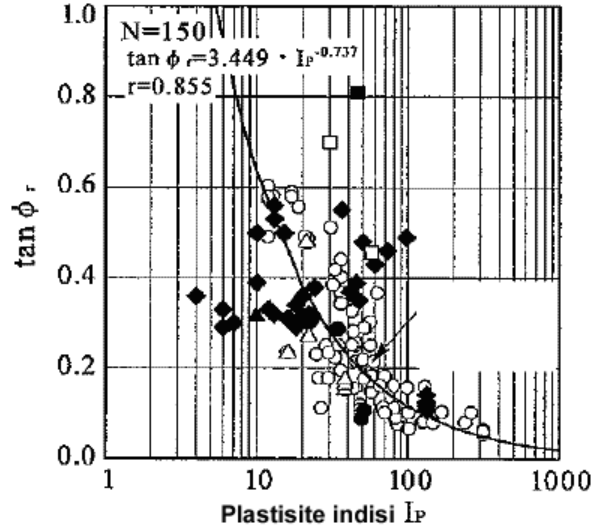
Çizelge 2.8 : İlgilenilen numunelerin içerdikleri mineraller (Suzuki ve diğ., 2005)

Mineral	Veri Sayısı	Sembol
Smektit	323	○
İllit	3	●
Klorit	1	▲
Kaolinit	9	△
Allophan	2	□
Halloysit	2	■
Mika	37	◆
Kuvars	1	◇
Vermikülit	1	▽

Yapılan analizler ile smektit içeren kil numunelerin, kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri ve kil yüzdesi ile yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler bulunduğu görülmüştür. Allophan, halloysit ve mika içeren numunelerde ise herhangi bir ilişki bulunamamıştır. Şekil 2.27 ve 2.28’te sırasıyla kalıcı kayma mukavemetinin likit limit ve plastisite indisi ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.27 : Kalıcı kayma mukavemetinin likit limit ile değişimi (Suzuki ve diğ., 2005)



Şekil 2.28 : Kalıcı kayma mukavemetinin plastisite indisi ile değişimi (Suzuki ve diğ., 2005)

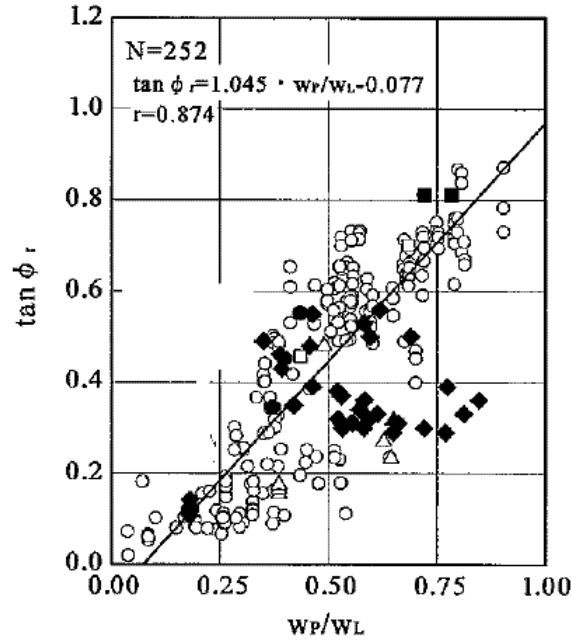
Baskın olarak smektit minerali içeren numunelerin kalıcı kayma mukavemeti ile likit limit ve plastisite indisleri arasında sırasıyla şu bağıntılar elde edilmiştir.

$$\tan \phi_r = 22.26 w_L^{-1.094} \quad (2.5)$$

$$\tan \phi_r = 3.449 I_P^{-0.737} \quad (2.6)$$

Şekil 2.29'dan görüldüğü üzere çalışmadaki en yüksek korelasyon katsayısına ($r=0.874$) sahip ilişki kalıcı kayma mukavemeti ile plastik limit-likit limit oranı arasında elde edilmiştir.

$$\tan \phi_r = 1.045 (w_P/w_L) - 0.077 \quad (2.7)$$



Şekil 2.29 : Kalıcı kayma mukavemeti ile plastik limit-likit limit oranı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2005)

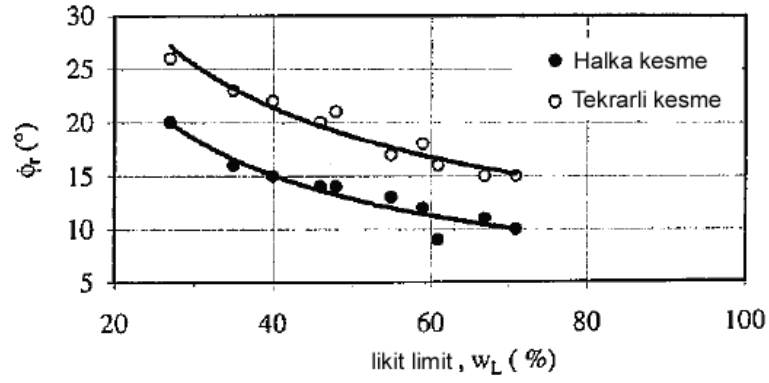
İyisan ve diğ. (2006) farklı kil yüzdelere ve plastisite indislerine sahip hazırlanmış numuneler üzerinde üç değişik normal gerilme altında halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri yaparak, kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve plastisite indisi ile değişimini incelemiştir. Likit limitleri %27 ve %70 arasında numuneler üzerinde yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasında, regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayısı oldukça yüksek olan ($R^2=0.87$) şu bağıntı elde edilmiştir.

$$\phi_r = 213 w_L^{-0.718} \quad (2.8)$$

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasında $R^2=0.93$ olan;

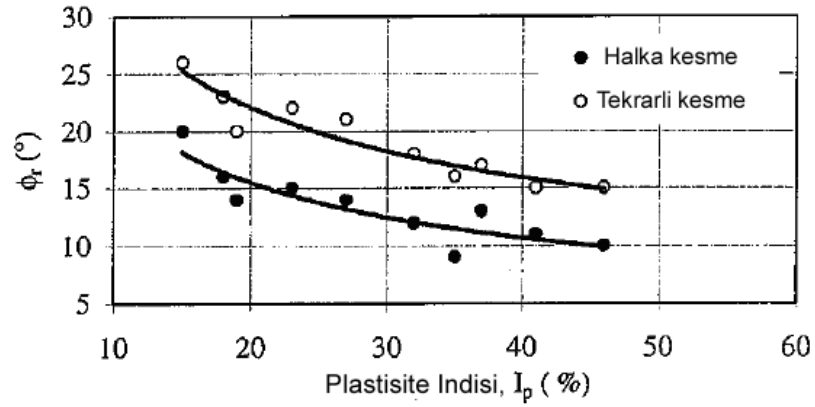
$$\phi_r = 201 w_L^{-0.605} \quad (2.9)$$

Her iki bağıntı da likit limit değerinin artmasıyla kalıcı kayma mukavemeti açısının değerinin azaldığı ancak deney yöntemlerinin sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 2.30'da kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi yer almaktadır.



Şekil 2.30 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi (İyisan ve diğ., 2006)

Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyi ile belirlenen kalıcı mukavemet açılarının plastisite indisi ile değişimi Şekil 2.31’de verilmiştir. Buna göre $w_L - \phi_t$ arasındaki değişime benzer bir ilişki, $\phi_t - I_p$ arasında da bulunmaktadır.



Şekil 2.31 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi (İyisan ve diğ., 2006)

Plastisite indisleri %15 ve %46 arasında değişen numunelerle yapılan halka kesme ve kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet açıları ile plastisite indisleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları sırasıyla %76 ve %90 olan şu eşitlikler elde edilmiştir. (İyisan ve diğ., 2006)

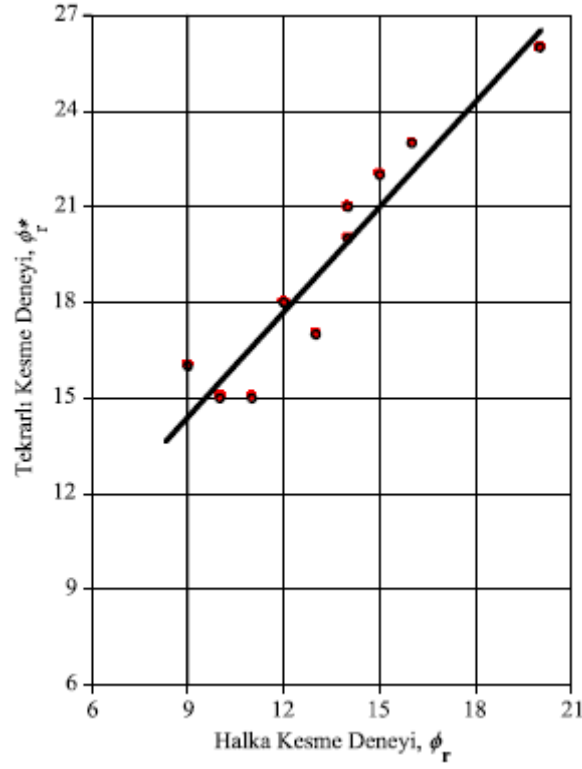
Halka kesme deneylerinin sonucunda ϕ_t ve I_p arasında ;

$$\phi_t = 78 I_p^{-0.539} \quad (2.10)$$

Tekrarlı kesme deneylerinin sonucunda ϕ_t ve I_p arasında ;

$$\phi_t' = 90 I_p^{-0.471} \quad (2.11)$$

İyisan ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmada halka kesme deneyleri ile bulunan kalıcı kayma mukavemeti açısının ϕ_r , tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ϕ_r^* ile değişimini Şekil 2.32’de incelemiştir.



Şekil 2.32 : Halka kesme ile tekrarlı kesme deneylerinin karşılaştırılması (İyisan ve diğ., 2006)

ϕ_r ile ϕ_r^* arasında korelasyon katsayısı yüksek ($R^2 = 0.904$) olan aşağıdaki bağıntı bulunmuştur:

$$\phi_r^* = 1.2\phi_r + 3 \quad (2.12)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri ve plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 7 tanesi Rowe hücresinde hazırlanan, 7 tanesi Proktor enerjisinde sıkıştırılan, biri de doğal numune olan kıvam limitleri ve geoteknik özellikleri farklı 15 numune üzerinde halka kesme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca başka bir çalışma ile ortak yürütülen 24 set tekrarlı kesme kutusu deneyi gerçekleştirilmiştir. Halka kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar ile seçilen 8 numunenin tekrarlı kesme deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada zeminlerin kalıcı kayma mukavemet parametrelerinin halka kesme deneyi ile araştırılması amaçlandığından, diğer tekrarlı kesme deney sonuçları kapsam dışında bırakılmıştır.

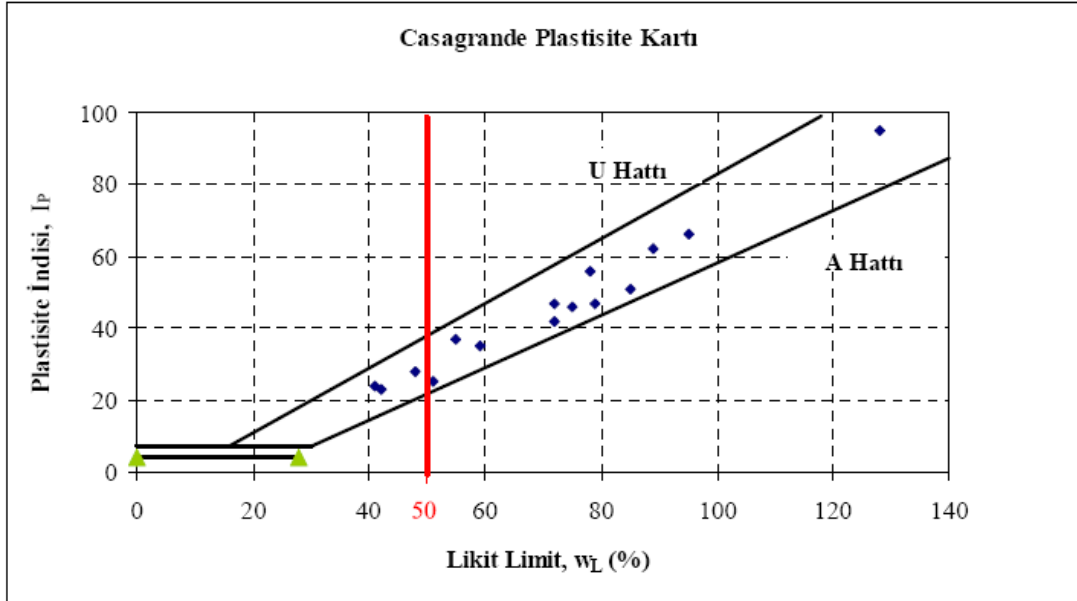
Halka kesme deneylerinde ilk üç numune 100-200-250 kPa normal gerilme altında kesilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açısının her bir normal gerilme altında benzer sonuçlar verdiği belirlendikten sonra kalan on iki numunede deneyler 2 farklı gerilme altında (100 ve 200 kPa) gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri 100-200-300 kPa değerindeki normal gerilmeler altında üç çevrim olarak yapılmıştır. Aşağıda deneysel çalışmada kullanılan numunelerin özellikleri ve deney yöntemleri verilmiştir.

3.1 Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri

Halka kesme deneylerinde kullanılan numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla likit ve plastik likit deneyleri, dane birim hacim ağırlığı deneyleri, elek ve hidrometre analizleri yapılmıştır. Belirlenen kıvam limitleri ile kullanılan numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde yer aldığı gruplar ile plastisite tablosundaki yerleri belirlenmiştir. Numunelerin geoteknik özellikleri Çizelge 3.1'de, plastisite kartındaki yerleri ise Şekil 3.1'de yer almaktadır. Geoteknik özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylere ait grafik ve hesaplamalara EK-A'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri

Numune No	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	γ _n (kN/m ³)	KY (%)	Ac	Zemin Sınıfı	Hazırlanış Yöntemi
E1	128	33	95	17.3	28	3.4	CH	Doğal Numune
E2	95	29	66	17.5	9	7.3	CH	Proctor kalıbı
E3	48	20	28	18.4	10	2.8	CL	Rowe Hücresi
E4	51	26	25	17.2	32	0.8	CH	Proctor kalıbı
E5	85	34	51	16.3	20	2.6	CH	Rowe Hücresi
E6	89	27	62	18.0	24	2.6	CH	Proctor kalıbı
E7	72	30	42	17.1	19	2.2	CH	Rowe Hücresi
E8	78	22	56	17.9	19	2.9	CH	Proctor kalıbı
E9	41	17	24	20.9	14	1.7	CL	Proctor kalıbı
E10	79	32	47	18.1	32	1.5	CH	Rowe Hücresi
E11	72	25	47	17.2	33	1.4	CH	Rowe Hücresi
E12	55	18	37	17.4	21	1.8	CH	Proctor kalıbı
E13	75	29	46	17.8	41	1.1	CH	Proctor kalıbı
E14	42	19	23	19.6	17	1.4	CL	Rowe Hücresi
E15	59	24	35	16.8	16	2.2	CH	Rowe Hücresi



Şekil 3.1 : Numunelerin Casagrande Kartındaki Yeri

3.2 Numune Hazırlama Yöntemi

Bu çalışmada biri örselenmemiş doğal numune olan toplam 15 farklı zemin numunesi kullanılmıştır. Örselenmemiş numune dışındaki numuneler Rowe hücresinde ve Proktor enerjisi altında sıkıştırılarak hazırlanmıştır.

Rowe hücresinde deney numunesi hazırlamak için 40 No'lu elekten elenmiş numune üzerine likit limitin 1.2-1.5 katı değerinde su katılarak bir karışım oluşturulmuştur. Hazırlanan karışım, kil daneleri arasında topaklanma olmasını engellemek amacıyla 1500 devir/dak hızında çalışan alet ile yeterli süre karıştırılmıştır. Karışımın hücre içerisine dökülmesinden sonra Şekil 3.2'deki deney düzeneğindeki basınç ve drenaj vanaları açılmıştır ve basınç panelinden 25 kPa normal gerilme uygulanmıştır. Uygulanan gerilme altında numuneden çıkan su miktarları belirlenmiştir. Su çıkışının durmasının gözlemlenmesiyle uygulanan basınç sırasıyla 50, 75 ve 100 kPa değerlerine çıkartılmıştır. Deney numunesi, her bir yük gerilmesi altında konsolidasyonunu tamamlamasıyla Rowe hücresinden çıkartılmıştır. Rowe hücresinde 10 cm boyunda, 25 cm çapında numuneler hazırlamak mümkündür. Şekil 3.3'te Rowe hücresinden çıkartılan bir deney numunesi yer almaktadır.



Şekil 3.2 : Rowe hücresi deney düzeneği



Şekil 3.3 : Rowe hücresiyle hazırlanmış deney numunesi

Rowe hücresi deney yönteminde hazırlanan deney numunesi konsolidasyonunu 3-5 hafta değişen bir süre içerisinde tamamlamaktadır. Deneysel çalışmada kesintiye uğranılmaması için 7 numune Modifiye Proktor enerjisi altında sıkıştırılmıştır. Bu numune hazırlama yönteminde, halka kesme deneylerinde kullanılan numunelerin çapı ile uygun olmasından dolayı büyük kalıp kullanılmıştır. Numuneler plastik likit kıvamına yakın bir su muhtevasında sıkıştırılmıştır.

3.3 Halka Kesme Deney Düzeneği

Halka kesme deneyi, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan en uygun laboratuvar deney yöntemidir (Bishop, 1971). Bu çalışmadaki deneyler İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan Seiken, Inc. DTA-138 model halka kesme aletinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'te yer alan deney aleti, numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya uygundur. Halka kesme aleti 20-2000 mm/dak kesme hızlarında çalışmaktadır. Kesme deneylerinde iç çapı 100 mm, dış çapı 150 mm olan 20 mm kalınlığa sahip halka şeklinde numuneler kullanılmıştır. Deneyler sırasında boşluk suyu ölçme imkanı bulunmamaktadır. Bu deney yönteminde numune üzerine 40 Nm değerinde burulma momenti ve 500 kPa değerinde normal gerilme uygulanabilmektedir.

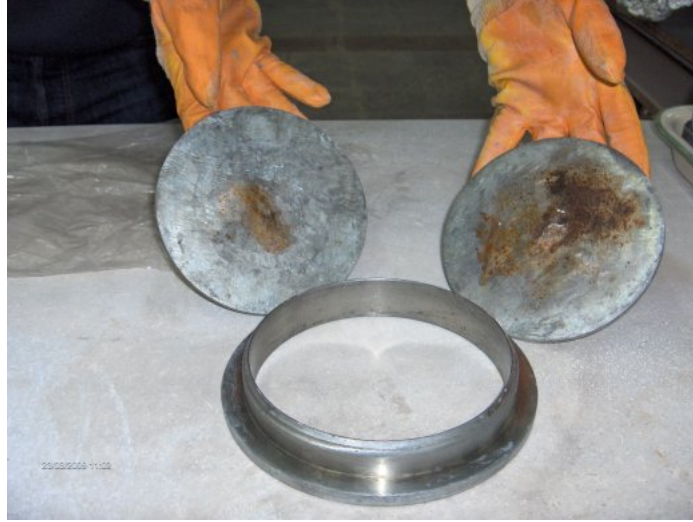


Şekil 3.4 : Halka Kesme Deney Aleti

3.3.1 Halka Kesme Deney Aletine Numune Yerleştirilmesi

Rowe hücresinde veya modifiye Proktor kalıbında hazırlanan numuneler, halka kesme deney düzeneğini için uygun hale getirilmesi aşağıda belirtilmiştir.

- 1) şekil 3.5a'daki metal ringler sürtünmenin azaltılması için yağlanır.
- 2) Rowe hücresinden çıkartılan numuneden yaklaşık 5 cm lik kısım tel testere yardımıyla kesilir (şekil 3.5b).



(a)



(b)

şekil 3.5 : Rowe hücresinden çıkartılan numuneden fazlalıkların kesilmesi

3) 150 mm çapında ve 30 mm yüksekliğindeki numune hazırlama dış ringi kesilen parçaya batırılır. Ringi üzerinde kalan kısım kesilir (şekil 3.6).



şekil 3.6 : Numuneye dış ringin batırılması

4) Ringin içerisine şekil 3.7’deki içi dolu dairesel plaka yerleştirilerek zeminin 5 mm yüksekliğindeki kısmı atılır. Aynı işlem ringin diğer yüzeyine de uygulanır. Buna bağlı olarak ring içerisinde 20 mm yüksekliğinde zemin kalır. Böylece, hazırlanmış numunede bulunan tabaka yüzeylerinin deneylerde kullanılması önlenir.



şekil 3.7 : Dış ring içerisine dairesel plakanın yerleştirilmesi

5) Dış ring içerisinde bulunan zeminin üstüne dış çapı 150 mm ve iç çapı 100 mm olan halka şeklindeki plaka konulur. Halka şeklindeki plakanın ortasında yer alan 100 mm çapındaki kısma iç ring batırılır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Numunelerin halka haline getirilmesi

6) Şekil 3.9'daki iç ringin sınırları arasında kalan zemin bir bıçak yardımıyla oyulur ve çıkarılan parçaların bir kısmı deney başı su muhtevasının belirlenmesi amacıyla metal kaplara yerleştirilir.



Şekil 3.9 : İç kısmın oyularak çıkarılması

7) İç ring numuneye zarar verilmeden yavaşça çıkarılır. Halkasal metal plaka üzerindeki boşluklara vidalar takılır. Deney numunesi vidalardan itilerek halka kesme aletinin içine yerleştirilecek duruma getirilir.

3.3.2 Deney Numunesinin Halka Kesme Deney Aleti ile Kesilmesi

1) En alt dış ring deney sistemine 3 kısa vida ile sıkıştırılır (Şekil 3.10a). Şekil 3.10b'deki parça A-A yüzeyleri üst üste bulunacak şekilde yerleştirilir ve 3 vida ile sistemin iç kısmına tutturulur (Şekil 3.10c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.10 : En alt dış ringin montajı

2) Şekil 3.11’de gösterilen parça, mavi renkli noktaların deliklerine mavi renkli pimler sokularak, iç kısma monte edilir.



Şekil 3.11 : İç ringin montajı

3) En üst dış ring ve sarı renkli ring birbirine 3 adet sarı vida ile tutturulduktan sonra en alt dış ring üzerine yerleştirilir. En üst dış ring, sarı renkli ring ve en alt dış ring 3 adet kırmızı vida ile birleştirilir.



Şekil 3.12 : Dış ringin alt ringe bağlanması

Şekil 3.12’de bulunan diğer 2 delik ile en üst dış ringdeki renksiz 2 deliğin aynı doğrultuda olmasına dikkat edilmelidir. En alt dış ringdeki deliklerin kırmızı vida delikleriyle alt alta gelmesi gerekmektedir. Eğer delikler birbirine denk gelmemişse, en üst dış ring ve sarı renkli ring 180 derece döndürülür.

4) Numunenin yerleştirileceği bölüme halka şeklinde kesilmiş poroz kağıt konulur. Sürtünmenin azaltılması için yan yüzeylerin yağlanmasından sonra ring içerisinde bulunan deney numunesi, halka şeklindeki metal plaka yardımıyla kesme hücresine itilir (Şekil 3.13). Numunenin üst kısmına su içinde doyurulmuş poroz kağıt konulur.



Şekil 3.13 : Deney numunesinin sisteme yerleştirilmesi

5) En üst iç ring ve çekme metali, beyaz renkli kalın vidalarla birbirlerine tutturulur. Şekil 3.14’teki çekme çubukları somunlarla birlikte çekme metaline takılır.



Şekil 3.14 : Çekme çubuklarının çekme metaline montajı

6) Çekme çubuklarının ve metalinin bağlı olduğu en üst iç ring deney numunesi üzerine dikkatlice yerleştirilir ve sisteme 4 vida ile sabitlenir.

7) Mavi renkli pimler çıkartılır, bu işlemin unutulması deney sistemine zarar vermektedir.

8) Mavi renkli basınç plakası yerleştirilerek, 4 vida ile sıkıştırılır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Basınç plakasının yerleştirilmesi

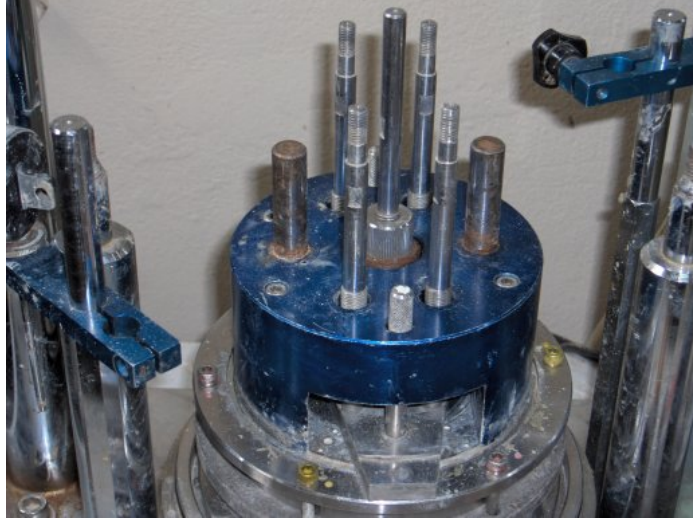
9) Çekme çubuklarında bulunan 4 somun, saat yönünün tersinde çevrilerek hafifçe mavi renkli basınç plakasına değdirilir. (Şekil 3.16)



Şekil 3.16 : Somunların basınç plakasına değdirilmesi

10) Basınç uygulama panelindeki dengeleme basıncı (balancing pressure) bölümünden 0.2 kg/cm^2 değerinde basınç uygulanarak, exhaust yönündeki basınç vanası sağa çevrilir. Bu işlem sonunda basınç plakasının ortasındaki metal şaft yukarı doğru hareket eder.

11) Yukarı hareket eden metal şafta içi boş silindirik şeklindeki somunun takılır. (Şekil 3.17). Dengeleme basıncı vanası sola çevrilerek, metal şaftın ve somunun aşağı doğru inerek basınç plakası ile temas etmesi sağlanır. Uygulanan basınç sıfırlanır.



Şekil 3.17 : Düşey yük şaftının yerleştirilmesi

12) Numuneyi doymun hale getirmek için kullanılan suyu tutmaya yarayan su yatağı yerleştirilir. (Şekil 3.18)



Şekil 3.18 : Su yatağının yerleştirilmesi

13) Tork kolu yavaşça sisteme yerleştirilir ve uç kısımlarından somunlarla sıkıştırılır (Şekil 3.19). Basınç plakasındaki 2 metal çubuk ile tork kolunun sabitleneceği uç kısımlar aynı doğrultuda değilse tork kolunun yerleştirilebilmesi için çarklar yavaşça döndürülür. Tork kolu yerleştirilirken basınç plakasının sarsılmamasına özen gösterilmelidir.



Şekil 3.19 : Tork kolunun yerleştirilmesi

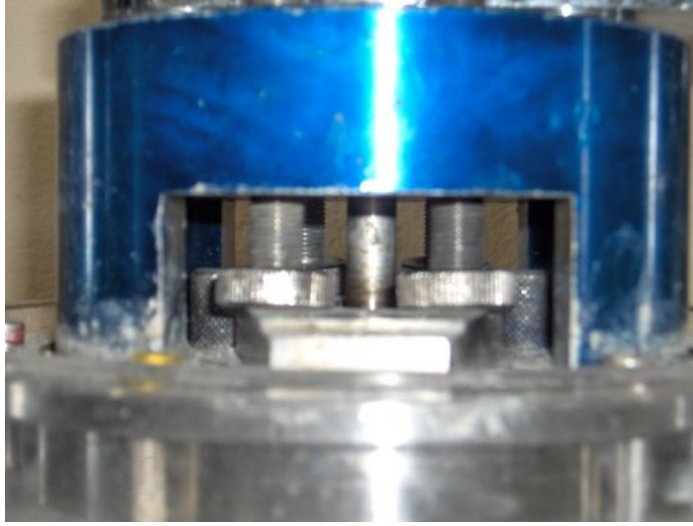
14) Şekil 3.20' deki ring çekme metali 4 kelebek somun ile sisteme bağlanır. Düşey yüzey sürtünmesini ölçen alıcı, ring çekme metaline hafifçe değdirildikten sonra sabitlenir.



Şekil 3.20 : Ring çekme metalinin bağlanması

15) Basınç plakasındaki 2 beyaz vida çıkarılır.

16) Basınç plakasının alt yüzeyine değdirilmiş olan 4 somun gevşetilerek aşağı indirilir (Şekil 3.21). Sistemde sıkışmaların önlenmesi için öndeki somunlar ile arkadaki somunlar aynı anda gevşetilmelidir. Somunların indirilmesiyle tork kolunun vidası ile kesme kuvveti alıcısı ortalanmaktadır.



Şekil 3.21 : Somunların gevşetilmesi

17) En üst dış ringdeki sarı ve kırmızı vidalar çıkarılır. Sarı renkli ring itilerek en alt dış ringe değiştirilir.

18) Numune üzerindeki düşey deformasyon ile ringler arasındaki açıklığı gösteren saatler sisteme yerleştirilir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22 : Düşey deformasyon saatinin yerleştirilmesi

19) Şekil 3.23'te gösterilen amplifikatör, kalibrasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların yer aldığı Çizelge 3.2'ye göre ayarlanır.

Çizelge 3.2 : Amplifikatör Başlangıç Değerleri

Özellikler	Kanal			
	CH1	CH2	CH3	CH4
Kapasite	2000 N	1000 N	20 mm	5000 kPa
Cal.	4005	4001	3000	3987
Att.	1/10	1/10	1/5	1/10
Range (Volt)	5	5	6	8



Şekil 3.23 : Amplifikatör ayarlanması

Amplifikatör açılmadan önce CAL, LOCK ve ATT düğmelerinin kapalı pozisyonunda bulunmasına ve CAL bölümünde her kanal için çizelge 3.2’de verilen değerlerin girilmiş olmasına dikkat edilmelidir.

Kanalların ve amplifikatörün POWER düğmesine basılarak çalıştırılır. Yaklaşık 10 dakika bekledikten sonra sırasıyla şu adımlar takip edilerek amplifikatör ayarlanır:

ATT düğmesi, kalibrasyonlar sonucunda belirtilen değerlere getirilir.

Her kanalda, BAL düğmesine basılarak amplifikatörde okunan volt değerleri sıfırlanır.

LOCK düğmeleri yukarı kaldırılır.

VAR veya FINE düğmeleri kullanılarak her kanalda okunan volt değerlere çizelge 3.2’de belirlenen değerlere getirilir. Her kanalda BAL düğmesine basılarak sıfırlanır.

20) Basınç panelinden uygulanacak normal gerilme değeri ayarlanarak basınç vanası sağa çevrilir (Şekil 3.24). Gerilmenin uygulandığı bellofram ile numunenin kesit alanı aynı olmadığından (Bellofram kesit alanı/Numune kesit alanı = 0.69), uygulanan normal gerilme numune üzerine azaltılarak iletilmektedir. (Seiken, 1994) Buna göre numune üzerine 100 kPa gerilme uygulamak için, basınç panelinden $100/0.69 = 145$ kPa gerilme uygulanmalıdır.



Şekil 3.24 : Basınç panelinden gerilme uygulanması

21) Normal gerilmenin uygulanmasından sonra kesme hücresi su ile doldurulur, numunenin konsolide olması için beklenir.

22) Konsolidasyonun tamamlanmasından sonra, kriko sola doğru döndürülerek ringler arasında yeterli açıklık bırakılır. Bu çalışmada, kesilen numunenin fazla kaybolmaması ve sistemdeki düşey sürtünme değerinin artmaması için ringler arasındaki açıklık değeri 20 mm olarak belirlenmiştir.

23) Kesme işleminin başlatılması için şekil 3.25'te gösterilen hız kontrol kutusunda bulunan güç butonu ON konumuna getirilir. Yükleme butonunun LOAD konumuna getirilmesinden sonra zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebilmesi için hız değişim butonu LOW konumuna getirilir. Bu konumda seçilebilecek en düşük hız 20 mm/dakika değerindedir. Kavrama butonu ON pozisyonuna getirilerek kesme işlemi başlatılır.



Şekil 3.25 : Hız kontrol kutusu

24) Kesme işlemi tamamlandıktan sonra, önce drenaj deliği açılarak su boşaltılır ardından basınç panelinden uygulanan gerilme boşaltılır. Şekil 3.26’da kesilmiş bir numunenin deney sonrası görünümü yer almaktadır.



Şekil 3.26 : Kesilmiş bir numunenin deney sonrası görünümü

3.4 Kesme Kutusu Deney Aleti

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini, halka kesme deney aletinin yanısıra tekrarlı kesme kutusu deney aleti ile belirlemek de mümkündür. Kesme kutusu ile numune üzerinde sınırlı deformasyon yapılabilmektedir. 12 mm'lik yerdeğişimlerinden sonra, alet geri sarılarak eski konumuna getirilmekte ve yeniden kesme işlemi başlamaktadır. Bu işlemin çevrimler halinde tekrarlanmasıyla, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için gereken deformasyona ulaşılmaktadır.

Bu çalışmada, halka kesme deneylerinde kullanılan numunelerin 8 tanesi ile tekrarlı kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.27'de İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan ELE model kesme kutusu deney aleti yer almaktadır. Deney düzeneği içerisine 60 x 60 mm² kesit alanlı numune yerleştirilmektedir.



Şekil 3.27 : Halka kesme deney aleti

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, genel geoteknik özellikleri ve hazırlanış yöntemleri bir önceki bölümde anlatılan numuneler kullanılarak yapılan halka kesme ve seçilen tekrarlı kesme deneylerinin sonuçları yer almaktadır.

Halka kesme deneyleri, deney aletinin izin verdiği en düşük hız olan 20 mm/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. İlk üç numune 100-200-250 kPa normal gerilme altında kesilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açısının her bir normal gerilme altında benzer sonuçlar verdiği belirlenmesiyle kalan numunelerde deneyler 2 farklı gerilme altında (100 ve 200 kPa) gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın başında yapılan bazı deneylerde numuneler kesildikleri yük gerilmeleri altında bir gün süreyle konsolide edilmiştir. Bu sürede numunelerin konsolide olamadığı ve dolayısıyla düzgün kesme yüzeyleri elde edilemediği görülmüştür. Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemetine etkisinin olmadığı bilindiğinden numunelerin daha kısa sürede konsolidasyonunu tamamlayabilmesi için aşırı konsolidasyon oranı 2 olarak belirlenmiştir.

Halka kesme deneylerinde yaklaşık sabit bir kayma gerilmesi değeri elde edinceye kadar kesme işlemine devam edilmiştir. Kalıcı kayma mukavemetine genellikle numunelerin çevresi olan 400 mm kayma deformasyonundan sonra ulaşıldığı daha önceki çalışmalardan gözlemlenmiştir. Bu nedenle, numuneler üzerinde 600 mm kayma deformasyonu yaptırmanın yeterli olacağı belirlenmiştir.

Bu çalışmada, seçilen 8 numune ile tekrarlı kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve halka kesme deneyinden belirlenen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri, 0.035 mm/dak kesme hızında ve 100-200-300 kPa değerindeki normal gerilmeler altında üç çevrim olarak gerçekleştirilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti değerleri 3. çevrim sonucu elde edilmiştir. Deneysel sonuçların doğru bir şekilde karşılaştırılması açısından tüm numuneler halka kesme deneylerinde olduğu gibi aşırı konsolidasyon oranı 2 olacak şekilde konsolide edilmiştir. Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri göçme zarfına uygulanan doğrusal yaklaşım sonucu belirlenmiştir.

4.1 Halka Kesme Deneyi Hesaplamaları

Kesme işlemi sırasında amplifikatörden yapılan volt birimli okumalar aşağıdaki denklemler kullanılarak mühendislik birimlerine dönüştürülebilir.

$$\text{CH1: Kesme Kuvveti (N)} = 404.11 \times \text{Okuma} \quad (4.1)$$

$$\text{CH2: Düşey sürtünme kuvveti (N)} = 202.38 \times \text{Okuma} \quad (4.2)$$

$$\text{CH3: Düşey deplasman (mm)} = 5 \times \text{Okuma} \quad (4.3)$$

$$\text{CH4: Basınç panelinden uygulanan normal gerilme (kPa)} = 95.76 \times \text{Okuma} \quad (4.4)$$

4.1.1 Kayma Gerilmelerinin Belirlenmesi

Halka kesme deneylerinde, dış çapı 150 mm, iç çapı 100 mm ve yüksekliği 20 mm olan numuneler kullanılmaktadır. Amplifikatörden 1. kanalından okunan değere karşılık gelen kesme kuvveti değeri T' ise, numunenin ortasındaki bir noktada oluşan kesme kuvveti T dönme merkezine göre alınan momentlerin eşitliğinden hesaplanır.

$$T' \times L = T \times R \quad (4.5)$$

Burada;

L : kesme kuvveti alıcısının merkezi ile dönme merkezi arası yatay mesafe olup 20 cm değerindedir.

R : Numunenin ortası ($D=125$ mm) ile dönme merkezi arası yatay mesafe olup $D/2=62.5$ mm değerindedir.

Eşitlik 4.5'e L ve R değerleri yerleştirilirse $T' \times 20 = T \times 6.25$ ifadesi elde edilir.

Numune ortasındaki herhangi bir nokta üzerinde oluşan kayma gerilmesi, τ şu şekilde belirlenir:

$$\tau = T/A \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'da yer alan A , numune kesit alanı olup, $\pi(D_{\text{dış}}-D_{\text{iç}})^2 / 4 = 98.2 \text{ cm}^2$ değerindedir.

Amplifikatörden okunan değere karşılık gelen T' kesme kuvveti, numunenin ortasındaki bir noktada oluşan kayma gerilmesi şu şekilde belirlenir:

$$\tau = (T' \times 20) / (6.25 \times 98.2) \quad (4.7)$$

$$\tau = T' / 30.68 \quad (4.8)$$

Amplifikatörün CH1 kanalından okunan bir değerin ifade ettiği kayma gerilmesi ilgili kalibrasyonlardan şu şekilde belirlenmiştir:

$$\tau \text{ (kg/cm}^2\text{)} = (40.411 \times \text{Okuma}) / 30.68 \quad (4.9)$$

$$\tau \text{ (kPa)} = 131.72 \times \text{Okuma} \quad (4.10)$$

4.1.2 Düşey Sürtünme Kuvvetinin Hesaplanması

Halka kesme deneyinde ringler arasının açılması durumunda ve numunenin kesilmesi sırasında, ringlerin yan yüzeyleri arasında sürtünme oluşmaktadır. Deneyler sırasında sürtünme değeri sabit kalmamaktadır. Bu nedenle, numune kesilmeden okunan ilk sürtünme değerinin deney süresince sabit olduğu kabul edilebilmektedir. Sürtünme kuvveti ile gerilmesi şu şekilde belirlenmektedir:

$$\text{Sürtünme kuvveti, } F \text{ (N)} = 202.38 \times (\text{CH2 okuması}) \quad (4.11)$$

$$\text{Sürtünme gerilmesi, } \sigma_f \text{ (kPa)} = F/A = 20.61 \times (\text{CH2 okuması}) \quad (4.12)$$

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerdeki sürtünme etkisi, ringler arasına vazelin sürülerek çok azaltılmış ve ihmal edilmiştir.

4.1.3 Düşey Deformasyonun Belirlenmesi

$$\text{Düşey deformasyon (mm)} = 5 \times (\text{CH3 okuması}) \quad (4.13)$$

4.13 eşitliğiyle belirlenen deformasyon miktarı, alt ve üst ringlerin numuneye geçme miktarını da içermektedir. Bu nedenle, numunenin gerçek deformasyonu belirlenen değerden 1.5~2 mm daha azdır.

4.1.4 Numune Üzerindeki Normal Gerilmenin Belirlenmesi

Numune ile bellofram kesit alanları farklı olduğundan basınç panelinden uygulanan gerilme, numuneye azaltılarak iletilmektedir.

$$\text{Basınç panelinden uygulanan gerilme (kPa)} = 95.76 \times (\text{CH4 okuması}) \quad (4.14)$$

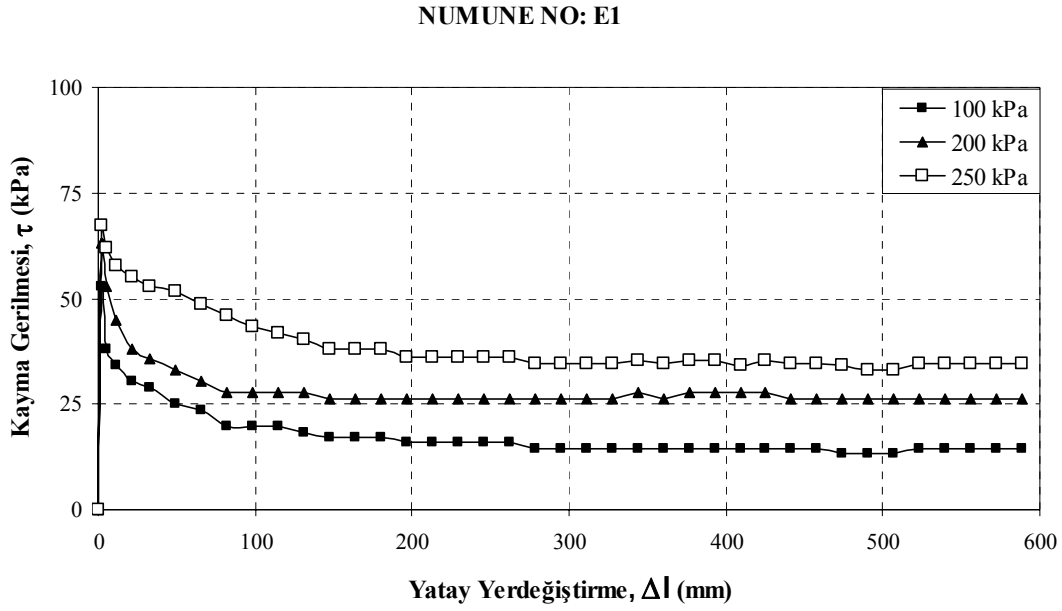
Eşitlik 4.14'ten bulunan değerin 0.69 katı, numune üzerindeki normal gerilme değeridir. Buna göre;

$$\text{Numune üzerindeki normal gerilme (kPa)} = 65.84 \times (\text{CH4 okuması}) \quad (4.15)$$

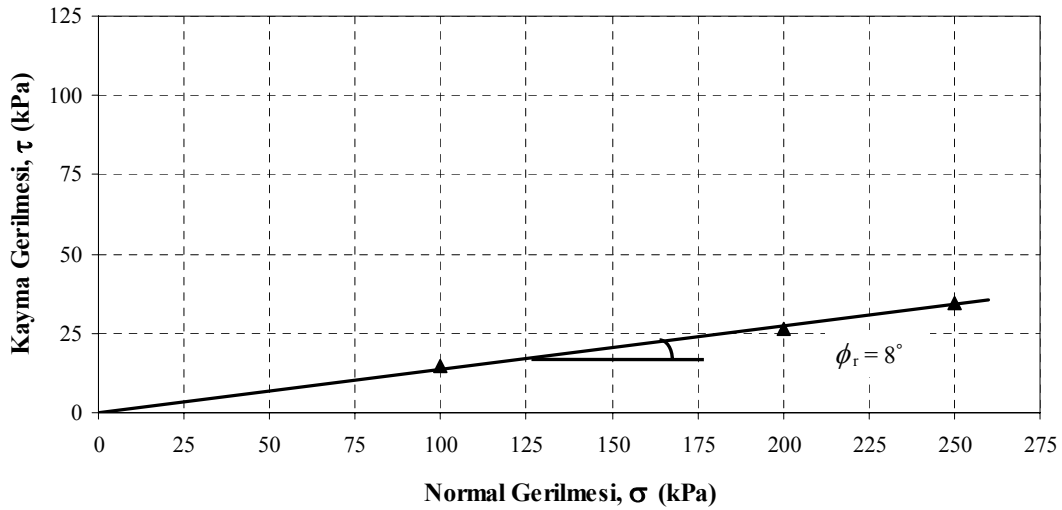
Numune üzerindeki net normal gerilme ise sürtünme gerilmesinin Eşitlik 4.15'ten bulunan değerden çıkartılmasıyla bulunmaktadır.

4.2 Halka Kesme Deney Sonuçları

E1 numunesinin halka kesme deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi-yatay deplasman eğrisi ile göçme zarfı sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : E1 numunesi halka kesme deney sonucu



Şekil 4.2 : E1 numunesi halka kesme deneyi göçme zarfı

Halka kesme deneyleri süresince sürtünme gerilmeleri ihmal edildiğinden numuneler üzerine uygulanan gerilmeler de azalma olmamıştır. Deneyler süresince uygulanan gerilmeler sabit tutulmuştur. Halka kesme deney sistemi zeminlerin pik kayma mukavemetinin belirlenmesi için uygun olmadığından numunelerin sadece kalıcı kayma mukavemetleri belirlenmiştir. İlgilenilen numunelerin kalıcı durumlarında kohezyon terimi bulunmamıştır. Çizelge 4.1’de tüm numuneler üzerinde yapılan halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı mukavemet parametreleri yer almaktadır. Tüm numunelere ait kayma gerilmesi-yatay deplasman eğrileri ile göçme zarfları EK-B’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Halka kesme deney sonuçları

Numune No	$\phi_r (^\circ)$	Numune No	$\phi_r (^\circ)$	Numune No	$\phi_r (^\circ)$
E1	8	E6	11	E11	10
E2	7	E7	11	E12	14
E3	20	E8	7	E13	11
E4	17	E9	21	E14	18
E5	10	E10	8	E15	14

4.3 Tekrarlı Kesme Deneyi Hesaplamaları

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde, numunedeki yatay ve düşey yerdeğiştirme ile numuneye uygulanan yük değerleri okunmuştur. Kuvvet halkası okumaları numune 6 mm yer değiştirene kadar her 25 birimde, 6 mm yer değiştirmeden sonra ise her 50 birimde yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme kutusunun ring faktörü 0.1394 div/kg’dır. Deney numunesi üzerine uygulanan kuvvet aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

$$\text{Kuvvet (kg)} = \text{Kuvvet okuması (div)} \times \text{Ring faktörü (div/kg)} \quad (4.16)$$

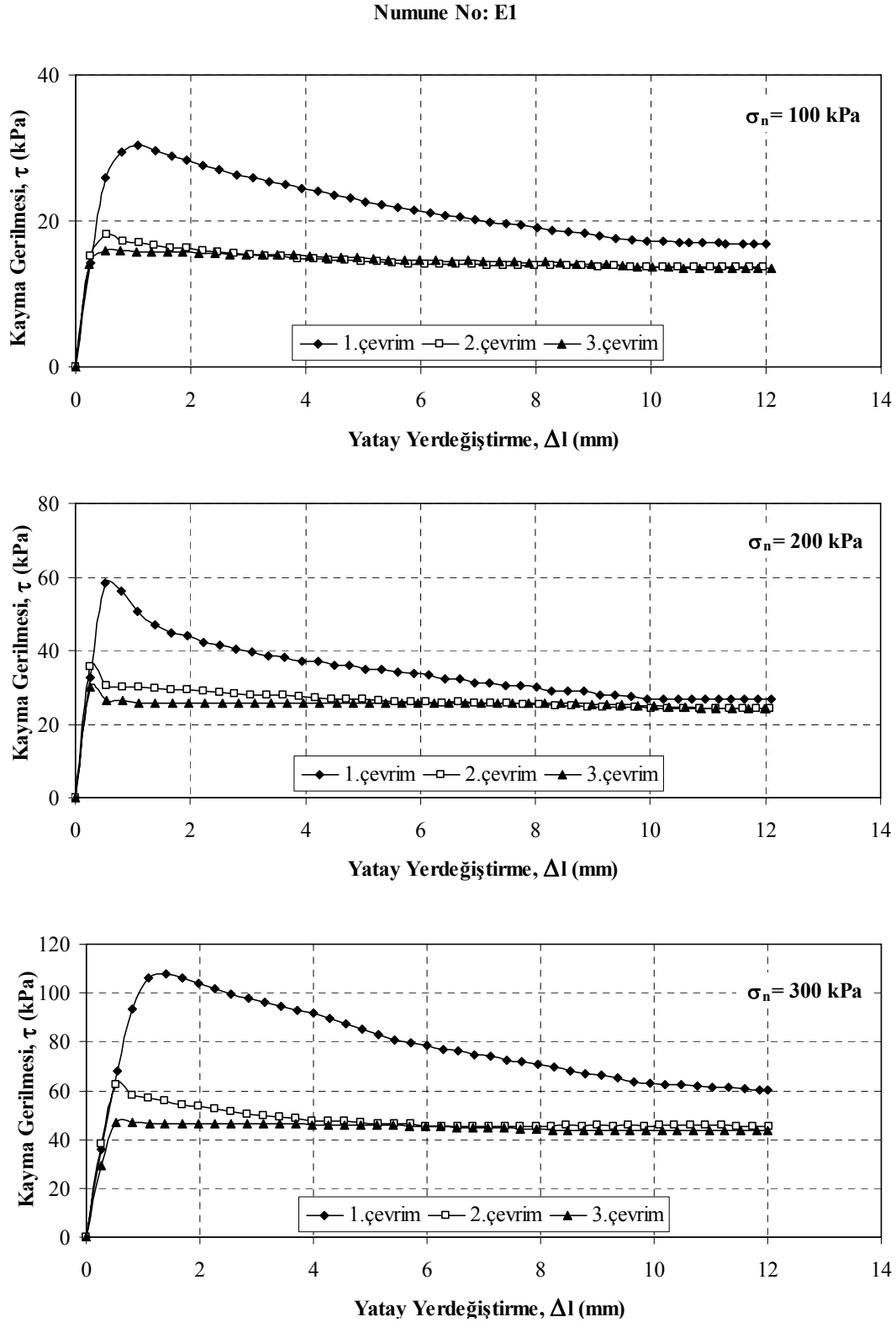
Numune ortasındaki herhangi bir nokta üzerinde oluşan kayma gerilmesi, τ şu şekilde belirlenir:

$$\tau \text{ (kPa)} = \frac{\text{kuvvet (kg)}}{\text{alan (cm}^2\text{)}} \times 100 \quad (4.17)$$

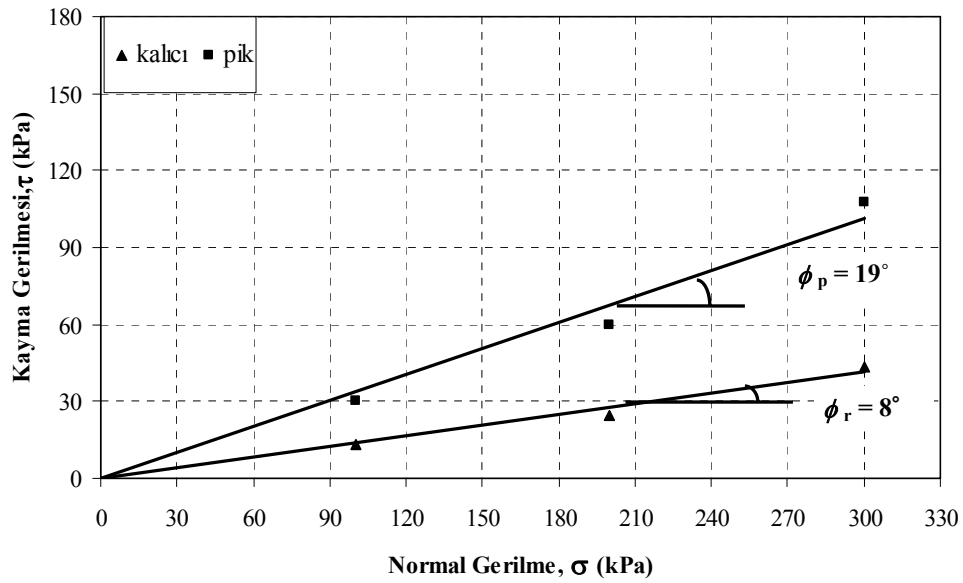
Hesaplamalar sırasında alan düzeltmesi yapılmamıştır, numune en kesit alanı olarak 36 cm² kullanılmıştır.

4.4 Tekrarlı Kesme Deney Sonuçları

E1 numunesinin 100-200 ve 300 kPa normal gerilme altındaki deney sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3'ten görüldüğü üzere her bir normal gerilme altında 3. çevrimden sonra kalıcı duruma ulaşılmıştır. E1 numunesine ait pik ve kalıcı göçme zarfları Şekil 4.4'te bulunmaktadır. Ayrıca, tüm numuneler üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda belirlenen pik ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Tekrarlı kesme deneylerinde kalıcı durumda hiçbir numunede kohezyon terimi bulunmamasına rağmen, E4, E6 ve E8 numunelerinin pik durumlarında kohezyon bulunmaktadır. Tüm numunelere ait kayma gerilmesi-yatay deplasman eğrileri ile göçme zarfları EK-B'de verilmiştir.

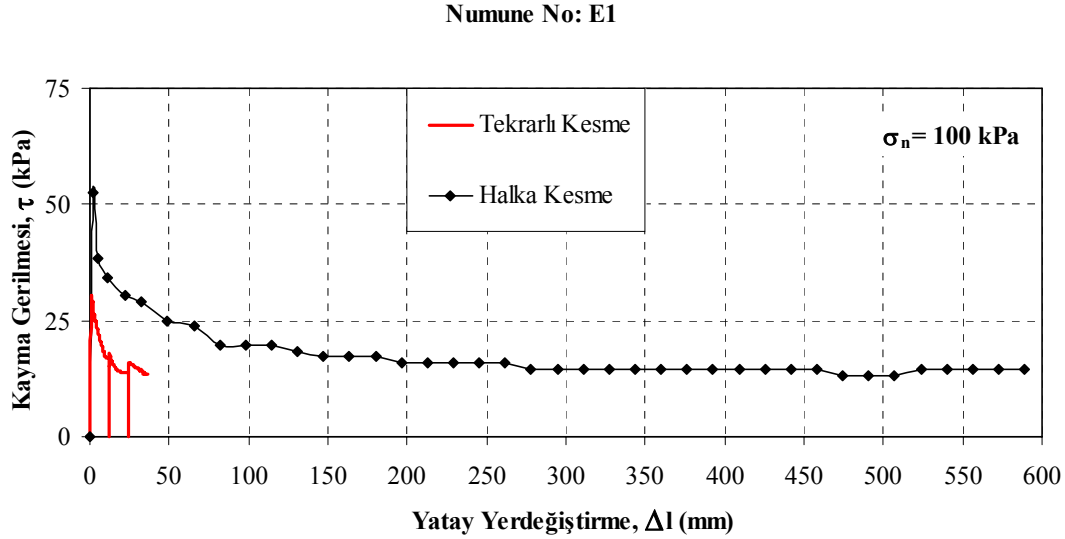


Şekil 4.4 : E1 numunesi tekrarlı kesme deneyi göçme zarfları

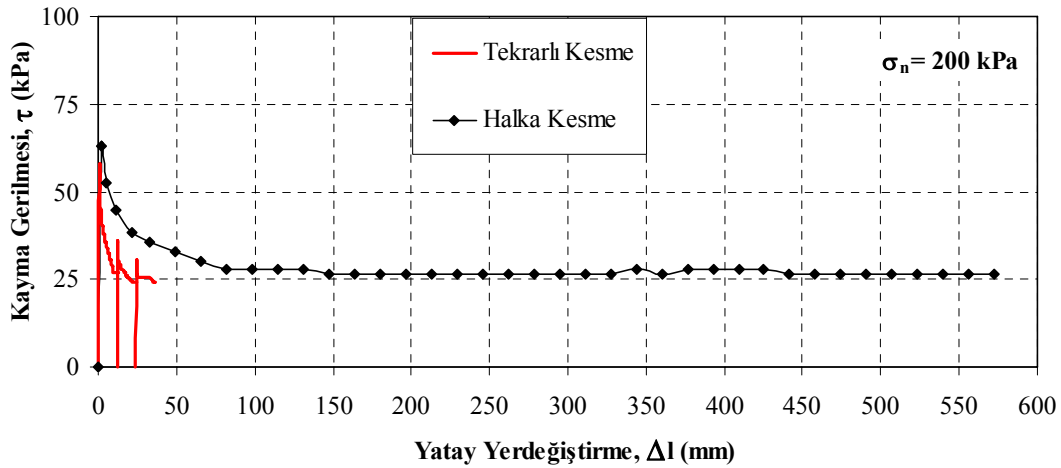
Çizelge 4.2 : Tekrarlı kesme deney sonuçları

Numune No	Kalıcı		Pik	
	c_r (kPa)	ϕ_r (°)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)
E1	0	8	0	19
E4	0	21	20	24
E5	0	12	0	22
E6	0	16	50	20
E7	0	9	0	23
E8	0	13	20	18
E10	0	10	0	21
E11	0	7	0	24

E1 numunesi üzerinde gerçekleştirilen halka kesme ve tekrarlı kesme deneylerinden ϕ_r her iki deney yönteminine göre 8° olarak belirlenmiştir. E1 numunesinin 100 kPa ve 200 kPa normal gerilmelerdeki halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonuçlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : E1 numunesi halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonucu, $\sigma_n=100 \text{ kPa}$



Şekil 4.6 : E1 numunesi halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonucu, $\sigma_n=200 \text{ kPa}$

Her iki deney yönteminde kalıcı durumda numune, benzer kayma gerilmesi değerlerine sahip olsa da, halka kesme deneylerinde kalıcı duruma yaklaşık 600 mm yer değiştirmeden sonra ulaşıldığı görülmektedir. Halka kesme deneyleriyle daha güvenilir kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenebileceği açıktır.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

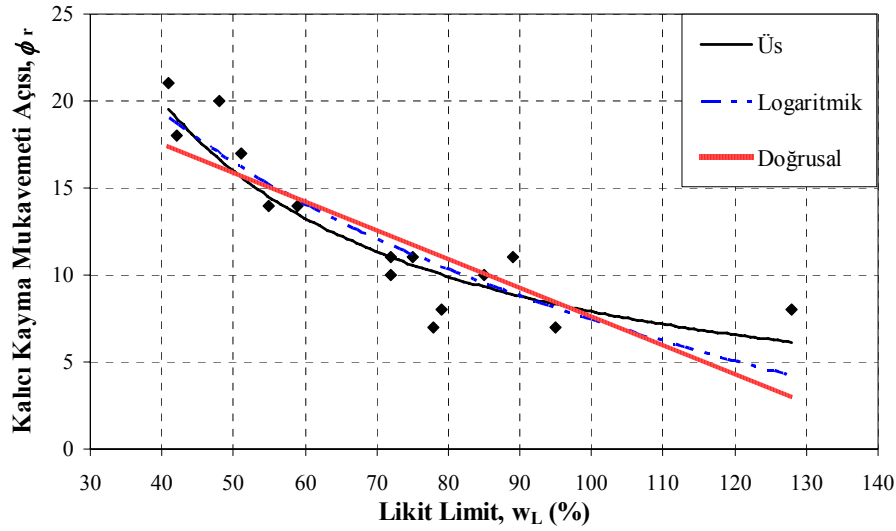
15 numunede gerçekleştirilen halka kesme ve seçilen 8 numune kullanılarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda kalıcı kayma gerilmelerine göre elde edilen Mohr-Coulomb kırılma zarflarının doğrusal kabulüyle mukavemet parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada halka kesme deneylerinden bulunan kalıcı mukavemet açıları ϕ_r ile tekrarlı kesme kutusu deneyleriyle belirlenen kalıcı mukavemet açıları ϕ_r^* 7°-21° arasında değerler almaktadır.

Kalıcı kayma mukavemeti minerolojik yapıdan, normal gerilme seviyesinden ve kesme hızından etkilenmektedir. İnce daneli zeminlerde dane boyutu azalırken yani özgül yüzey artarken, likit limitin de artması beklenir (Wesley, 2003). Bu nedenle kıvam limitleri zeminlerin minerolojik bir göstergesi olarak düşünülmelidir.

5.1 Kalıcı Kayma Mukavemet Açıları ile Kıvam Limitleri Arasındaki İlişkiler

Bu çalışmada farklı kil yüzdesine ve kıvam limitlerine sahip numuneler üzerinde yapılan halka kesme deneyleri sonucunda belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açılarının (ϕ_r) likit limit (w_L), plastisite indisi (I_p), $w_L + \Delta PI$, plastik limit (w_p) w_p/w_L oranı, Aktivite (A_c) ve kil yüzdesi (KY) arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizleri ile çeşitli bağıntılar elde edilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açısının tüm ilişkilerdeki değişimi üs, logaritmik ve doğrusal fonksiyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm ilişkilerde logaritmik bağıntıların daha yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Buna rağmen, uygulamadaki kullanım kolaylığı açısından üs bağıntıların daha yararlı olacağı düşünülmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit, plastisite indisi ve $w_L + \Delta PI$ arasındaki değişimlerde korelasyon katsayısı oldukça yüksek bağıntılar elde edilmiştir. ϕ_r ile aktivite ve kil yüzdesi arasında ise herhangi bir bağıntı bulunamamıştır.

Likit limitleri %41 ve %128 arasında değişen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ϕ_r ile w_L arasındaki değişim Şekil 5.1’de görülmektedir.



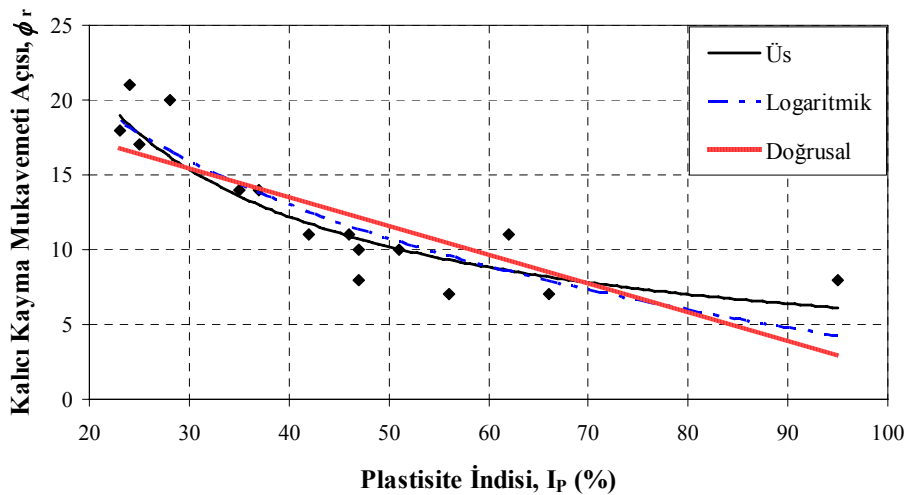
Şekil 5.1 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi

ϕ_r ile w_L arasında elde edilen bağıntılar Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : ϕ_r - w_L arasında elde edilen bağıntılar

Fonksiyon	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 848w_L^{-1.015}$	0.79
Logaritmik	$\phi_r = -13\ln(w_L) + 67.32$	0.80
Doğrusal	$\phi_r = -0.166w_L + 24.31$	0.69

Kalıcı kayma mukavemet açılarının plastisite indisi ile değişimi Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Buna göre, ϕ_r ile w_L arasındaki değişime benzer bir ilişki, ϕ_r ile I_p arasında da bulunmaktadır.



Şekil 5.2 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi

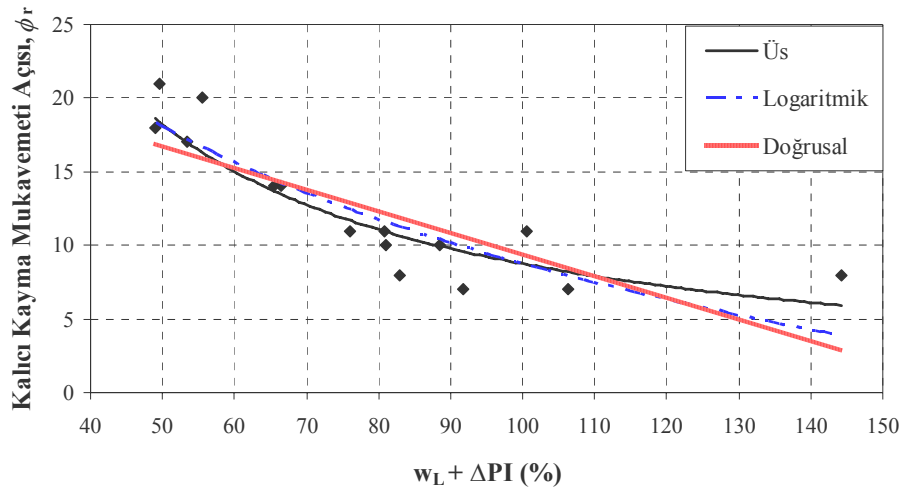
Plastisite indisleri %23 ile %95 arasında değişen numunelerle yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet açıları ile plastisite indisleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda belirlenen eşitlikler Çizelge 5.2’de yer almaktadır.

Çizelge 5.2 : ϕ_r - I_p arasında elde edilen bağıntılar

Fonksiyon	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 232I_p^{-0.798}$	0.78
Logaritmik	$\phi_r = -10.13\ln(I_p) + 50.36$	0.79
Doğrusal	$\phi_r = -0.192I_p + 21.24$	0.63

Şekil 5.3’te ϕ_r ile $w_L + \Delta PI$ arasındaki değişim verilmiştir. Burada ΔPI terimi, kullanılan numunelerin A hattına olan uzaklıkları ifade etmektedir ve şu şekilde belirlenmektedir:

$$\Delta PI = I_p - 0.73(w_L - 20) \quad (5.1)$$



Şekil 5.3 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının $w_L + \Delta PI$ ile değişimi

ϕ_r ile $w_L + \Delta PI$ arasında korelasyon katsayısı %78 olan aşağıdaki eşitliğe ulaşılmıştır.

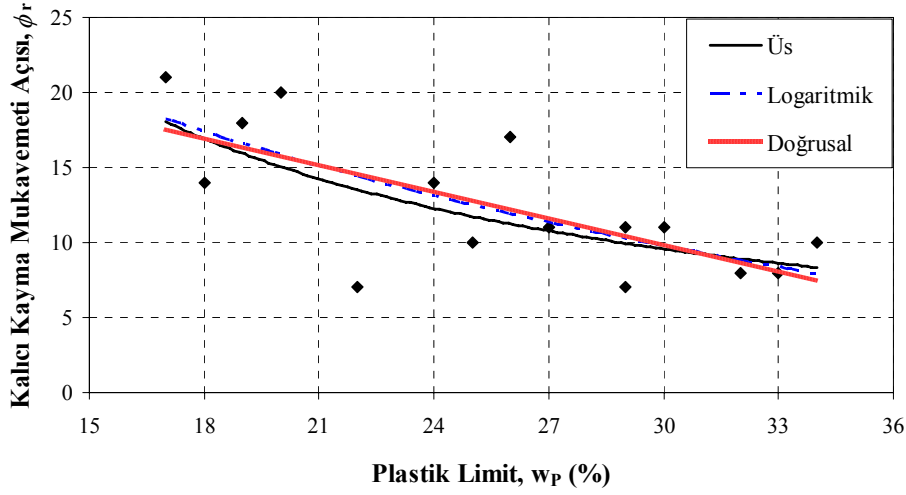
$$\phi_r = 1144 (w_L + \Delta PI)^{-1.058} \quad (5.2)$$

Belirlenen diğer korelasyonlar Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 : $\phi_r - (w_L + \Delta PI)$ arasında elde edilen bağıntılar

Fonksiyon	Bağıntı	R^2
Logaritmik	$\phi_r = -13.41(w_L + \Delta PI) + 70.54$	0.78
Doğrusal	$\phi_r = -0.148(w_L + \Delta PI) + 24.19$	0.65

Kullanılan numunelerin kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastik limitlere göre değişimi Şekil 5.4'te incelenmiştir. Plastik limitleri %17 ile %34 arasında değişen numunelerin kalıcı kayma mukavemeti açısı için önerilen bağıntı Çizelge 5.4'te verilmiştir.

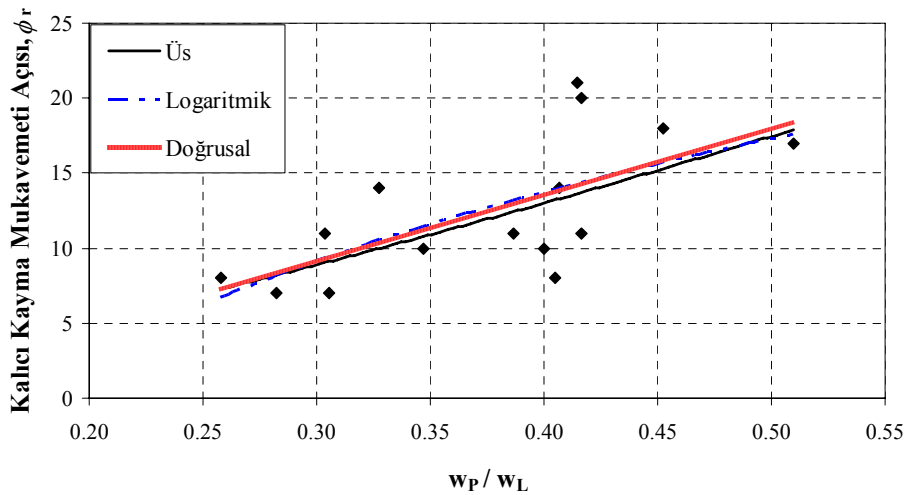


Şekil 5.4 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi

Çizelge 5.4 : $\phi_r - w_p$ arasında elde edilen bağıntılar

Fonksiyon	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_r = 423w_p^{-1.113}$	0.47
Logaritmik	$\phi_r = -14.91(w_p) + 60.51$	0.52
Doğrusal	$\phi_r = -0.60(w_p) + 27.72$	0.50

Şekil 5.5'te kalıcı kayma mukavemeti açısının w_p/w_L oranı ile değişimi verilmiştir. Artan w_p/w_L oranlarında daha büyük ϕ_r değerlerine ulaşılmaktadır.



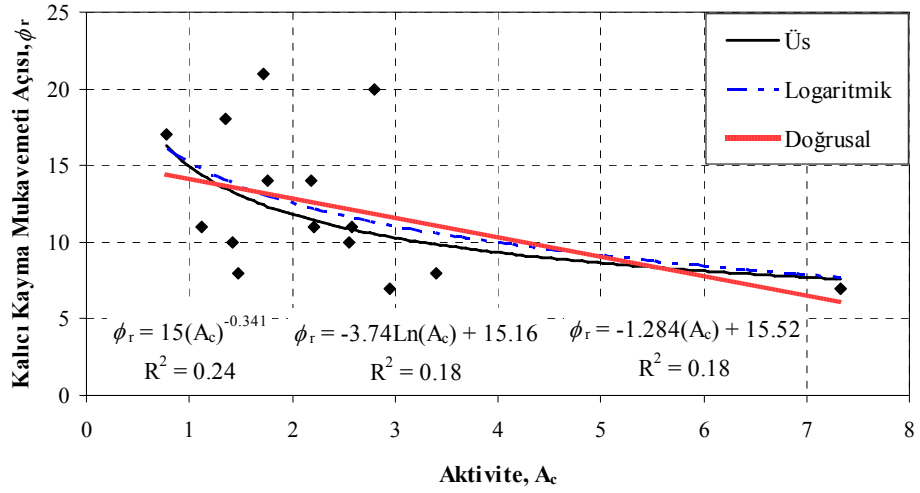
Şekil 5.5 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının w_p/w_L oranı ile değişimi

ϕ_r ile w_p/w_L arasında belirlenen bağıntılar Çizelge 5.5'te yer almaktadır.

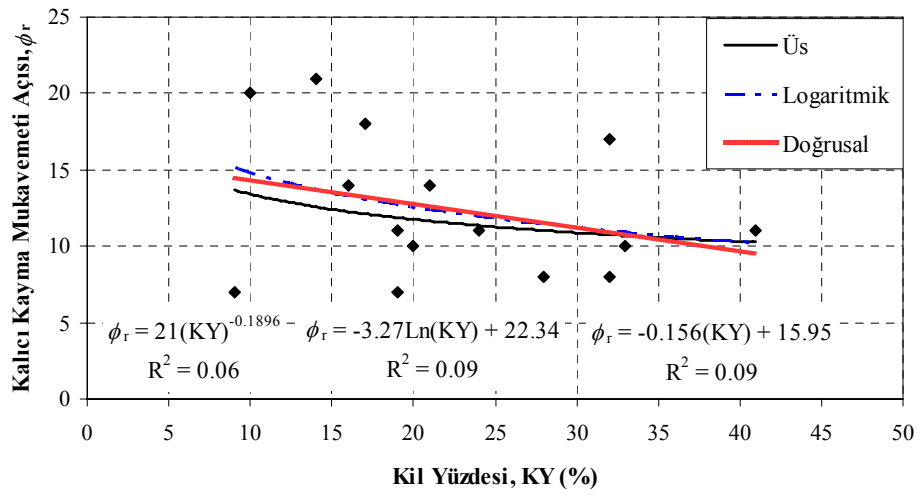
Çizelge 5.5 : $\phi_r - (w_p/w_L)$ arasında elde edilen bağıntılar

Fonksiyon	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 44(w_p/w_L)^{1.321}$	0.47
Logaritmik	$\phi_r = 16(w_p/w_L) + 28.41$	0.43
Doğrusal	$\phi_r = 44.27(w_p/w_L) - 4.16$	0.43

Kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ve kil yüzdesi ile değişimi sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de incelenmiştir. Her iki değişimde de herhangi bir ilişki belirlenenemiştir.



Şekil 5.6 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ile değişimi



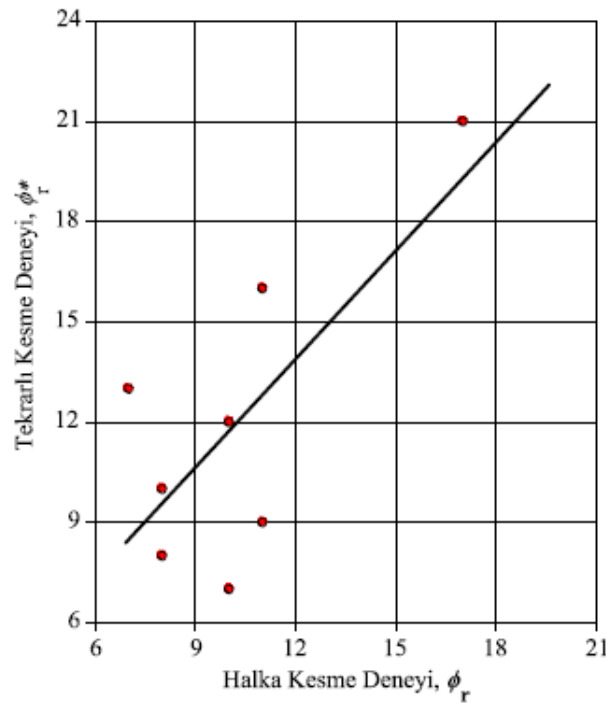
Şekil 5.7 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi

5.2 Halka Kesme Deneyleri ile Tekrarlı Kesme Deneylerinin Karşılaştırılması

Halka kesme deneylerinin sonuçları seçilen 8 numune üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Halka kesme deneyleri, mevcut sistemin izin verdiği en düşük hız olan 20 mm/dak kesme hızında ve 100-200 kPa normal gerilmeler altında, kesme kutusu deneyleri ise 0.035 mm/dak kesme hızında ve 100-200-300 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.6’da her iki deney sonucunda belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açıları gösterilmiştir. Şekil 5.8’de halka kesme ile tekrarlı kesme deneylerinin sonuçları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Çizelge 5.6 : Halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonuçları

Numune No	Halka Kesme	Tekrarlı Kesme
	ϕ_r (°)	ϕ_r^* (°)
E1	8	8
E4	17	21
E5	10	12
E6	11	16
E7	11	9
E8	7	13
E10	8	10
E11	10	7



Şekil 5.8 : Halka kesme ile tekrarlı kesme deneylerinin karşılaştırılması

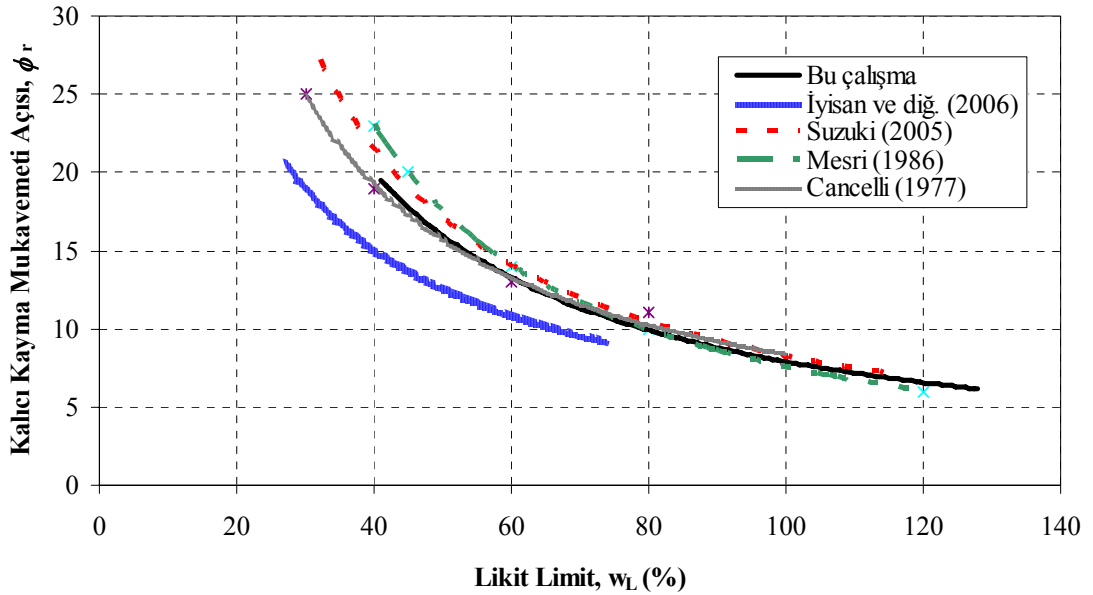
ϕ_r ile ϕ_r^* arasında $R^2=0.52$ olan şu bağıntı bulunmuştur:

$$\phi_r^* = 1.082\phi_r + 0.915 \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.3'teki korelasyonun düşük olmasının halka kesme deneylerinin tekrarlı kesme deneylerine göre çok daha hızlı gerçekleşmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Korelasyonun geliştirilmesi için daha çok deney yapılması önerilmektedir.

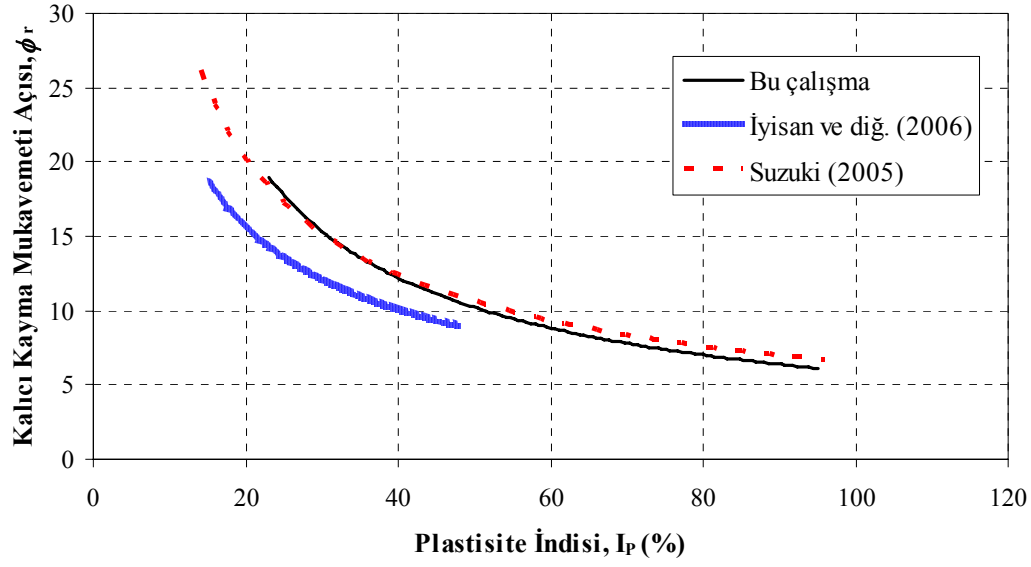
5.3 Halka Kesme Deney Sonuçlarının Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Bu çalışmada halka kesme deney sonuçlarına göre hesaplanan en yüksek korelasyon katsayılarına sahip ϕ_r - w_L ve ϕ_r - I_p ilişkilerinin önceden yapılmış çalışmalarla karşılaştırılması sırasıyla Şekil 5.9 ve 5.10'da yer almaktadır. Tüm çalışmalarda kalıcı kayma mukavemeti açısı artan likit limit ve plastisite indisiyle azalmıştır.



Şekil 5.9 : ϕ_r - w_L ilişkilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.9'dan bu çalışmada elde edilen sonuçların Suzuki (2005), Mesri (1986) ve Cancelli (1977) tarafından önerilen değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Likit limiti % 70'ten küçük olan numuneler için önerilen kayma mukavemeti parametrelerinin Mesri'nin önerdiği değerlerin altında kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 5.10 : ϕ_r - I_p ilişkilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.10'da ϕ_r - I_p ilişkisi incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların, Suzuki (2005) tarafından önerilen değerlere yakın olduğu, İyisan ve diğ. (2006) tarafından önerilen değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Her iki çalışmada numunelerin farklı gerilmelerde kesilmesinin bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Sınırlı sayıdaki numune üzerinden yapılan deneylerin sonuçlarına dayanan bulguların farklı özelliklere sahip numuneler kullanılarak yapılacak deneylerle geliştirilmesi mümkün olacaktır.

6. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminlerin kayma gerilmesi - kayma deformasyonu ilişkileri incelendiğinde, kayma gerilmesinin aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda deformasyonun artmasıyla önce belirli bir pik değere kadar arttığı daha sonra azalarak sabit bir değer aldığı görülmektedir. Kayma gerilmesinin bu sabit değeri zeminin kalıcı mukavemeti olarak tanımlanmıştır. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti mineralojik yapıdan, efektif normal gerilme seviyesinden ve kesme hızından etkilenmektedir. Zemin tabakalarının gerilme - şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek için birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde yaygın olarak halka kesme ve kesme kutusu deneyleri kullanılmaktadır. Halka kesme deneyi numune üzerinde sınırsız deformasyon yapmaya izin verecek şekilde geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında plastisite indisleri %23 ile %95 arasında değişen 15 numune üzerinde halka kesme deneyleri ve seçilen 8 numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit, plastik limit, plastisite indisi gibi mineralojik faktörlere bağlı değişimi incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Likit limitteki ve plastisite indisindeki artışların kalıcı kayma mukavemeti açısını düşürdüğü görülmüştür.
2. Numunelerin plastisite kartındaki yerlerinin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde önemli olduğu dolayısıyla plastisite indisi ve likit limitin kalıcı kayma mukavemetini doğrudan etkilediği düşünülmektedir.
3. Kalıcı kayma mukavemeti açısının mineralojik faktörlere bağlı değişimi incelenerek pratik amaçlar için çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Önerilen korelasyonlar arasında kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit ve plastisite indisi arasındaki ilişkilerin en güvenilir sonuçlar olduğu belirlenmiştir.

4. Kil yüzdesi ve aktivitenin kalıcı kayma mukavemetini etkidiği bilinmesine rağmen küresel daneler için uygun olan hidrometre deneyleri sonucunda bulunan kil yüzdeleri ile kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında herhangi bir ilişki bulunamamıştır.
5. Halka kesme deneylerinde toplam gerilmelere göre çalışıldığından tekrarlı kesme deneylerine göre genellikle daha düşük kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir.
6. Halka kesme deneylerinde genellikle numunelerin çevresi kadar yerdeğiştirmelerden sonra kalıcı mukavemet durumuna ulaşılmıştır.
7. Halka kesme deneylerinde numunelerin konsolidasyonunu tamamlaması için en az 2 gün gerektiği, konsolidasyonun tamamlanamaması ve sürtünme gerilmelerinin azaltılamaması durumunda düzgün bir kayma yüzeyi elde edilemeyeceği gözlemlenmiştir.
8. Halka kesme deneyleri ile tekrarlı kesme deneyleri sonucunda belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında bulunan korelasyonun geliştirilmesi için daha fazla deney yapılması gerekmektedir.
9. Daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi için halka kesme deney aletinin hızının düşürülmesi ve deney sırasında boşluk suyu basıncının ölçülmesi gerektiği önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM, D 6447., 2000. Standart 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.
- Bardet, J. P., 1997: Experimental Soil Mechanics, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A., and Brown, J. D., 1971: A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength. *Geotechnique*. Vol. 21, no. 4, pp. 273-328
- Das, M. B., 2006: Principles of Geotechnical Engineering. Thomson, Canada
- Hawkins, A. B., and Privett, K. D., 1985: Measurement and Use of Residual Shear Strength of Cohesive Soils. *Ground Engineering*. pp. 22-29
- 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, Türkiye, Eylül 7-8.
- İyisan, R., Çevikbilen, G., Koltuk, S., Yılmaz, E., 2006. Measurement of Residual Shear Strength by Ring Shear Test, *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering*, Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye, October 11-13.
- Koltuk, S., 2005. Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi, *Yük. Lis. Tezi*, İTÜ, İstanbul.
- Lemos, L. J. L., (1985). Shear Behaviour of Pre-Existing Shear Zones Under Fast Loading-Insights on the Landslide Motion, from <http://www.unina2.it/flows2003/articoli/lemos>

- Lupini, J.F., Skinner, A. E., and Vaughan, P. R. ,** 1981: The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique*. Vol. **31**, no. 2, pp. 181-213
- Mesri, G. and Capeda-Diaz, A.F.,** 1986: Residual Shear Strength Of Clays And Shales. *Geotechnique*. Vol. **36**, no. 2, pp. 269-274.
- Mesri, G. and Shaninen, M.,** 2003: Residual Shear Strength Mobilized In First Time Slope Failures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. **129**, no. 1, pp. 12-31
- Mitchell, J. K.,** 1993: Fundamentals of Soil Behaviour. John Wiley & Sons, New York
- Önalp, A.,** 2007: Geoteknik Bilgisi 1: Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul,
- Özaydın, K.,** 2000: Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul,
- Seiken Inc.,** 1994: Ring Shearing Test Apparatus Instruction Manual. Model: DTA-138
- Skempton, A. W.,** 1964: Long Term Stability of Clay Slopes. *Geotechnique*. Vol. **14**, no. 2, pp. 77-102
- Skempton, A. W.,** 1985: Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory . *Geotechnique*. Vol. **35**, no. 1, pp. 3-18
- Stark, T. D., and Eid, H. T.,** 1994: Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. **120**, no. 5, pp. 856-871
- Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J., and Hisanaga, K. (2001).** Variation in Residual Strength of Clay with Shearing Speed, from <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/521/06.pdf>
- Suzuki, M., Tsuzuki, S., and Yamamoto, T., (2005).** Physical and Chemical Index Properties of Residual Strength of Various Soils, from <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/561/01.pdf>
- Tiwari, B. and Marui, H.,** 2004: Objective Oriented Multistage Ring Shear Test For Shear Strength Of Landslide Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. **130**, no. 2, pp. 217-222

- 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 Geoenvironmental 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 Geoenvironmental Engineering*. Vol. **131**, no. 9, pp. 1139-1150
- Wesley, L. D.,** 2003: Residual Strength of Clays and Correlations using Atterberg Limits. *Geotechnique*. Vol. **53**, no. 7, pp. 669-672

EKLER

EK A : Elek ve Hidrometre Analizleri

EK B : Halka Kesme Deney Sonuçları

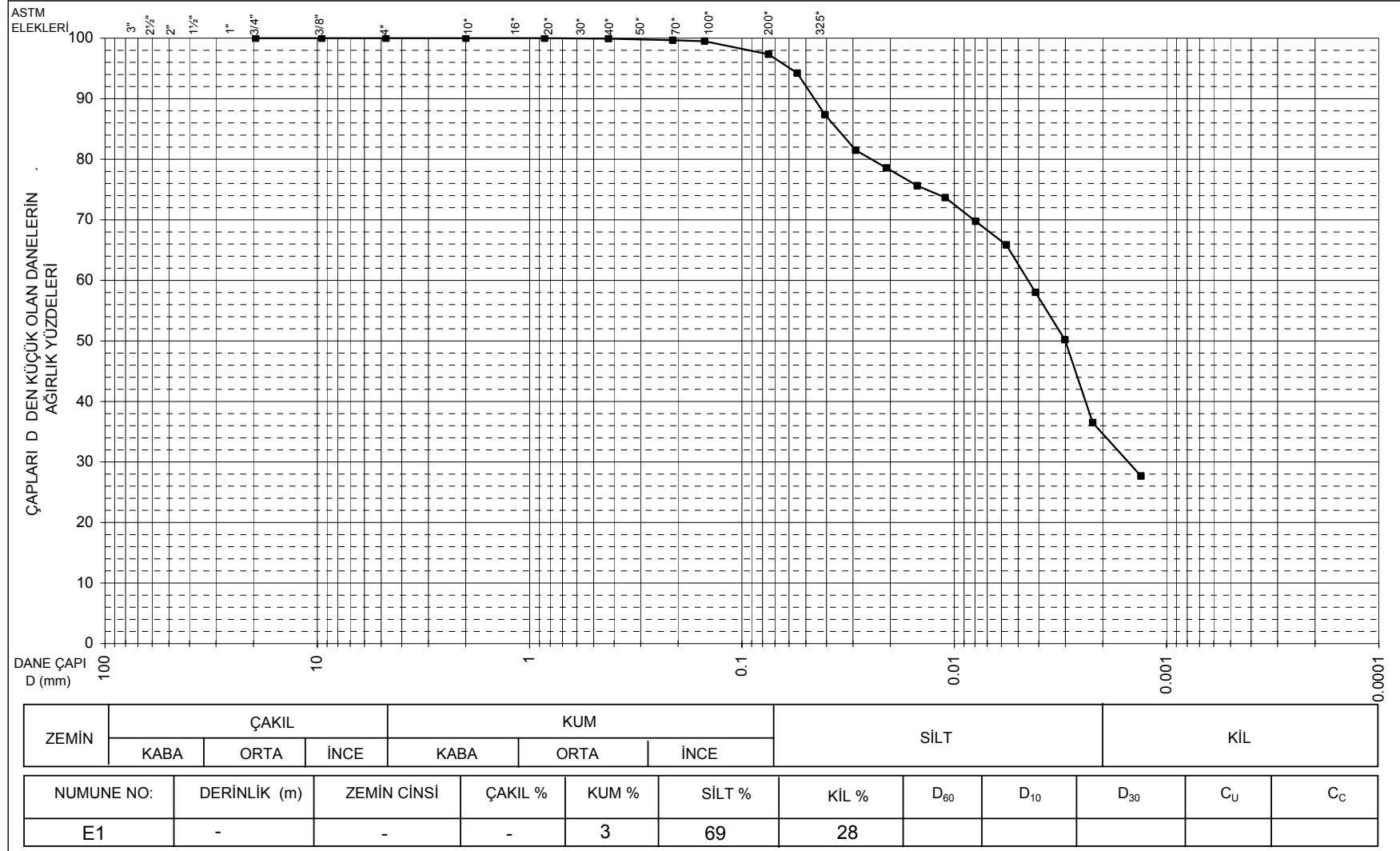
EK C : Tekrarlı Kesme Deney Sonuçları

EK A**Çizelge A.1 : E1 numunesi elek analizi**

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	439.1	100
3/8	9.53	0	439.1	100
4	4.75	0	439.1	100
10	2.00	0	439.1	100
20	0.85	0	439.1	100
40	0.425	0.3	438.8	100
70	0.212	1.2	437.6	100
100	0.150	0.7	436.9	99
200	0.075	9.5	427.4	97

Çizelge A.2 : E1 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_l = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51.5	52.5	49.65	8.23	0.075	99.3	97
0.5	50	51	48.15	8.48	0.055	96.3	94
1	46.5	47.5	44.65	9.04	0.040	89.3	87
2	43.5	44.5	41.65	9.53	0.029	83.3	81
4	42	43	40.15	9.78	0.021	80.3	79
8	40.5	41.5	38.65	10.02	0.015	77.3	76
15	39	40	37.65	10.18	0.011	75.3	74
30	37	38	35.65	10.51	0.008	71.3	70
60	35	36	33.65	10.83	0.006	67.3	66
120	31	32	29.65	11.48	0.004	59.3	58
240	27	28	25.65	12.13	0.003	51.3	50
480	20	21	18.65	13.27	0.002	37.3	36
1440	15.5	16.5	14.15	14.00	0.001	28.3	28



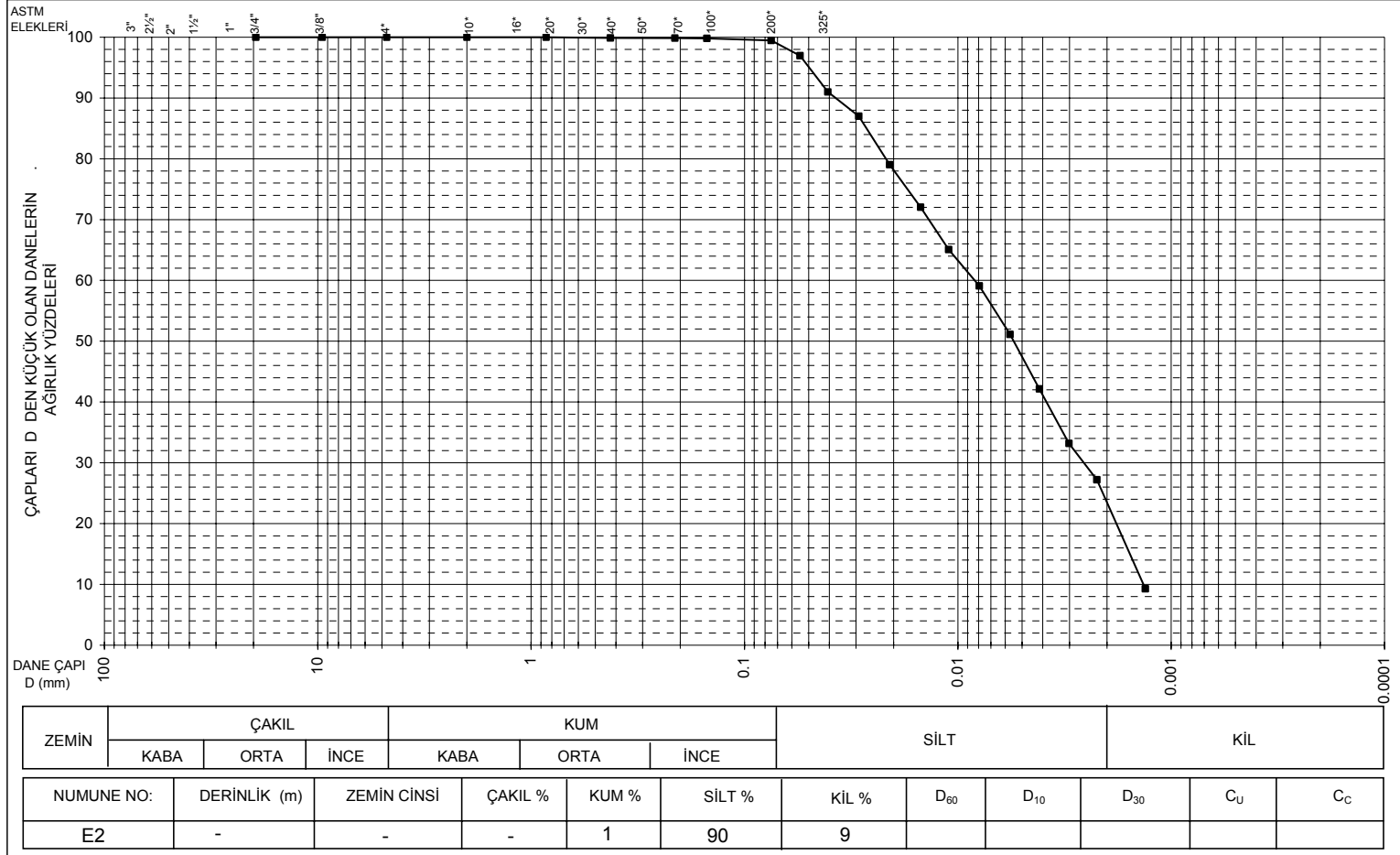
Şekil A.1 : E1 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.3 : E2 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	466.3	100
3/8	9.53	0	466.3	100
4	4.75	0	466.3	100
10	2.00	0	466.3	100
20	0.85	0	466.3	100
40	0.425	0.5	465.8	100
70	0.212	0.2	465.6	100
100	0.150	0.2	465.4	100
200	0.075	1.6	463.8	99

Çizelge A.4 : E2 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R'_h	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51	52.0	49.65	8.23	0.075	99.3	99
0.5	50	51.0	48.65	8.39	0.055	97.3	97
1	47	48.0	45.65	8.88	0.040	91.3	91
2	45	46.0	43.65	9.21	0.029	87.3	87
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	6	7.0	4.65	15.54	0.001	9.3	9



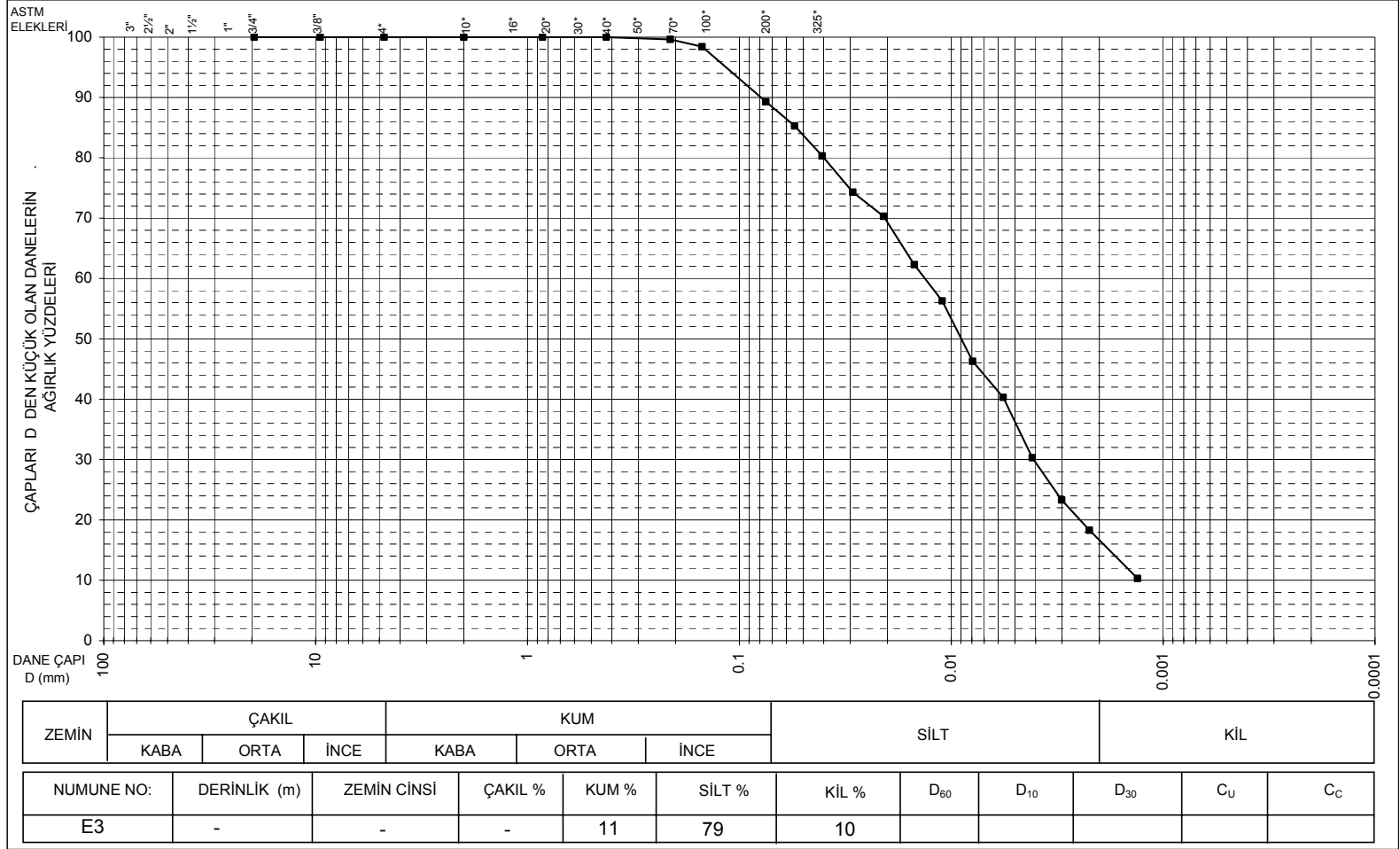
Şekil A.2 : E2 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.5 : E3 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	489.4	100
3/8	9.53	0	489.4	100
4	4.75	0	489.4	100
10	2.00	0	489.4	100
20	0.85	0	489.4	100
40	0.425	0	489.4	100
70	0.212	1.9	487.5	100
100	0.150	5.9	481.6	98
200	0.075	44.6	437.0	89

Çizelge A.6 : E3 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R'_h	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	46.5	48	44.65	9.04	0.075	89.3	89
0.5	44.5	46	42.65	9.37	0.055	85.3	85
1	42	43	40.15	9.78	0.040	80.3	80
2	39	40	37.15	10.26	0.029	74.3	74
4	37	38	35.15	10.59	0.021	70.3	70
8	33	34	31.15	11.24	0.015	62.3	62
15	30	31	28.15	11.73	0.011	56.3	56
30	25	26	23.15	12.54	0.008	46.3	46
60	22	23	20.15	13.03	0.006	40.3	40
120	17	18	15.15	13.84	0.004	30.3	30
240	13.5	15	11.65	14.41	0.003	23.3	23
480	11	12	9.15	14.81	0.002	18.3	18
1440	7	8	5.15	15.46	0.001	10.3	10



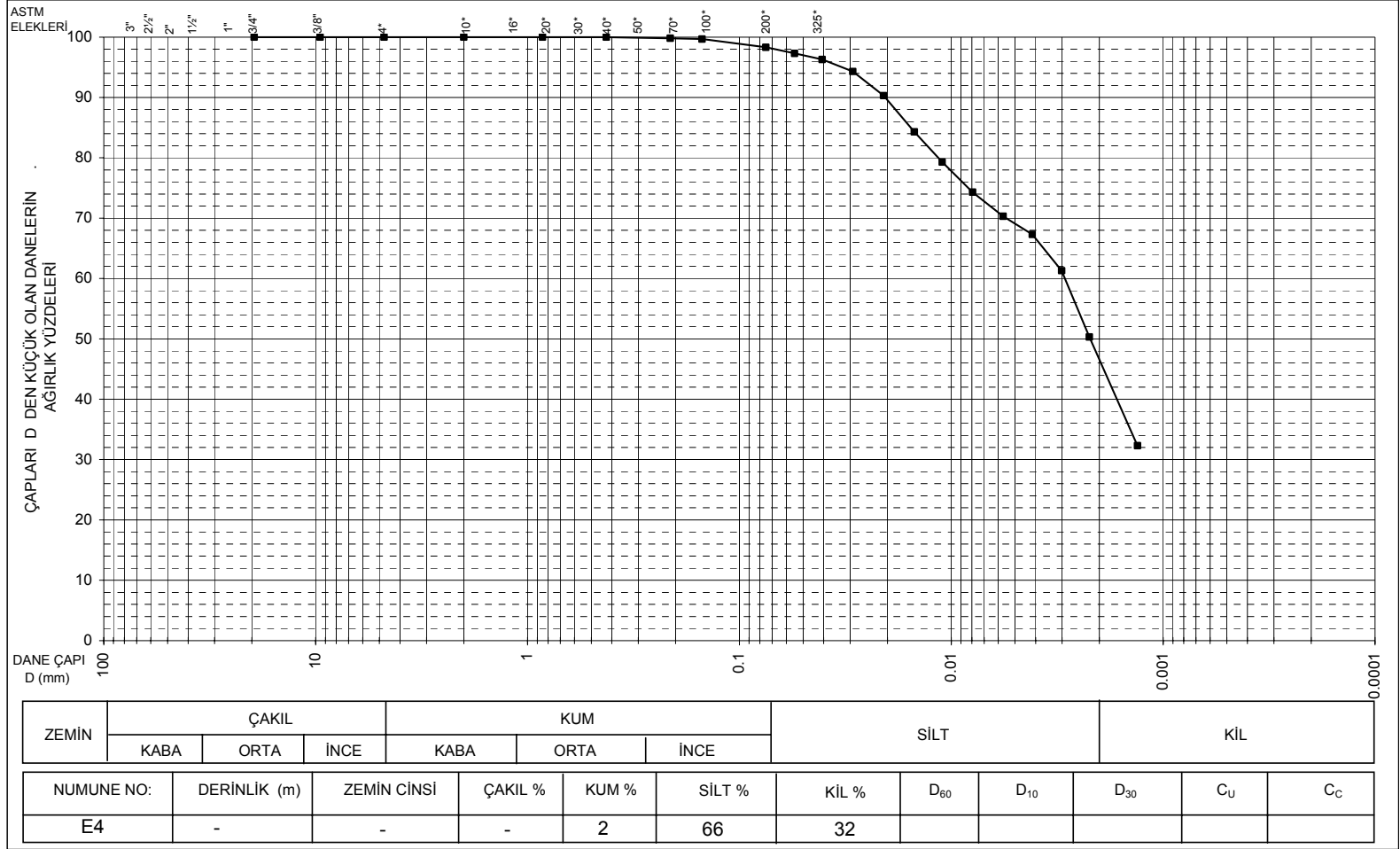
Şekil A.3 : E3 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.7 : E4 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	470.7	100
3/8	9.53	0	470.7	100
4	4.75	0	470.7	100
10	2.00	0	470.7	100
20	0.85	0	470.7	100
40	0.425	0	470.7	100
70	0.212	0.9	469.8	100
100	0.150	0.6	469.2	100
200	0.075	6.4	462.8	98

Çizelge A.8 : E4 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51	52	49.15	8.31	0.075	98.3	98
0.5	50.5	51.5	48.65	8.39	0.052	97.3	97
1	50	51	48.15	8.48	0.037	96.3	96
2	49	50	47.15	8.64	0.027	94.3	94
4	47	48	45.15	8.96	0.019	90.3	90
8	44	45	42.15	9.45	0.014	84.3	84
15	41	42	39.65	9.86	0.010	79.3	79
30	38.5	39.5	37.15	10.26	0.007	74.3	74
60	36.5	37.5	35.15	10.59	0.005	70.3	70
120	35	36	33.65	10.83	0.004	67.3	67
240	32	33	30.65	11.32	0.003	61.3	61
480	26.5	27.5	25.15	12.21	0.002	50.3	50
1440	17.5	18.5	16.15	13.68	0.001	32.3	32



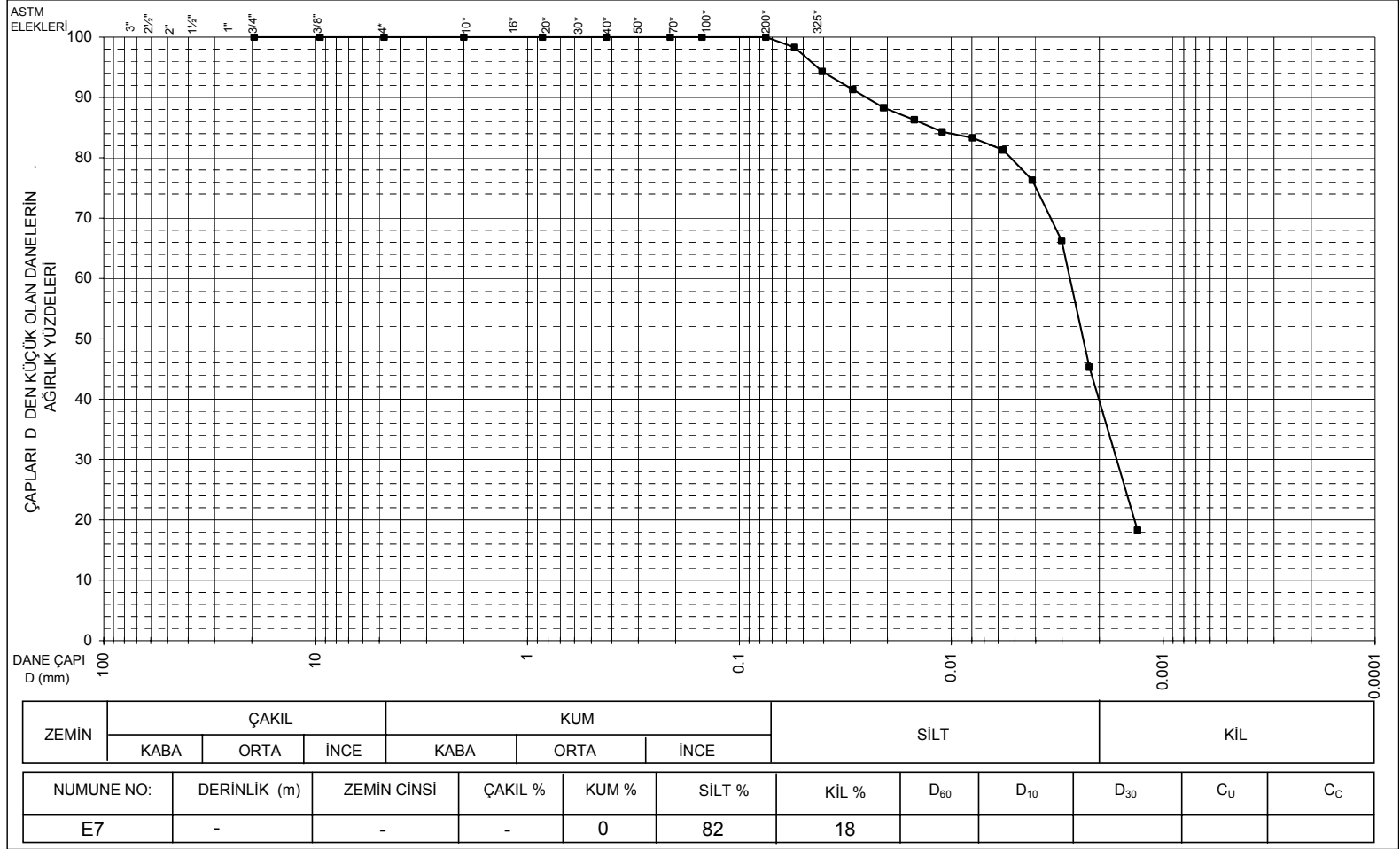
Şekil A.4 : E4 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.9 : E7 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	610.2	100
3/8	9.53	0	610.2	100
4	4.75	0	610.2	100
10	2.00	0	610.2	100
20	0.85	0	610.2	100
40	0.425	0	610.2	100
70	0.212	0	610.2	100
100	0.150	0	610.2	100
200	0.075	0	610.2	100

Çizelge A.9 : E7 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R'_h	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	52	53	50.15	8.15	0.075	100.3	100
0.5	51	52	49.15	8.31	0.055	98.3	98
1	49	50	47.15	8.64	0.039	94.3	94
2	47.5	49	45.65	8.88	0.028	91.3	91
4	46	47	44.15	9.13	0.020	88.3	88
8	45	46	43.15	9.29	0.014	86.3	86
15	44	45	42.15	9.45	0.011	84.3	84
30	43.5	45	41.65	9.53	0.008	83.3	83
60	42.5	44	40.65	9.69	0.005	81.3	81
120	40	41	38.15	10.10	0.004	76.3	76
240	35	36	33.15	10.91	0.003	66.3	66
480	24.5	26	22.65	12.62	0.002	45.3	45
1440	11	12	9.15	14.81	0.001	18.3	18



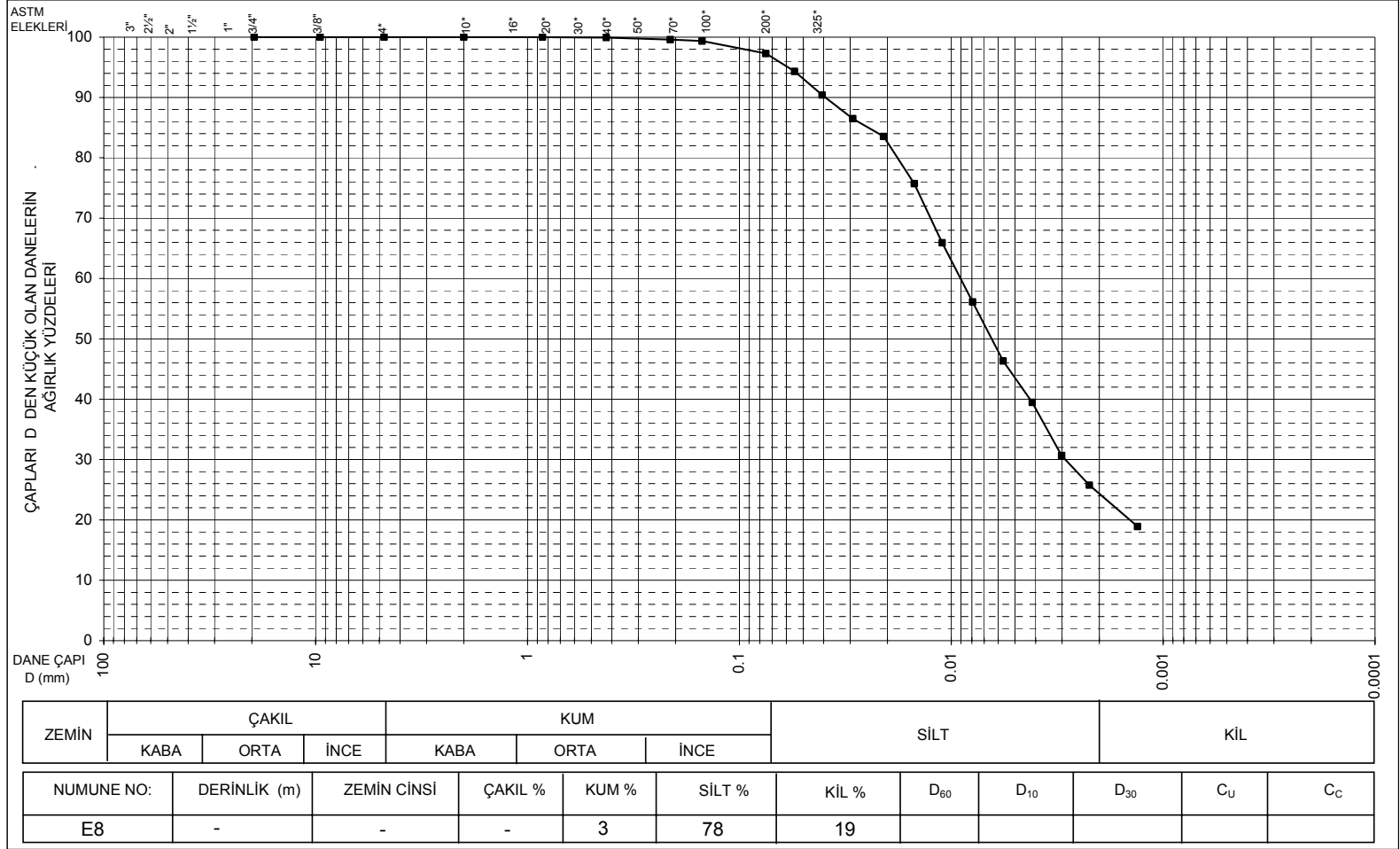
Şekil A.5 : E7 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.11 : E8 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	ElekÜstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	583.2	100
3/8	9.53	0	583.2	100
4	4.75	0	583.2	100
10	2.00	0	583.2	100
20	0.85	0	583.2	100
40	0.425	0.5	582.7	100
70	0.212	1.9	580.8	100
100	0.150	1.4	579.4	99
200	0.075	12	567.4	97

Çizelge A.12 : E8 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R'_h	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51.5	52.5	49.65	8.23	0.075	99.3	97
0.5	50	51.0	48.15	8.48	0.055	96.3	94
1	48	49.0	46.15	8.80	0.040	92.3	90
2	46	47.0	44.15	9.13	0.029	88.3	86
4	44	45.0	42.65	9.37	0.021	85.3	84
8	40	41.0	38.65	10.02	0.015	77.3	76
15	35	36.0	33.65	10.83	0.011	67.3	66
30	30	31.0	28.65	11.64	0.008	57.3	56
60	25	26.0	23.65	12.46	0.006	47.3	46
120	21.5	22.5	20.15	13.03	0.004	40.3	39
240	17	18.0	15.65	13.76	0.003	31.3	31
480	14.5	15.5	13.15	14.16	0.0023	26.3	26
1440	11	12.0	9.65	14.73	0.001	19.3	19



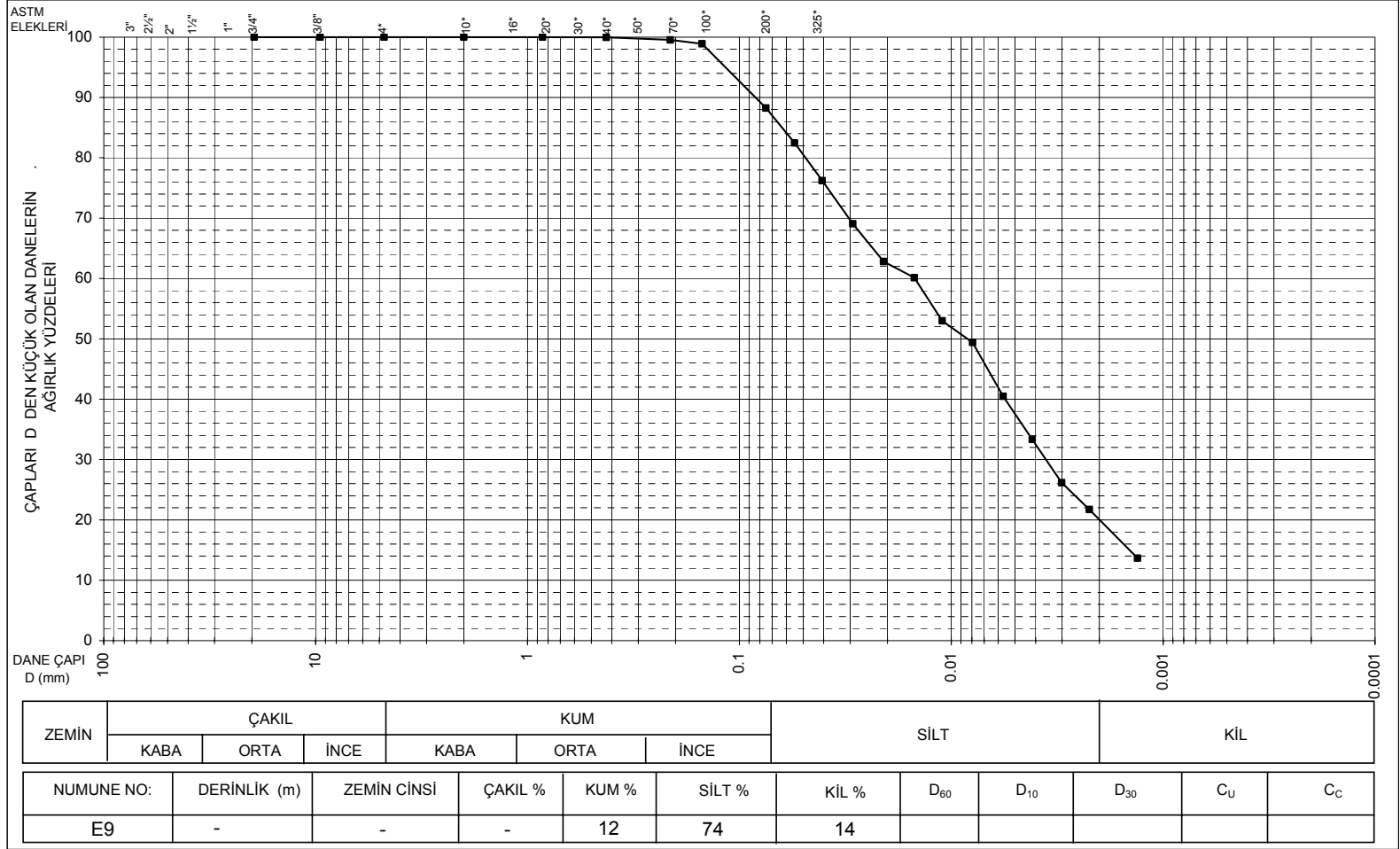
Şekil A.6 : E8 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.13 : E9 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	ElekÜstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	598.4	100
3/8	9.53	0	598.4	100
4	4.75	0	598.4	100
10	2.00	0	598.4	100
20	0.85	0	598.4	100
40	0.425	0.2	598.2	100
70	0.212	2.6	595.6	100
100	0.150	3.8	591.8	99
200	0.075	63.7	528.1	88

Çizelge A.14 : E9 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	50.5	51.5	49.15	8.31	0.075	98.3	88
0.5	47.5	48.5	46.15	8.80	0.056	92.3	82
1	44	45	42.65	9.37	0.041	85.3	76
2	40	41	38.65	10.02	0.030	77.3	69
4	36.5	37.5	35.15	10.59	0.022	70.3	63
8	35	36	33.65	10.83	0.016	67.3	60
15	31	32	29.65	11.48	0.012	59.3	53
30	29	30	27.65	11.81	0.008	55.3	49
60	24	25	22.65	12.62	0.006	45.3	40
120	20	21	18.65	13.27	0.004	37.3	33
240	16	17	14.65	13.92	0.003	29.3	26
480	13.5	14.5	12.15	14.33	0.002	24.3	22
1440	9	10	7.65	15.06	0.001	15.3	14



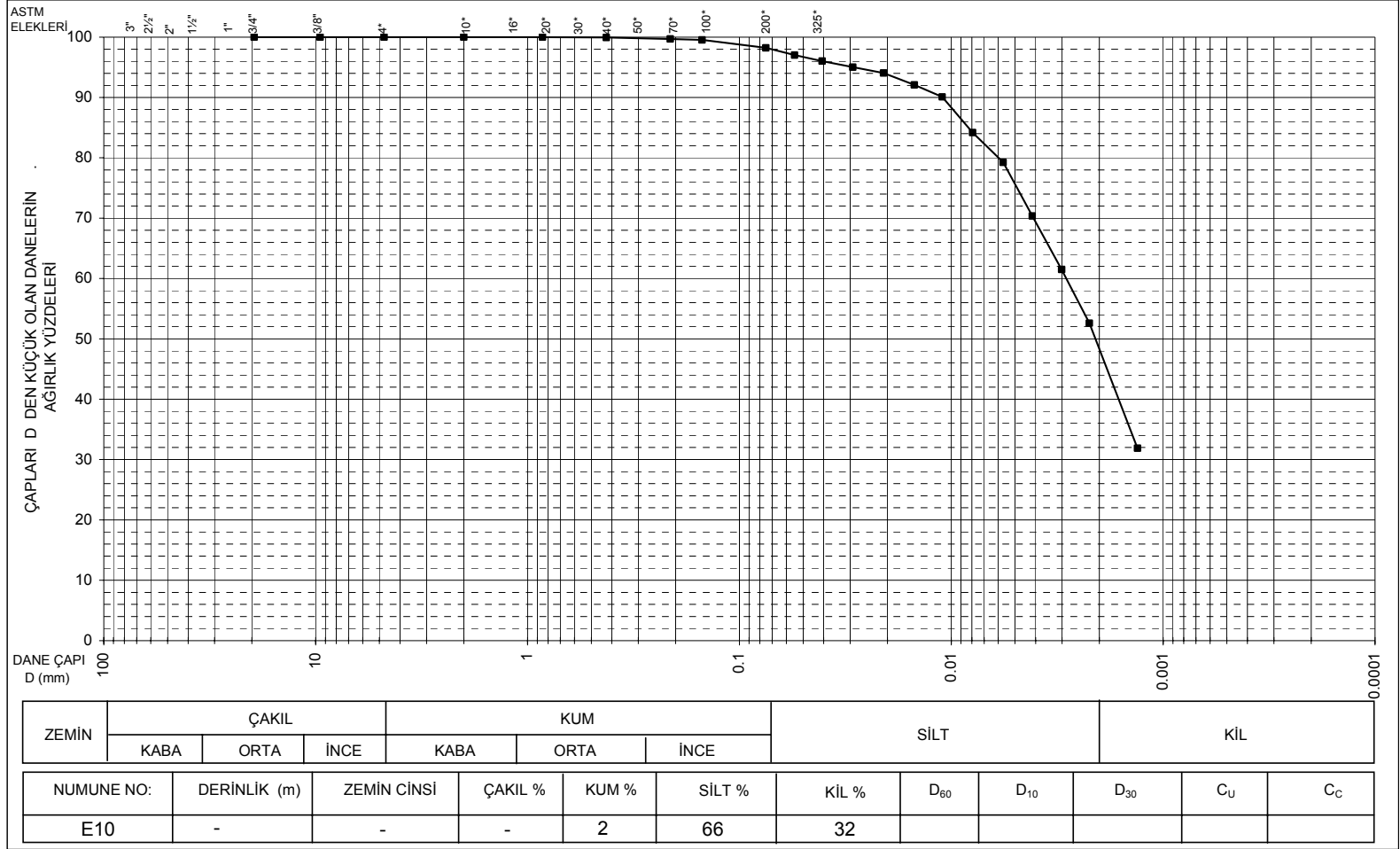
Şekil A.7 : E9 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.15 : E10 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	ElekÜstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	564.2	100
3/8	9.53	0	564.2	100
4	4.75	0	564.2	100
10	2.00	0	564.2	100
20	0.85	0	564.2	100
40	0.425	0.3	563.9	100
70	0.212	1.4	562.5	100
100	0.150	0.9	561.6	100
200	0.075	7.4	554.2	98

Çizelge A.16 : E10 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51.5	52.5	49.65	8.23	0.075	99.3	98
0.5	51	52	49.15	8.31	0.055	98.3	97
1	50.5	51.5	48.65	8.39	0.039	97.3	96
2	50	51	48.15	8.48	0.028	96.3	95
4	49	50	47.65	8.56	0.020	95.3	94
8	48	49	46.65	8.72	0.014	93.3	92
15	47	48	45.65	8.88	0.010	91.3	90
30	44	45	42.65	9.37	0.007	85.3	84
60	41.5	42.5	40.15	9.78	0.005	80.3	79
120	37	38	35.65	10.51	0.004	71.3	70
240	32.5	33.5	31.15	11.24	0.003	62.3	61
480	28	29	26.65	11.97	0.0021	53.3	53
1440	17.5	18.5	16.15	13.68	0.001	32.3	32



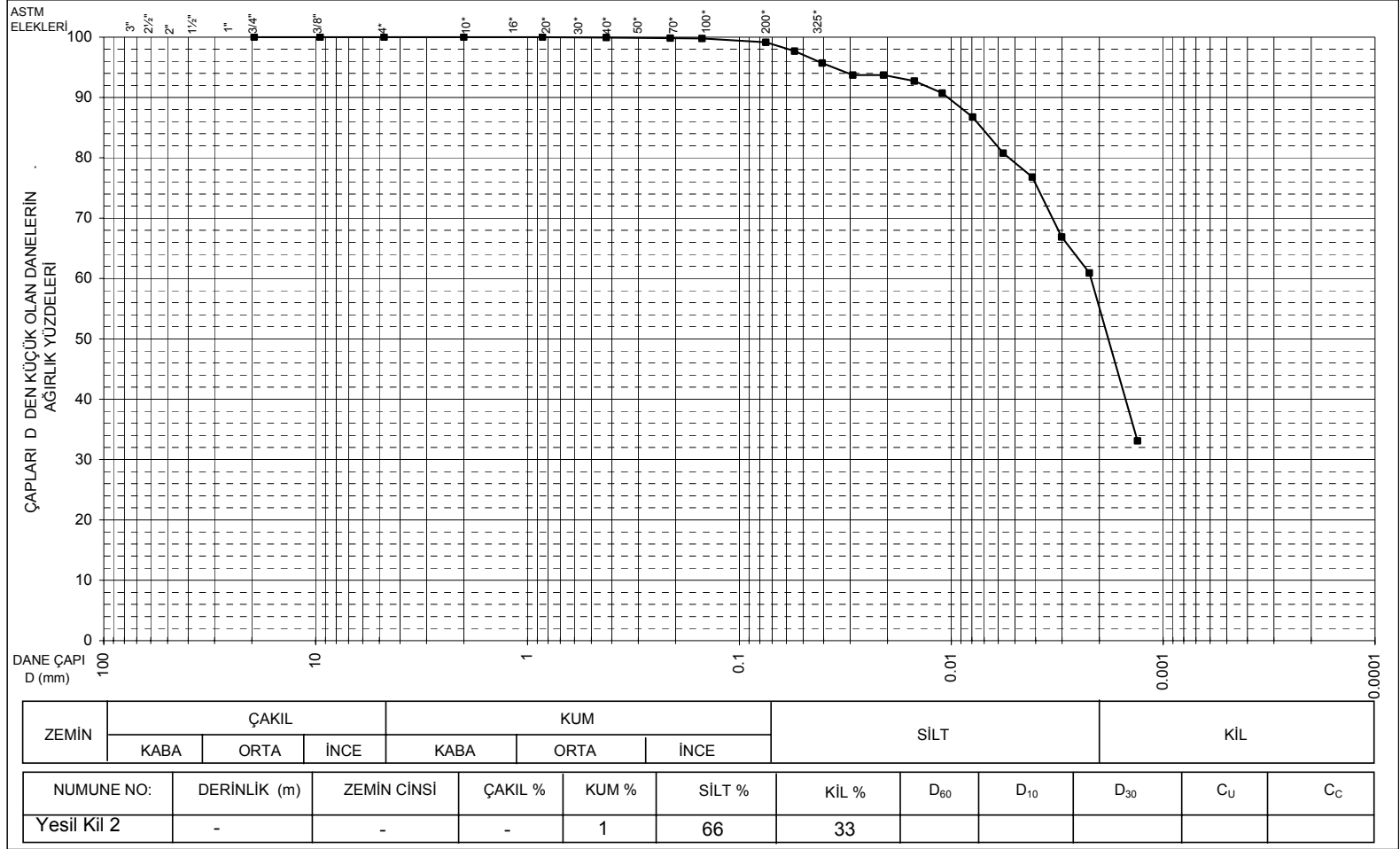
Şekil A.8 : E10 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.17 : E11 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	ElekÜstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	637.5	100
3/8	9.53	0	637.5	100
4	4.75	0	637.5	100
10	2.00	0	637.5	100
20	0.85	0	637.5	100
40	0.425	0.5	637	100
70	0.212	0.6	636.4	100
100	0.150	0.4	636	100
200	0.075	4	632	99

Çizelge A.18 : E11 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51.5	52.5	49.65	8.23	0.075	99.3	99
0.5	51	52	49.15	8.31	0.055	98.3	98
1	50	51	48.15	8.48	0.039	96.3	96
2	49	50	47.15	8.64	0.028	94.3	94
4	48.5	49.5	47.15	8.64	0.020	94.3	94
8	48	49	46.65	8.72	0.014	93.3	93
15	47	48	45.65	8.88	0.010	91.3	91
30	45	46	43.65	9.21	0.007	87.3	87
60	42	43	40.65	9.69	0.005	81.3	81
120	40	41	38.65	10.02	0.004	77.3	77
240	35	36	33.65	10.83	0.003	67.3	67
480	32	33	30.65	11.32	0.0021	61.3	61
1440	18	19	16.65	13.59	0.001	33.3	33



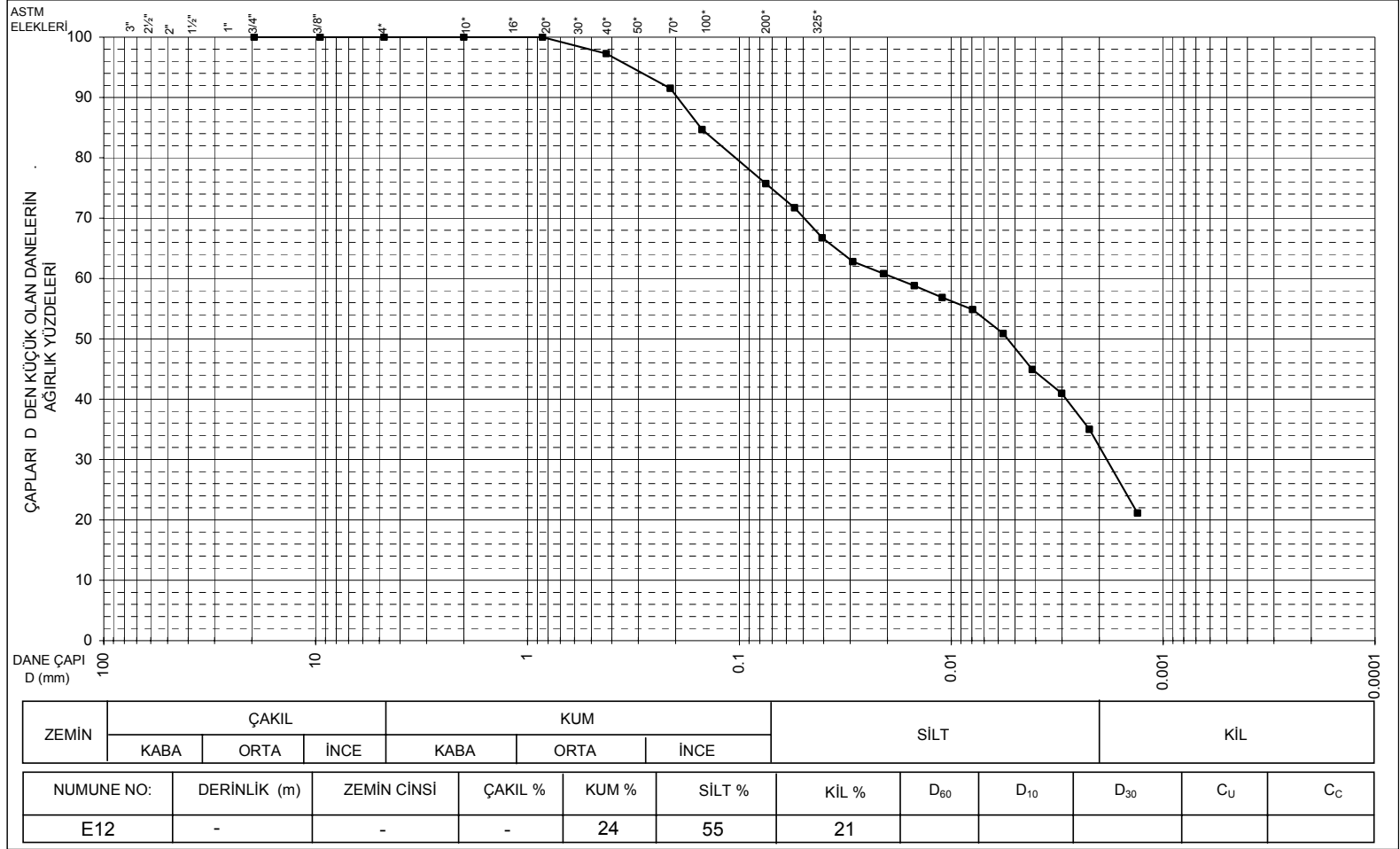
Şekil A.9 : E11 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.19 : E12 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	ElekÜstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	495.4	100
3/8	9.53	0	495.4	100
4	4.75	0	495.4	100
10	2.00	0	495.4	100
20	0.85	0	495.4	100
40	0.425	13.5	481.9	97
70	0.212	28.6	453.3	92
100	0.150	33.8	419.5	85
200	0.075	44.4	375.1	76

Çizelge A.20 : E12 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	40	41	38.15	10.10	0.075	76.3	76
0.5	38	39	36.15	10.43	0.061	72.3	72
1	35.5	36.5	33.65	10.83	0.044	67.3	67
2	33.5	34.5	31.65	11.16	0.032	63.3	63
4	32	33	30.65	11.32	0.023	61.3	61
8	31	32	29.65	11.48	0.016	59.3	59
15	30	31	28.65	11.64	0.012	57.3	57
30	29	30	27.65	11.81	0.008	55.3	55
60	27	28	25.65	12.13	0.006	51.3	51
120	24	25	22.65	12.62	0.004	45.3	45
240	22	23	20.65	12.94	0.003	41.3	41
480	19	20	17.65	13.43	0.0022	35.3	35
1440	12	13	10.65	14.57	0.001	21.3	21



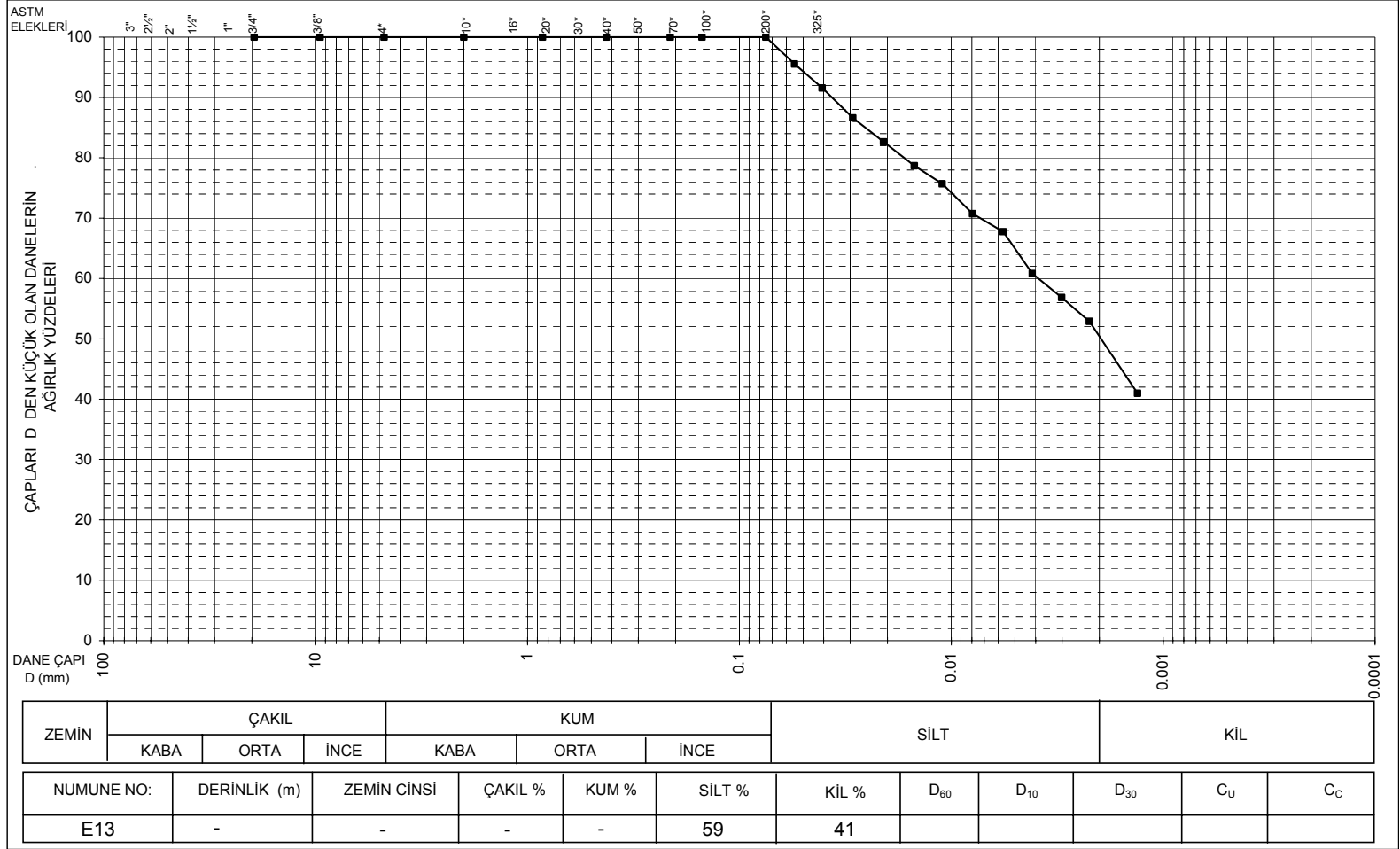
Şekil A.10 : E12 numunesi dane çapı dağılımı eğrisi

Çizelge A.21 : E13 numunesi elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	ElekÜstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
3/4	19.50	0	508.6	100
3/8	9.53	0	508.6	100
4	4.75	0	508.6	100
10	2.00	0	508.6	100
20	0.85	0	508.6	100
40	0.425	0	508.6	100
70	0.212	0	508.6	100
100	0.150	0	508.6	100
200	0.075	0	508.6	100

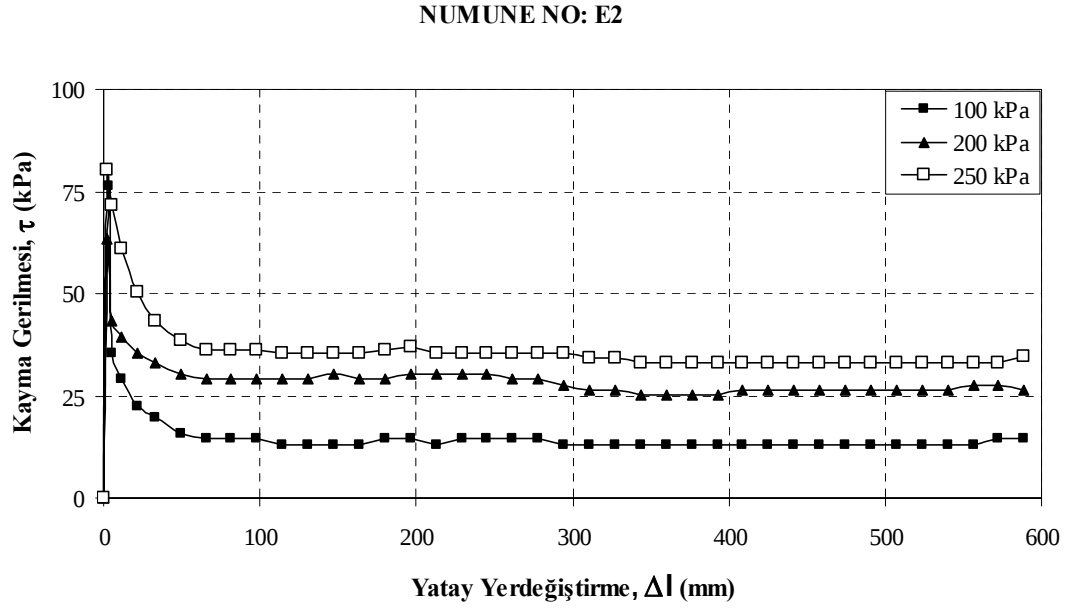
Çizelge A.22 : E13 numunesi hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{hl} (mm)	$R_h = R_{hl} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	52	53	50.15	8.15	0.075	100.3	100
0.5	50	51	48.15	8.48	0.055	96.3	96
1	48	49	46.15	8.80	0.040	92.3	92
2	45.5	46.5	43.65	9.21	0.029	87.3	87
4	43	44	41.65	9.53	0.021	83.3	83
8	41	42	39.65	9.86	0.015	79.3	79
15	39.5	40.5	38.15	10.10	0.011	76.3	76
30	37	38	35.65	10.51	0.008	71.3	71
60	35.5	36.5	34.15	10.75	0.006	68.3	68
120	32	33	30.65	11.32	0.004	61.3	61
240	30	31	28.65	11.64	0.003	57.3	57
480	28	29	26.65	11.97	0.0021	53.3	53
1440	22	23	20.65	12.94	0.001	41.3	41

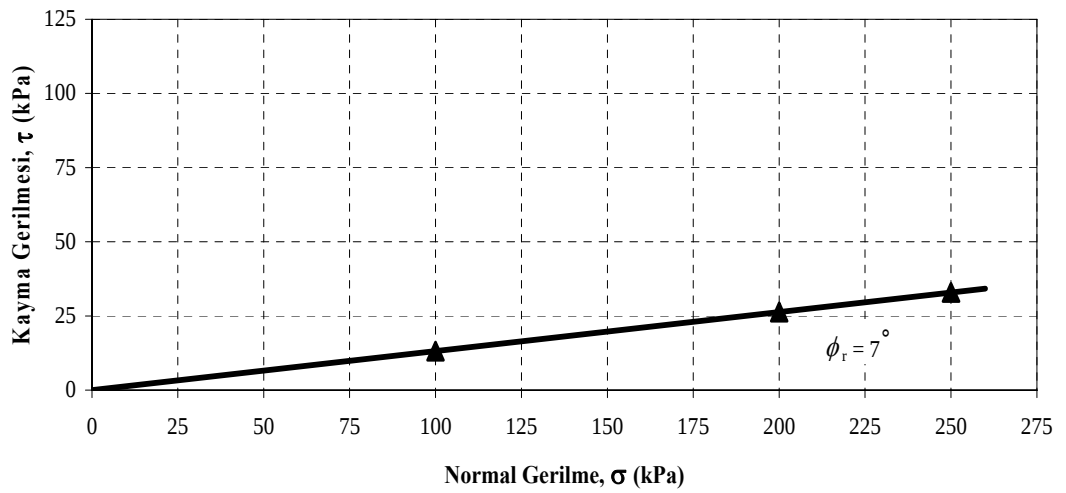


Şekil A.11 : E13 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

EK B

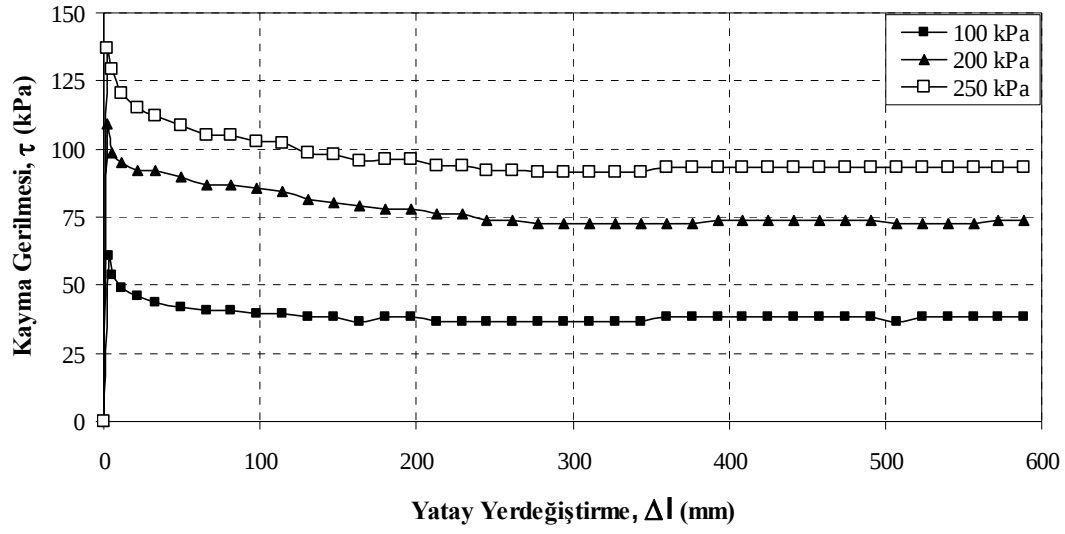


Şekil B.1 : E2 numunesi halka kesme deney sonucu

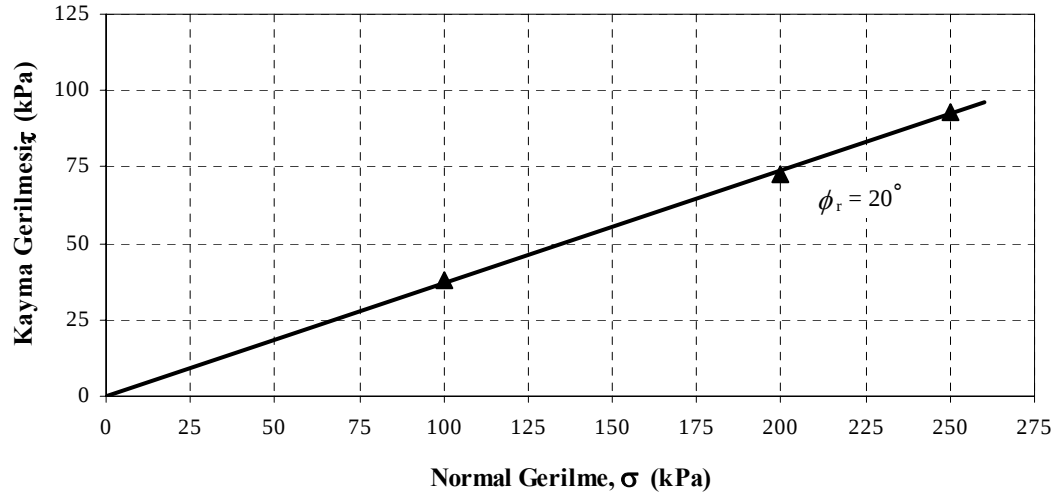


Şekil B.2 : E2 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E3

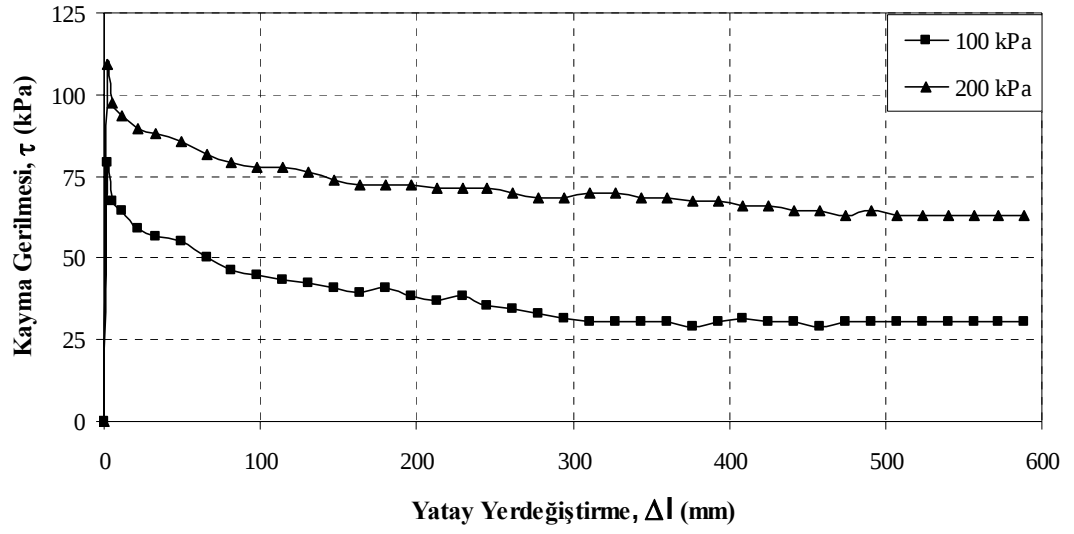


Şekil B.3 : E3 numunesi halka kesme deney sonucu

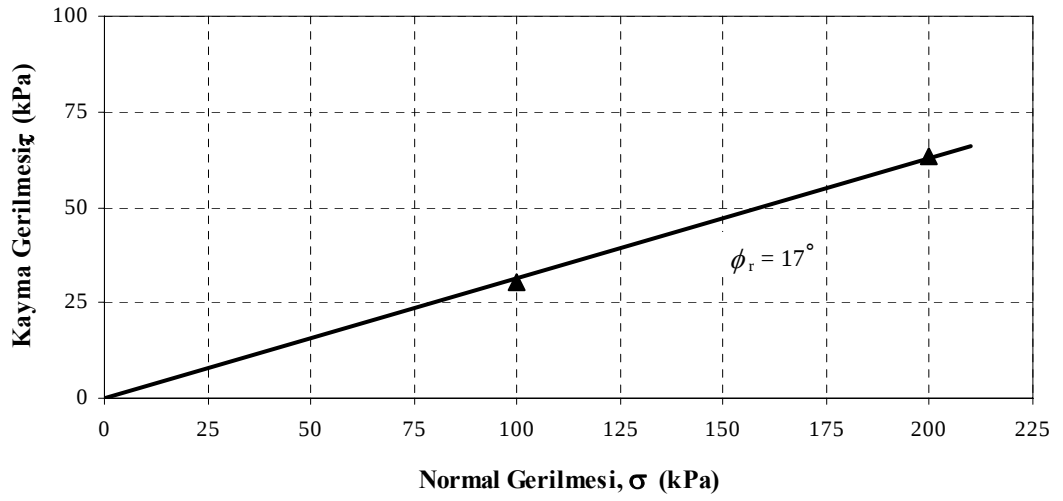


Şekil B.4 : E3 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E4

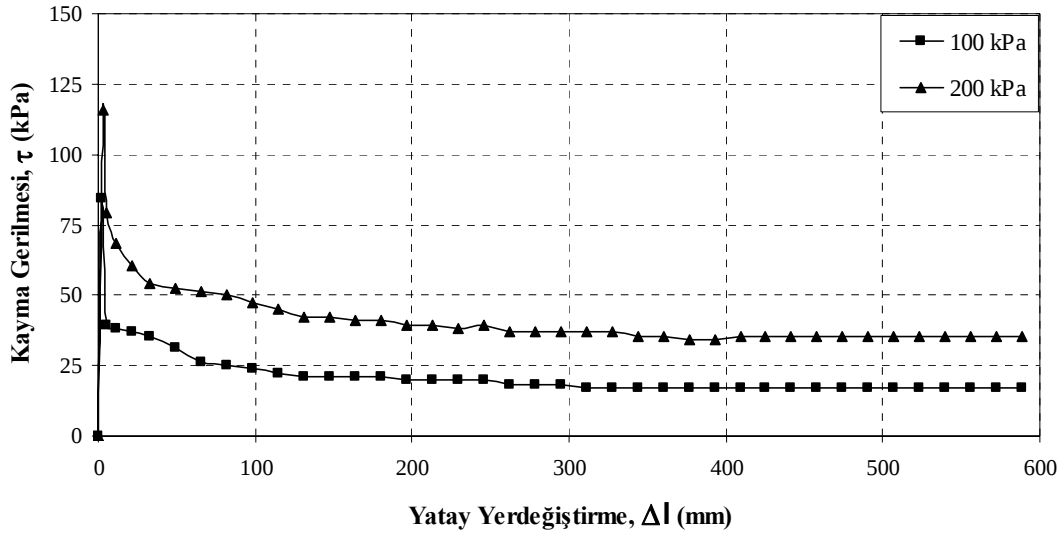


Şekil B.5 : E4 numunesi halka kesme deney sonucu

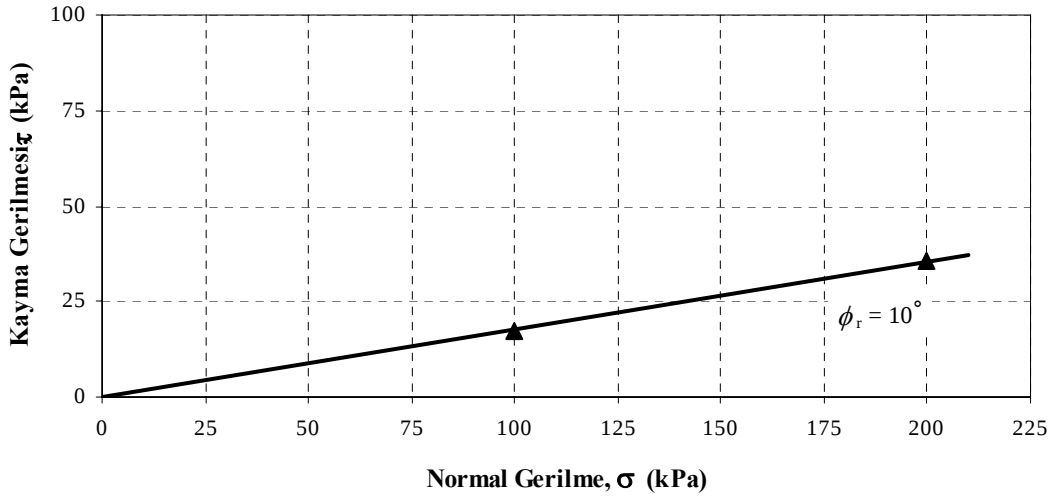


Şekil B.6 : E4 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E5

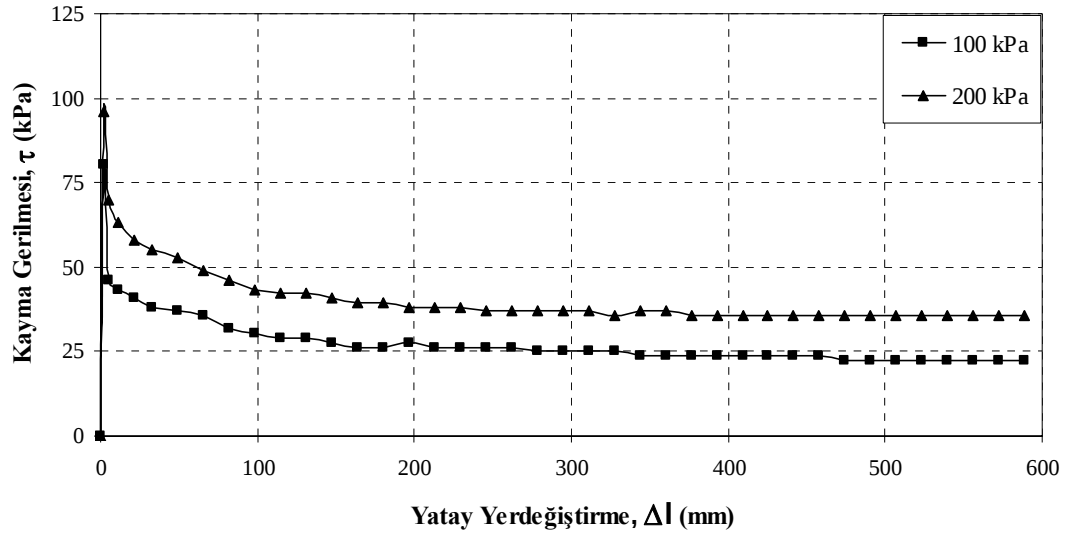


Şekil B.7 : E5 numunesi halka kesme deney sonucu

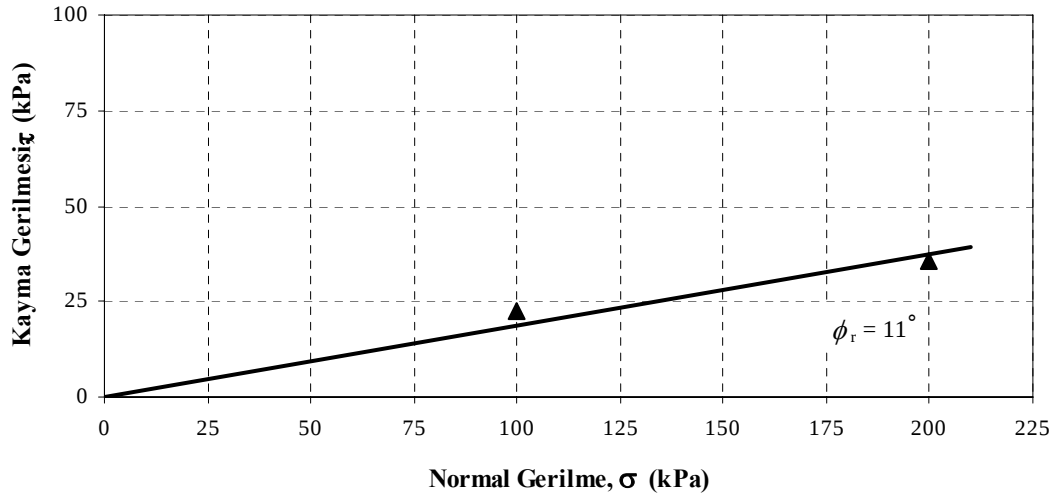


Şekil B.8 : E5 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E6

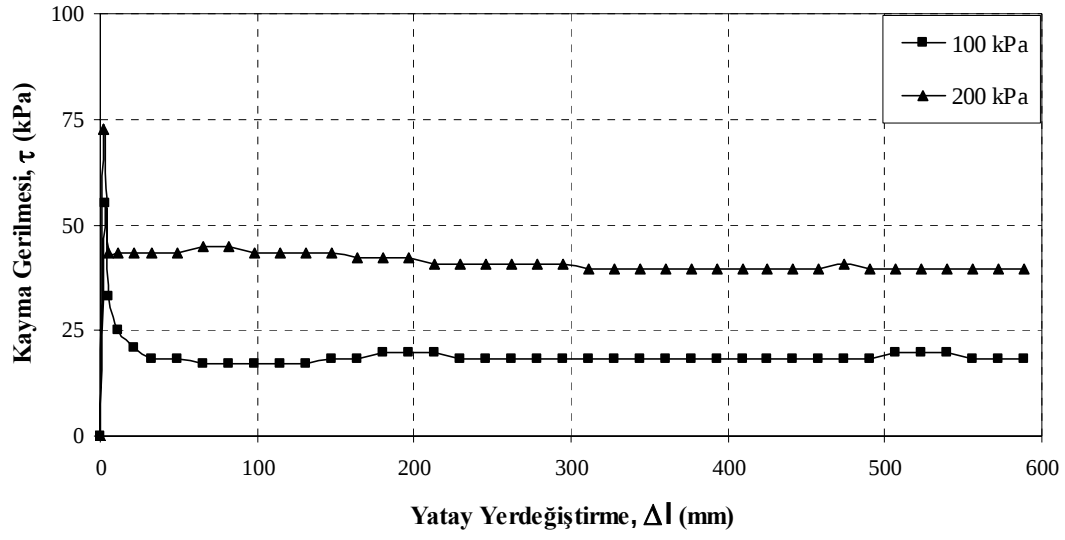


Şekil B.9 : E6 numunesi halka kesme deney sonucu

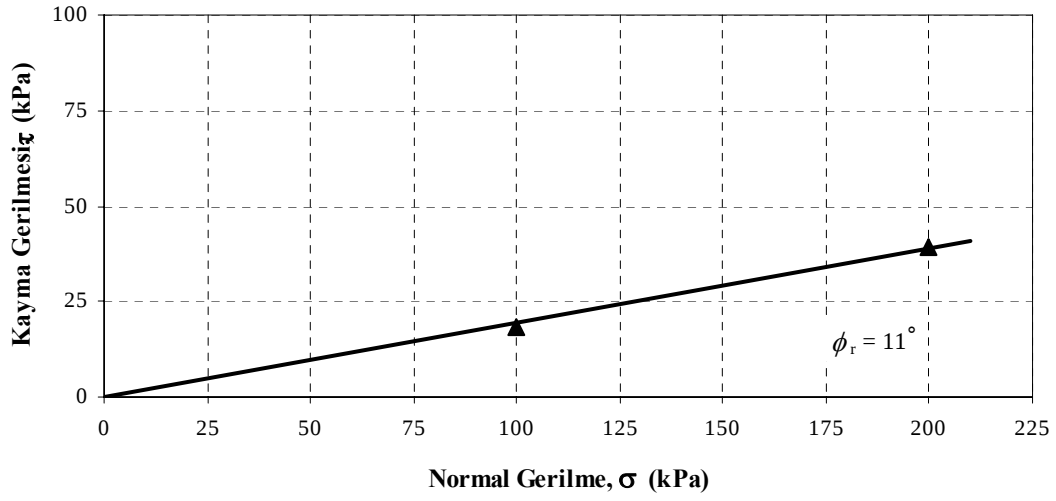


Şekil B.10 : E6 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E7

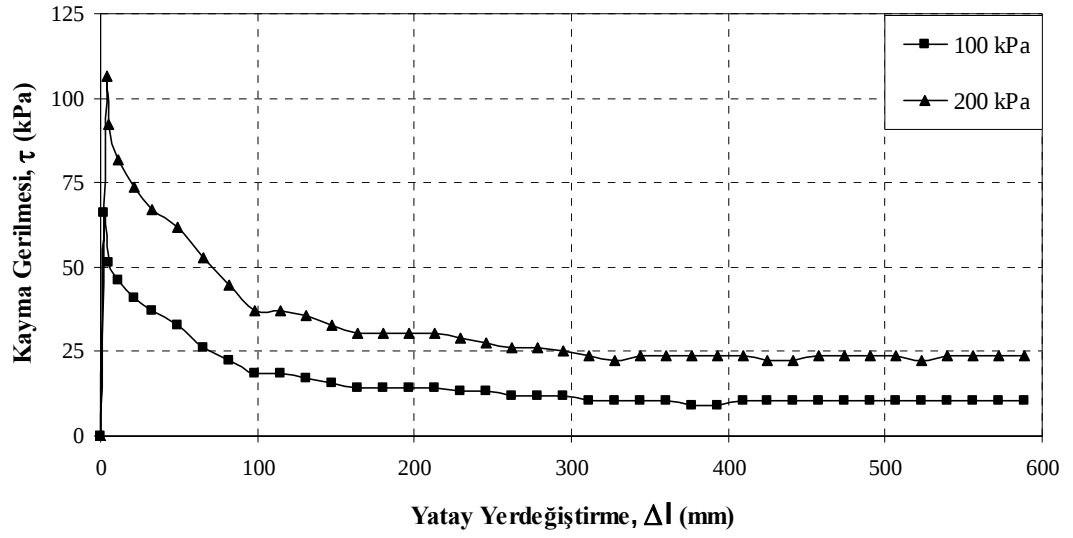


Şekil B.11 : E7 numunesi halka kesme deney sonucu

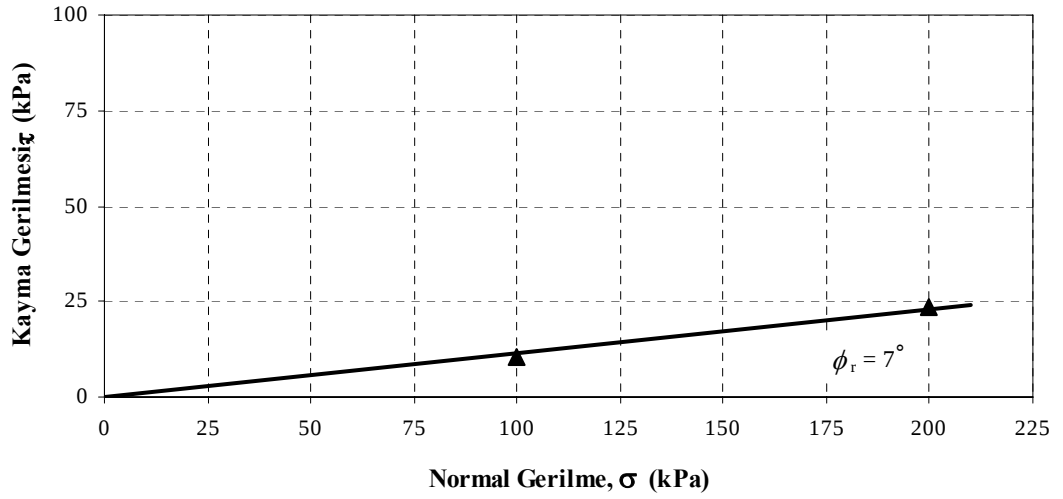


Şekil B.12 : E7 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E8

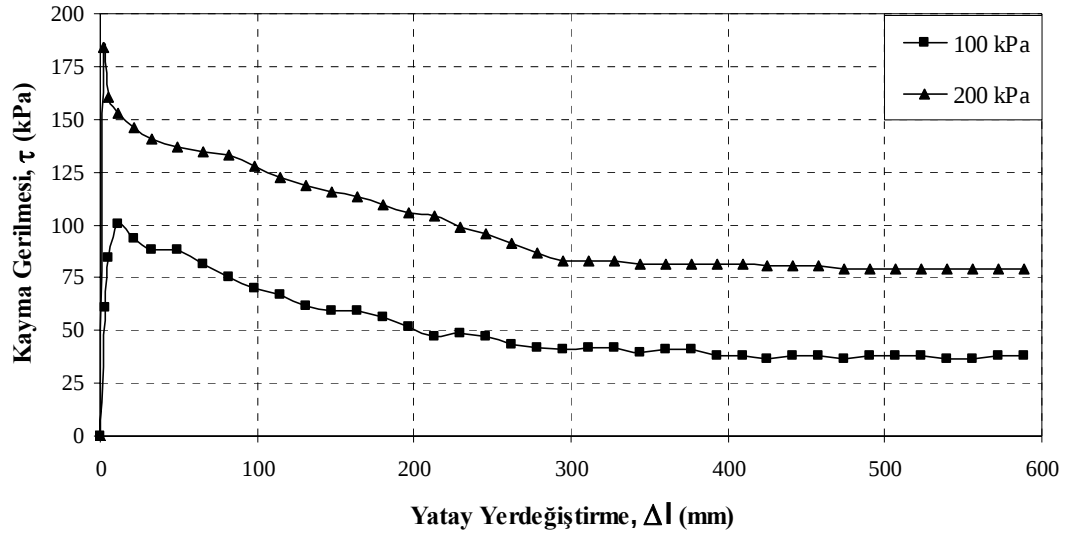


Şekil B.13 : E8 numunesi halka kesme deney sonucu

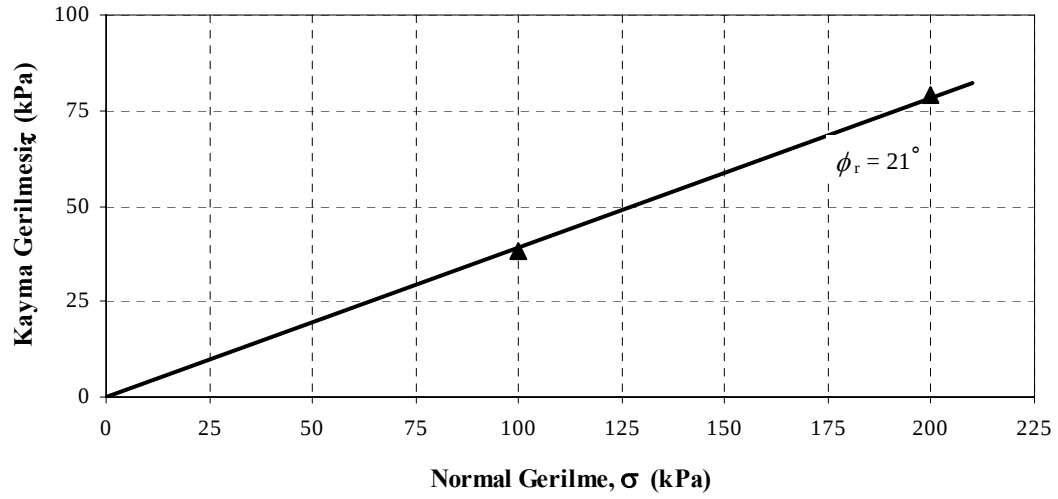


Şekil B.14 : E8 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E9

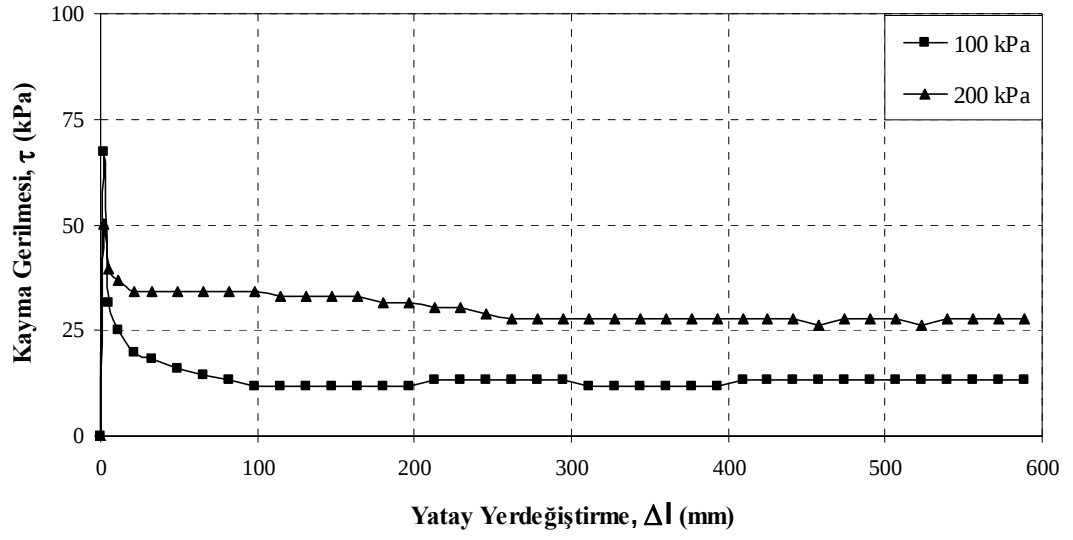


Şekil B.15 : E9 numunesi halka kesme deney sonucu

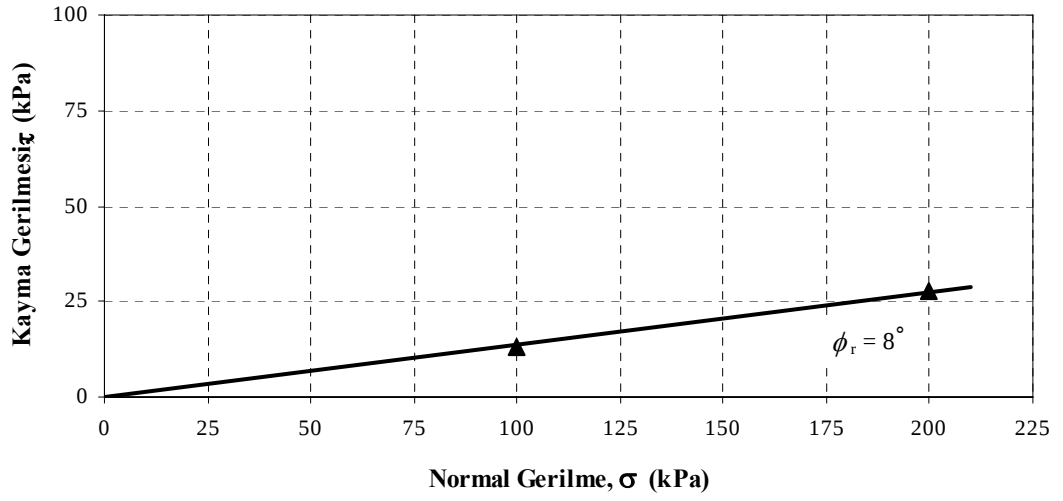


Şekil B.16 : E9 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E10

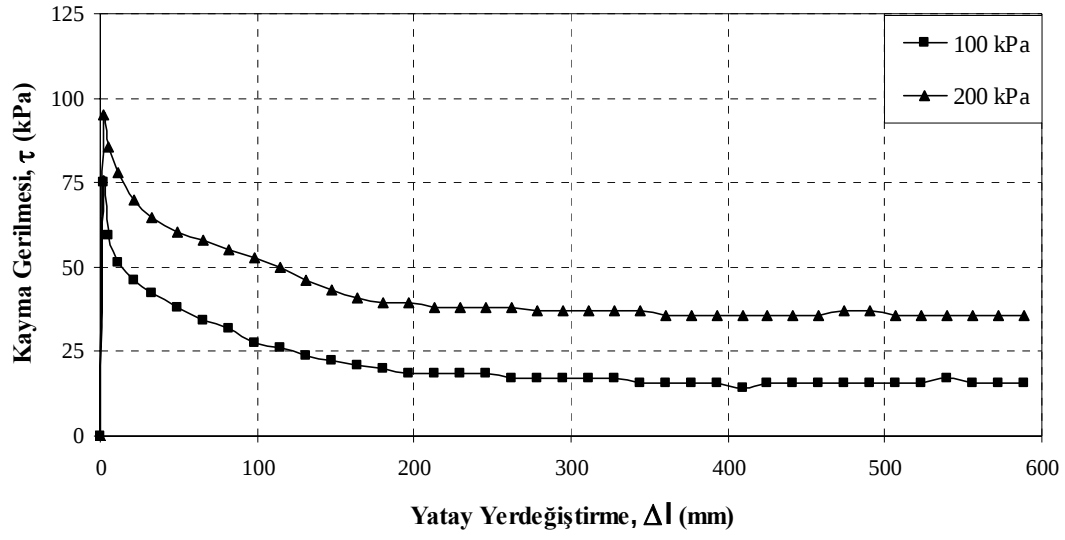


Şekil B.17 : E10 numunesi halka kesme deney sonucu

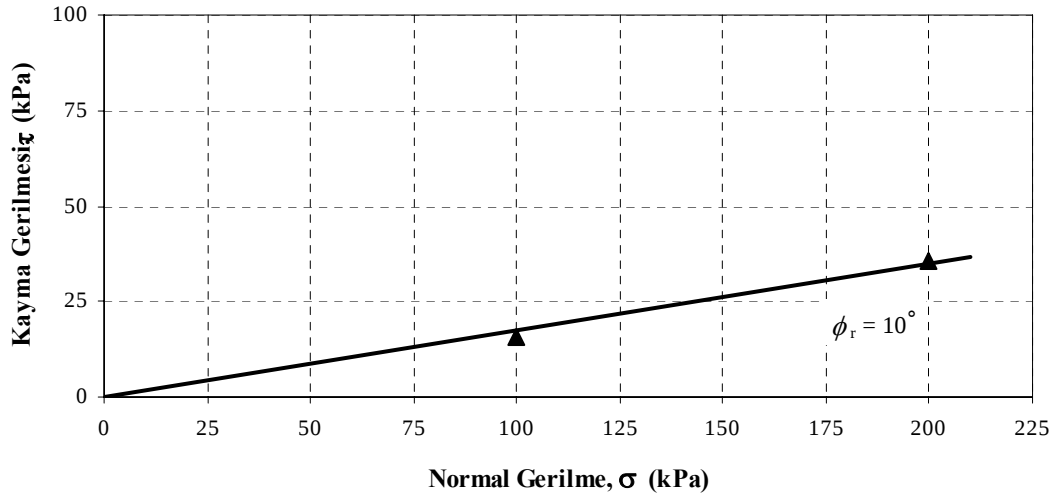


Şekil B.18 : E10 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E11

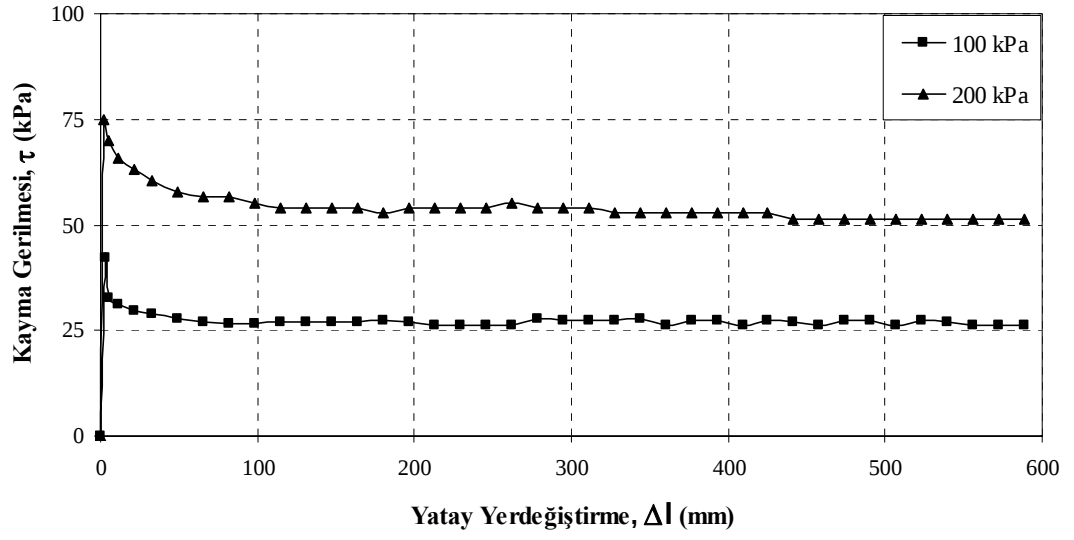


Şekil B.19 : E11 numunesi halka kesme deney sonucu

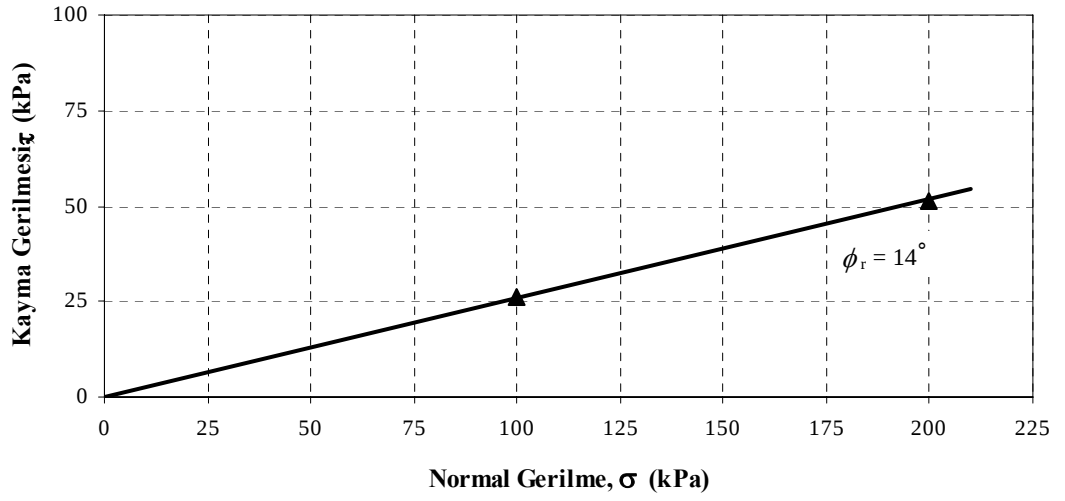


Şekil B.20 : E11 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E12

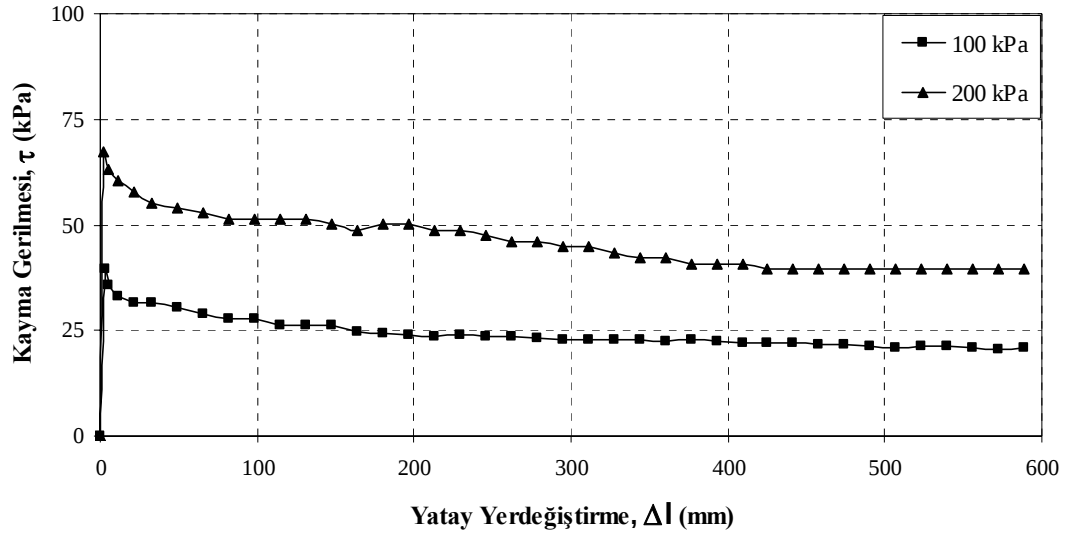


Şekil B.21 : E12 numunesi halka kesme deney sonucu

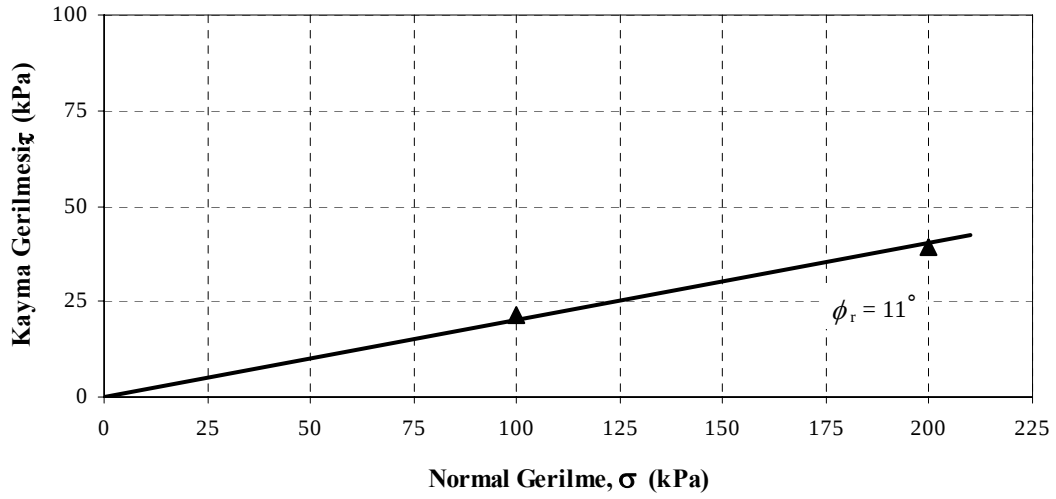


Şekil B.22 : E12 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E13

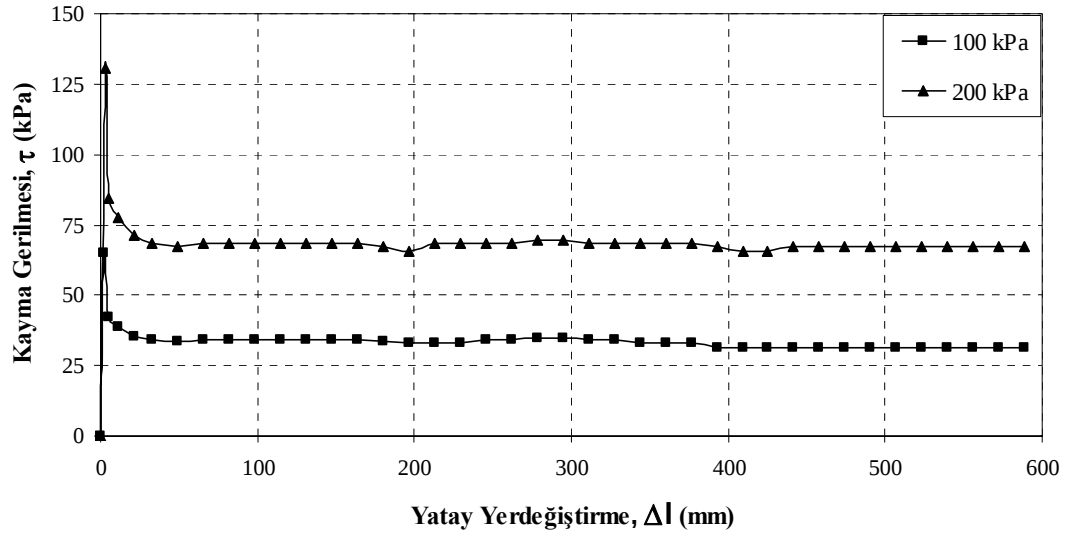


Şekil B.23 : E13 numunesi halka kesme deney sonucu

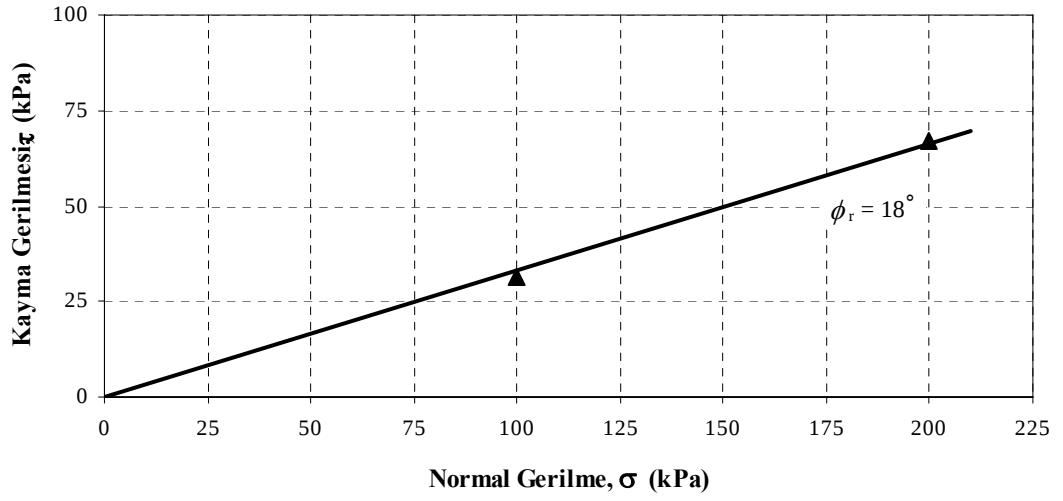


Şekil B.24 : E13 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E14

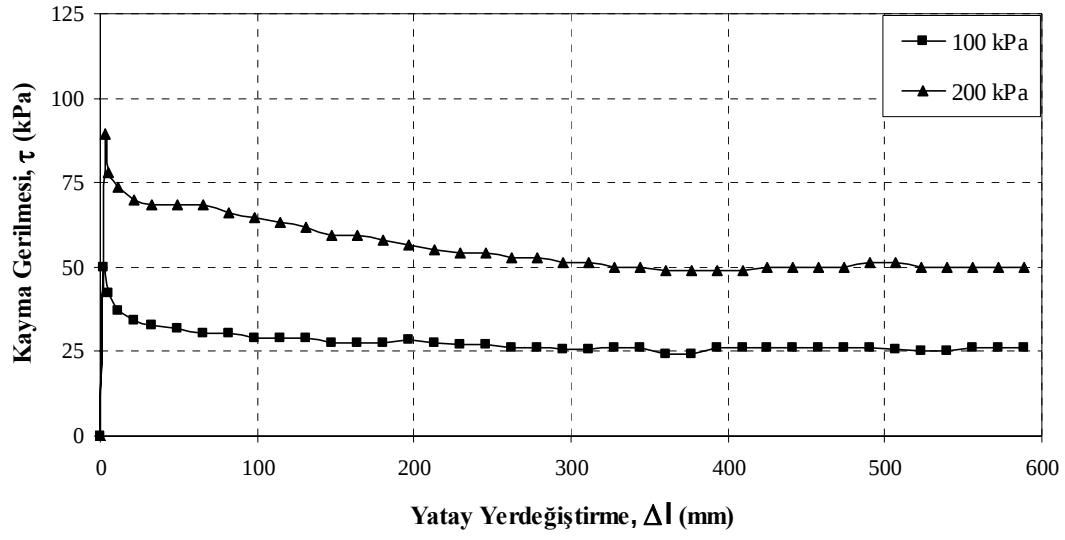


şekil B.25 : E14 numunesi halka kesme deney sonucu

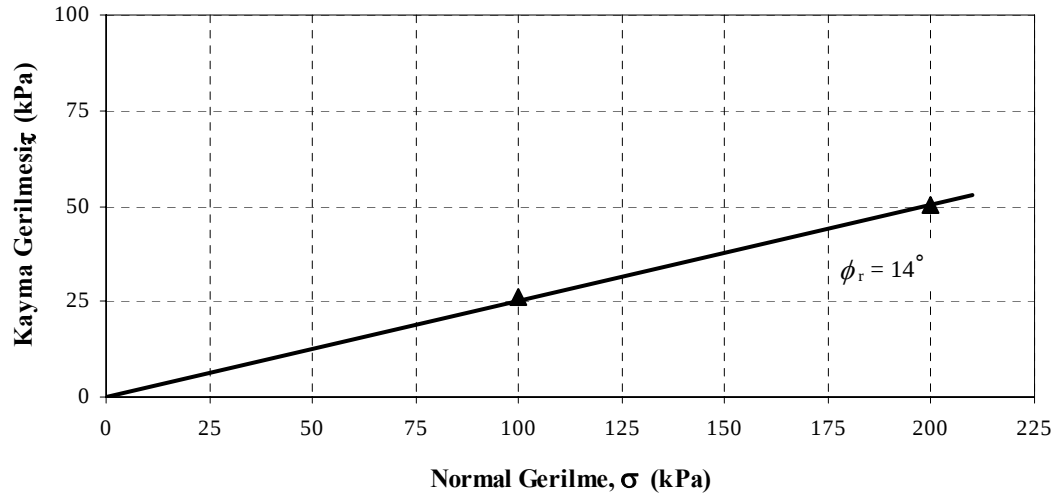


şekil B.26 : E14 numunesi kalıcı göçme zarfı

NUMUNE NO: E15



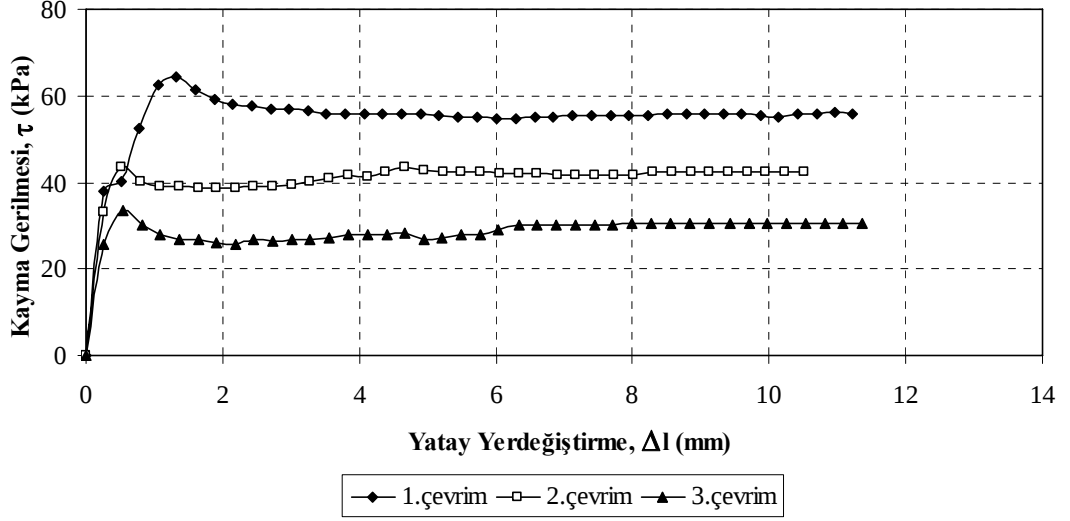
Şekil B.27 : E15 numunesi halka kesme deney sonucu



Şekil B.28 : E15 numunesi kalıcı göçme zarfı

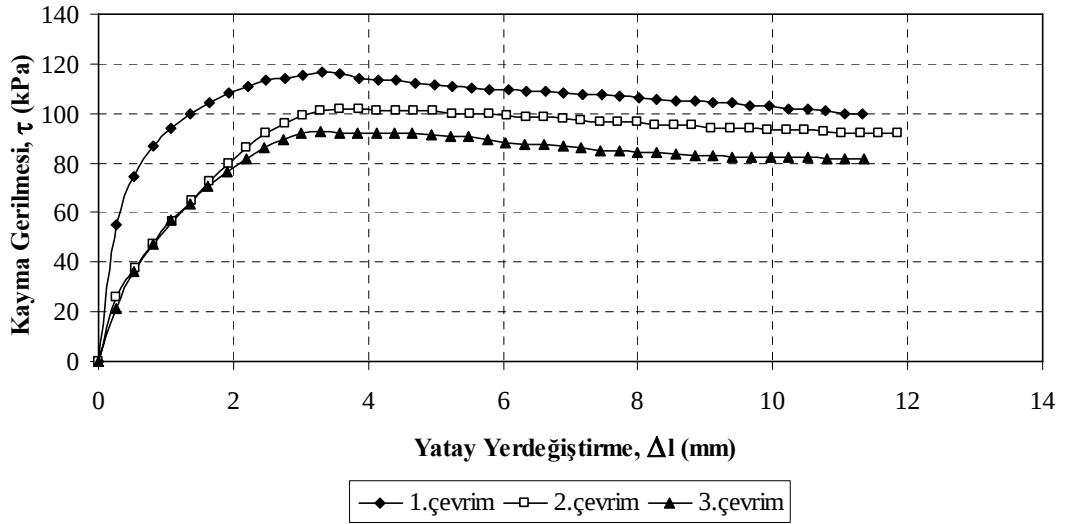
EK C

Numune No: E4, $\sigma=100$ kPa

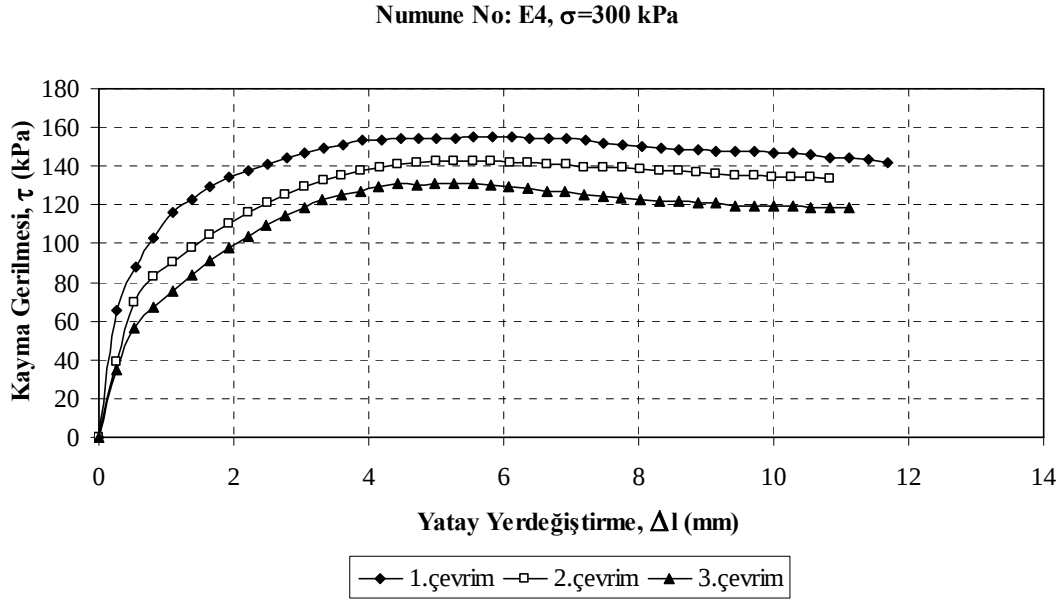


Şekil C.1 : E4 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa

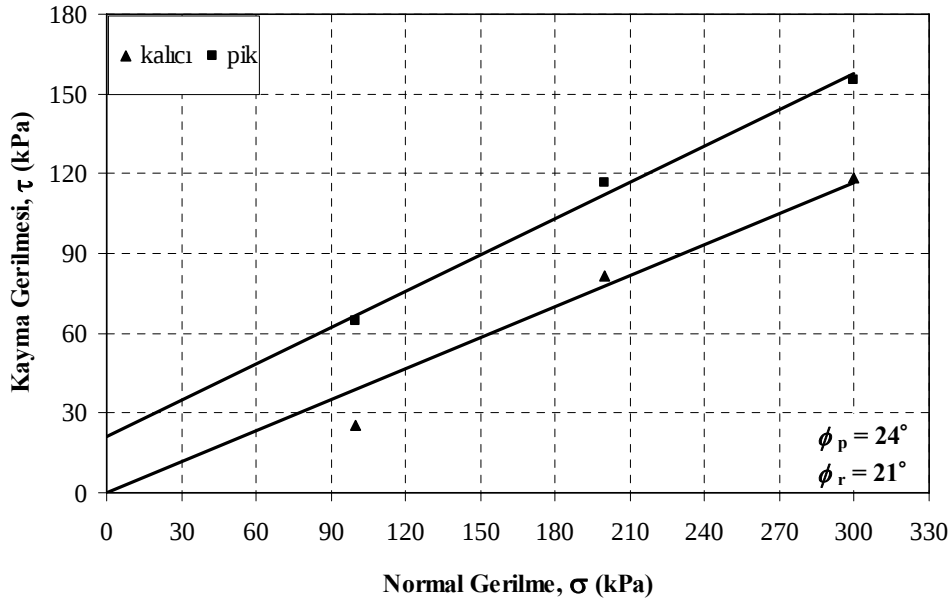
Numune No: E4, $\sigma=200$ kPa



Şekil C.2 : E4 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa

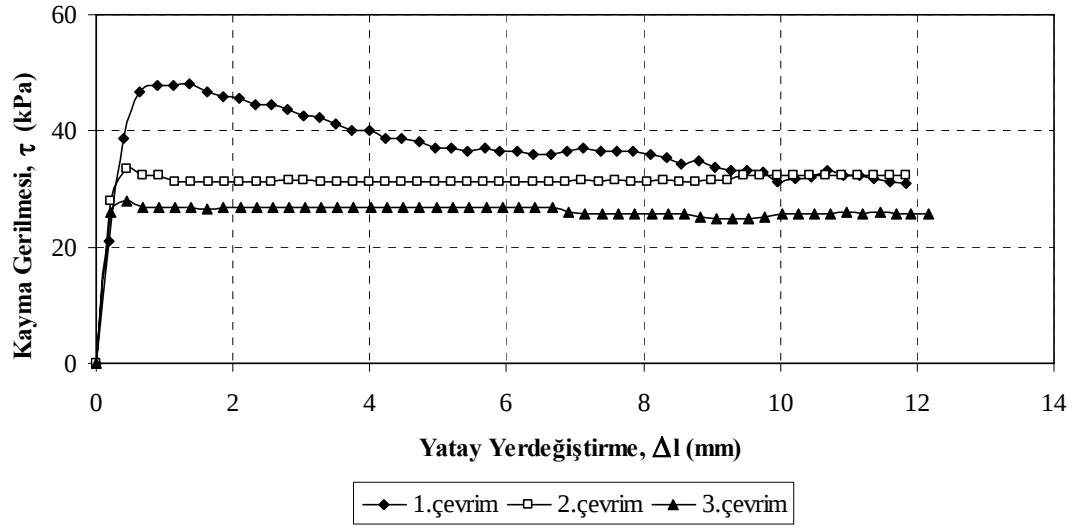


Şekil C.3 : E4 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



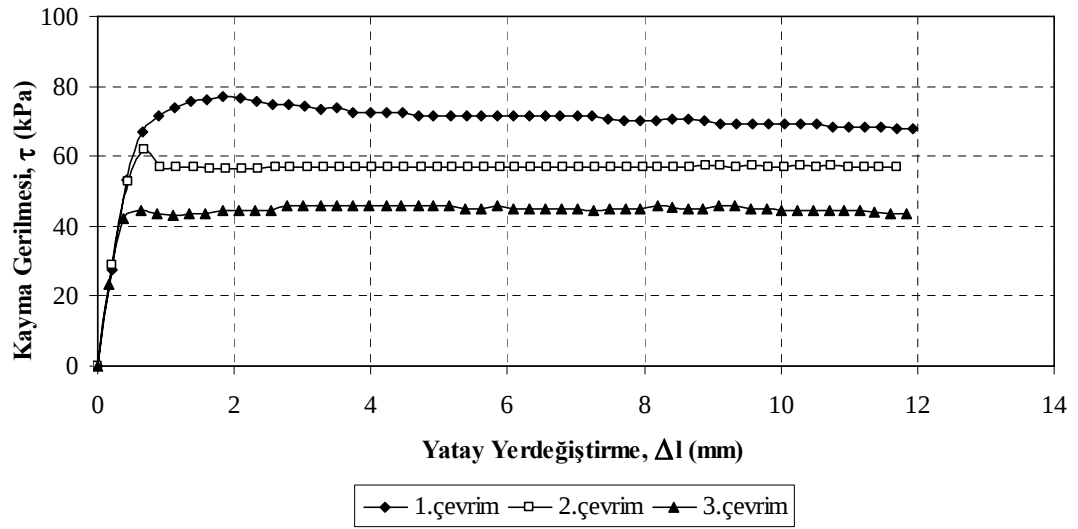
Şekil C.4 : E4 numunesi göçme zarfları

Numune No: E5, $\sigma=100$ kPa

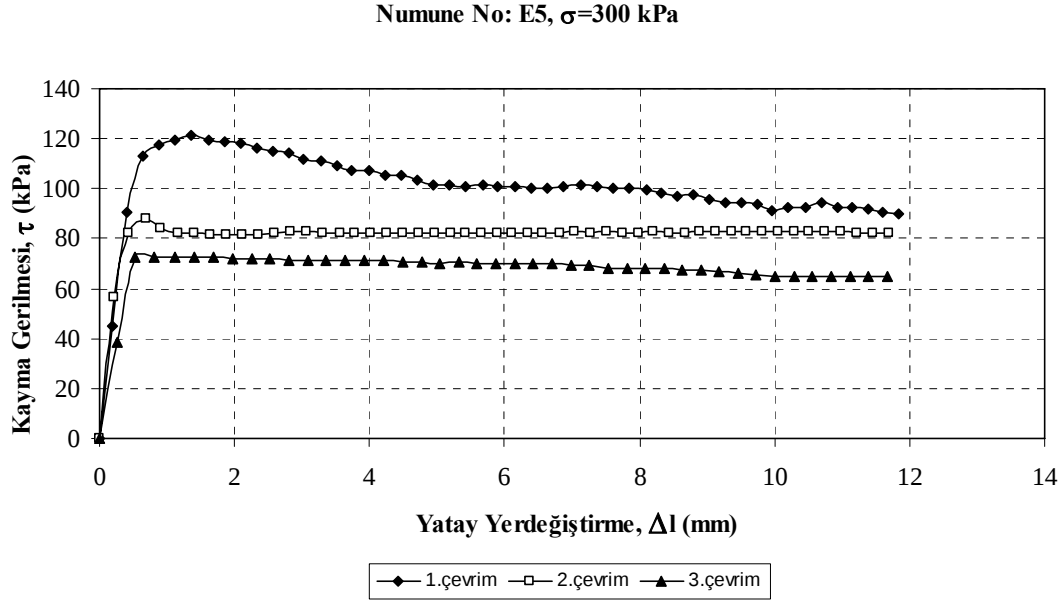


Şekil C.5 : E5 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa

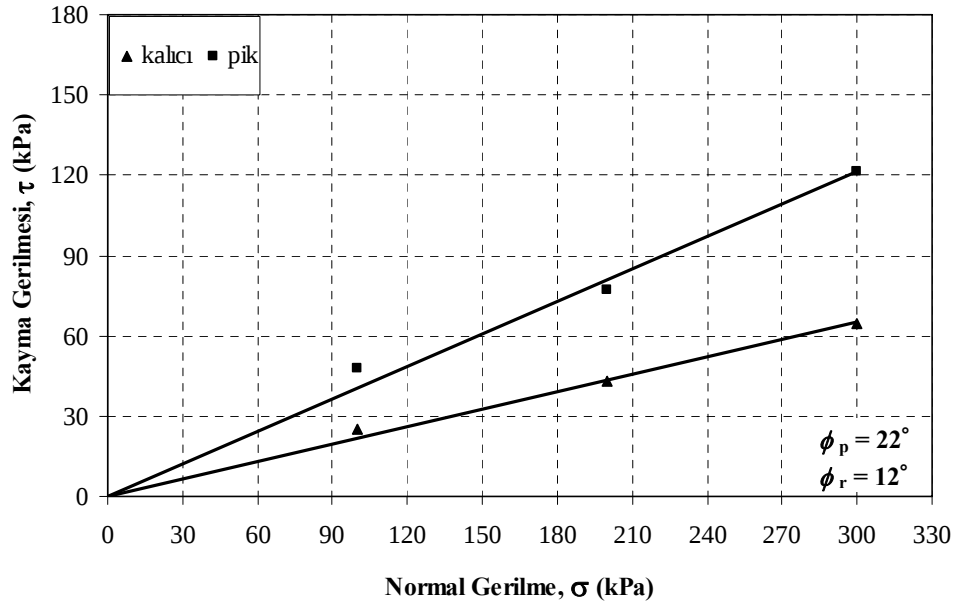
Numune No: E5, $\sigma=200$ kPa



Şekil C.6 : E5 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa

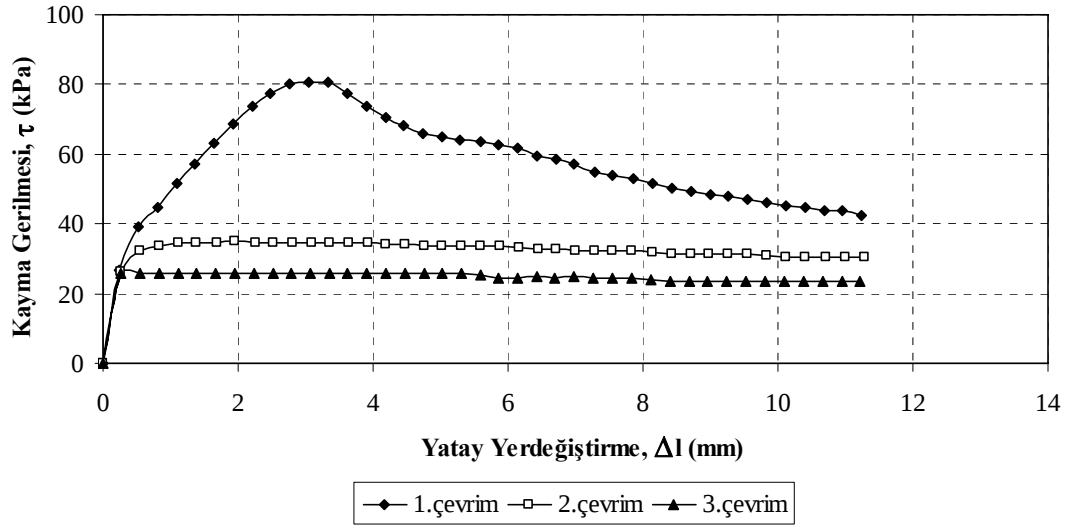


Şekil C.7 : E5 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



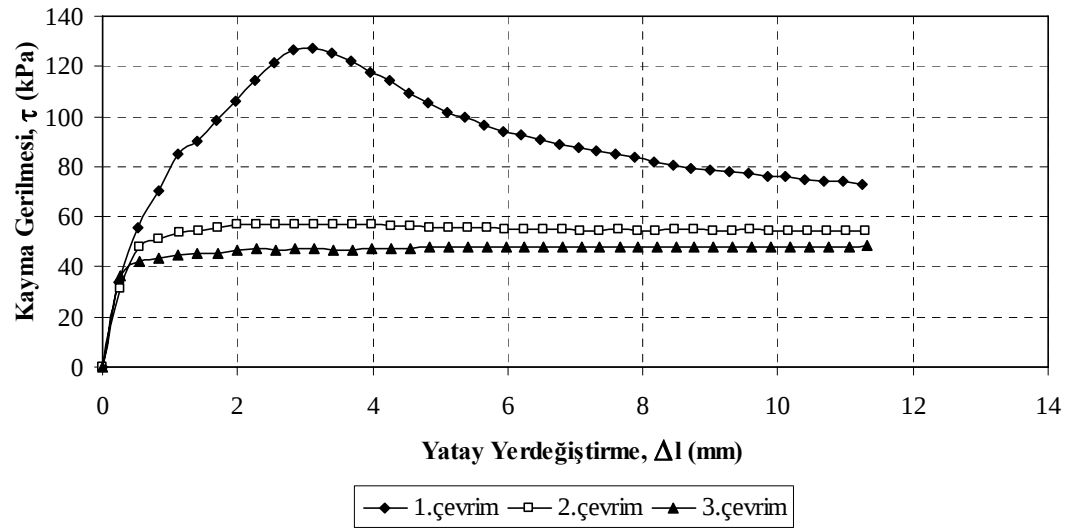
Şekil C.8 : E5 numunesi göçme zarfları

Numune No: E6, $\sigma=100$ kPa

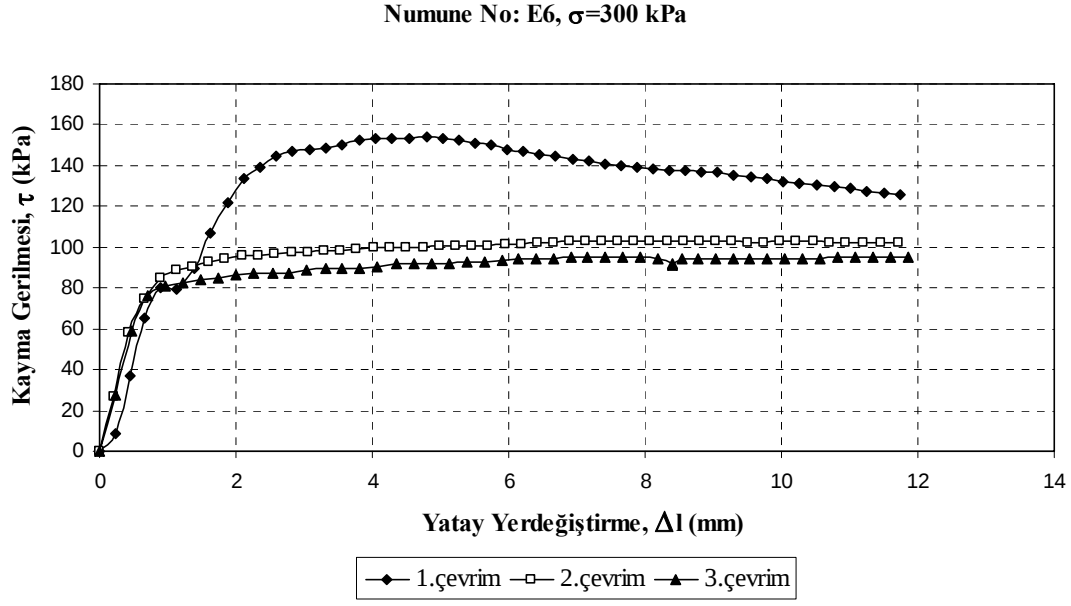


Şekil C.9 : E6 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa

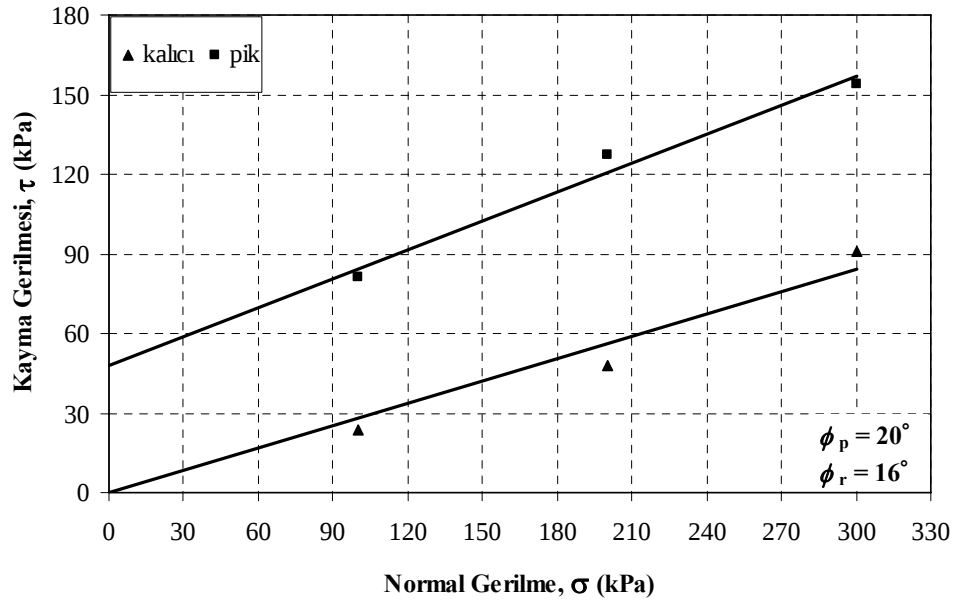
Numune No: E6, $\sigma=200$ kPa



Şekil C.10 : E6 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa

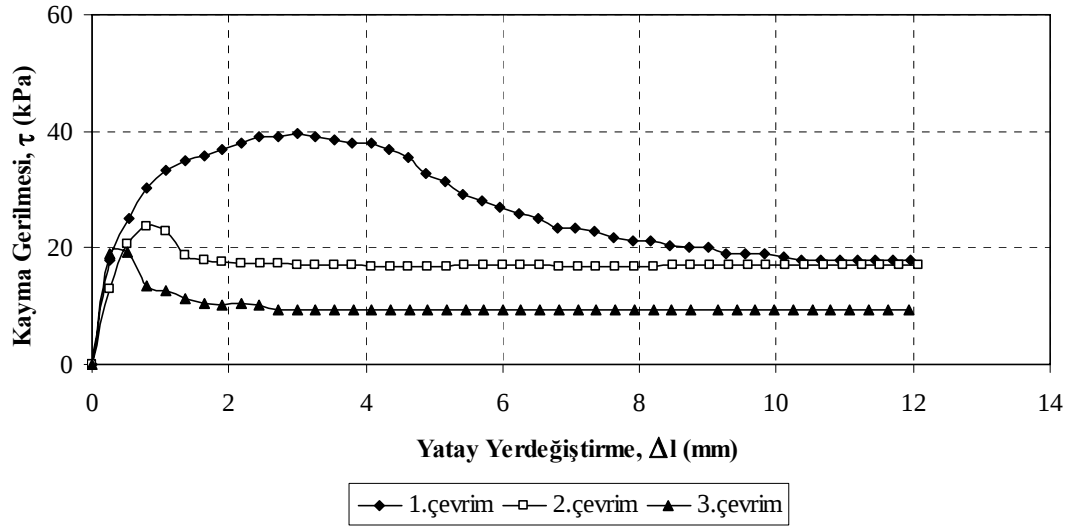


Şekil C.11 : E6 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



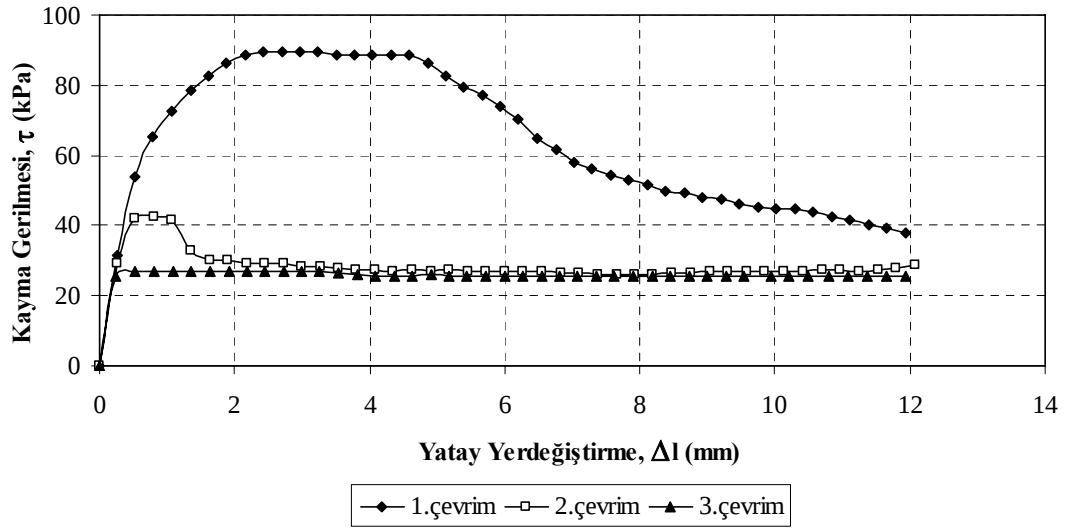
Şekil C.12 : E6 numunesi göçme zarfları

Numune No: E7, $\sigma=100$ kPa

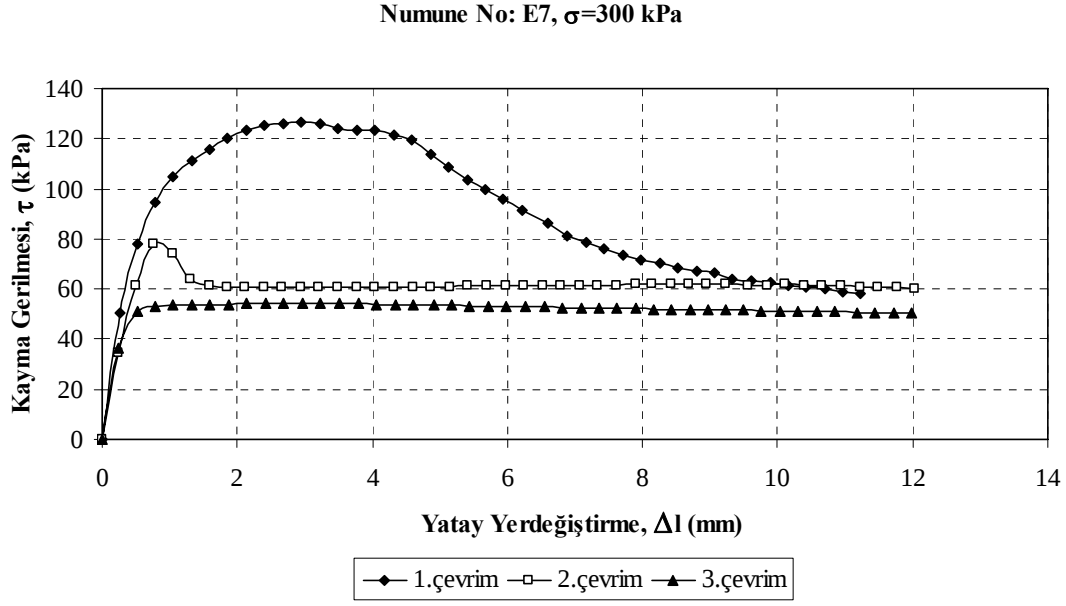


Şekil C.13 : E7 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa

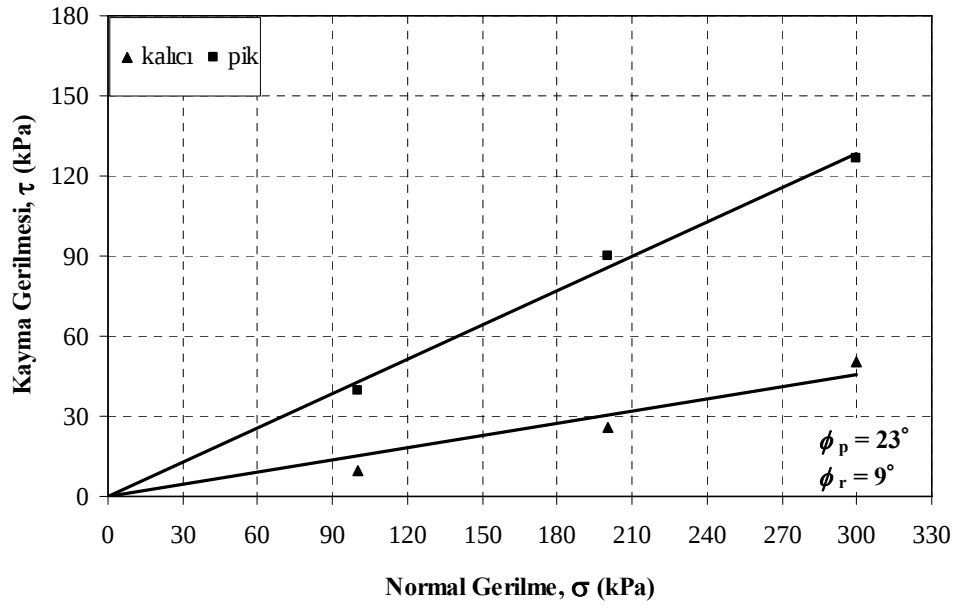
Numune No: E7, $\sigma=200$ kPa



Şekil C.14 : E7 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa

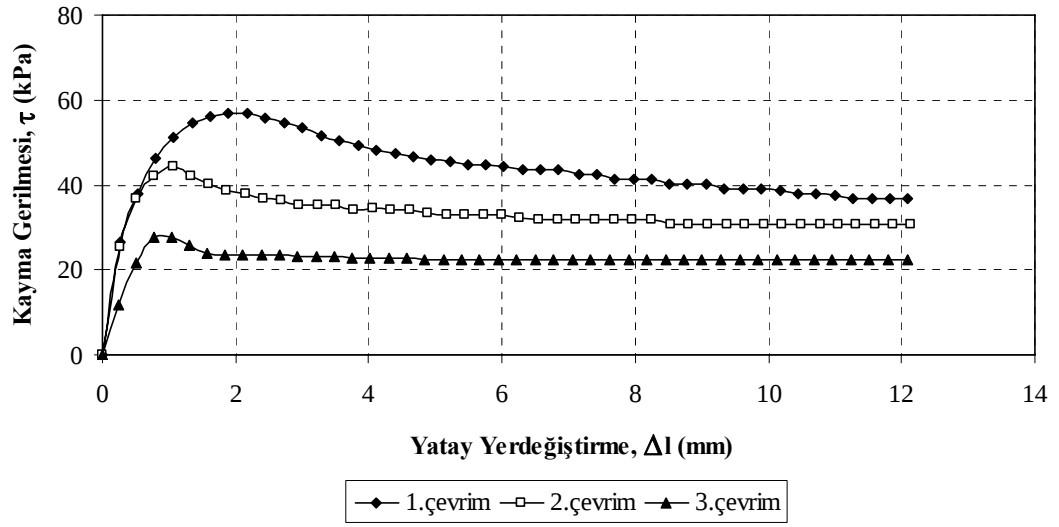


Şekil C.15 : E7 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



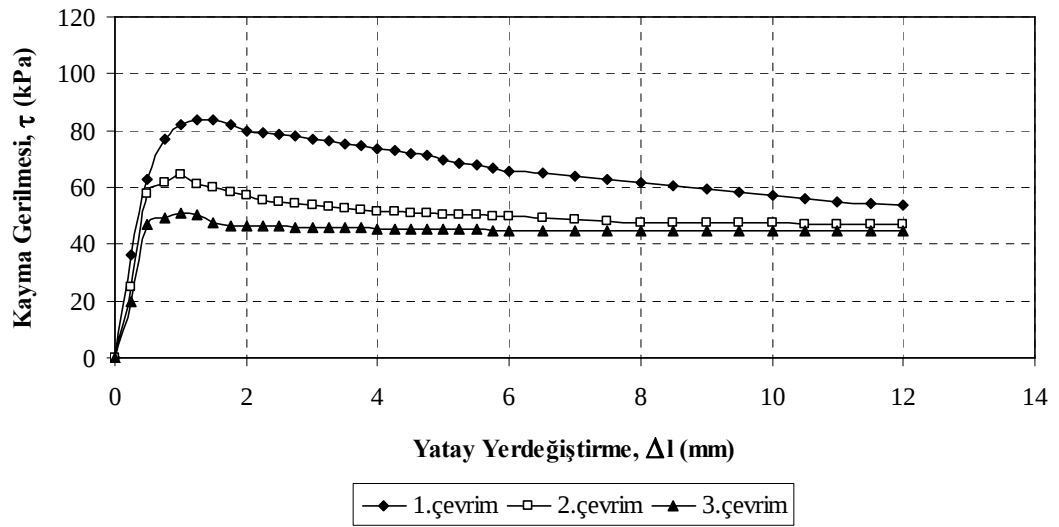
Şekil C.16 : E7 numunesi göçme zarfları

Numune No: E8, $\sigma=100$ kPa

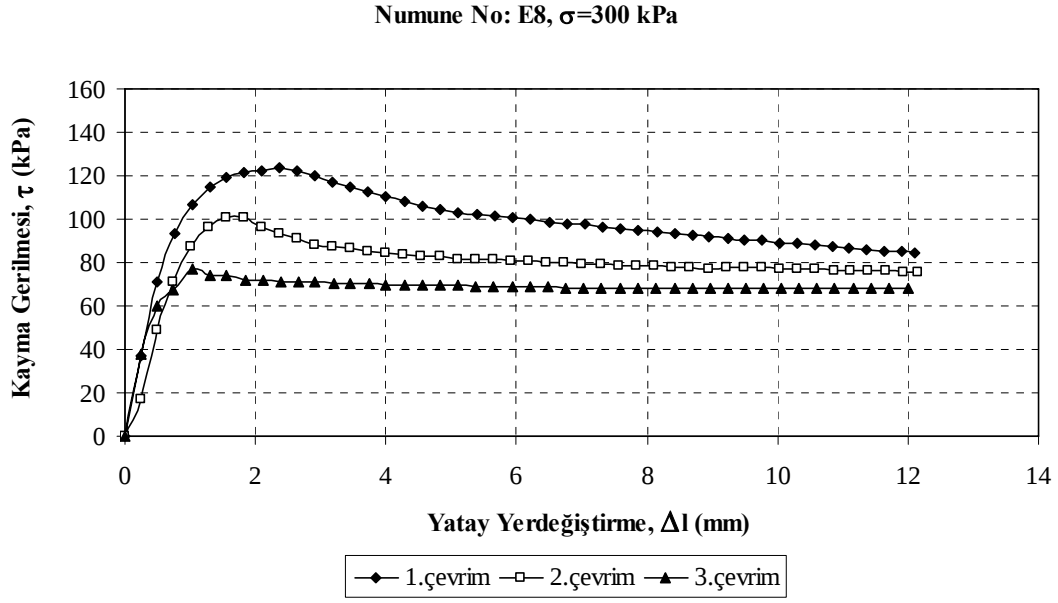


Şekil C.17 : E8 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa

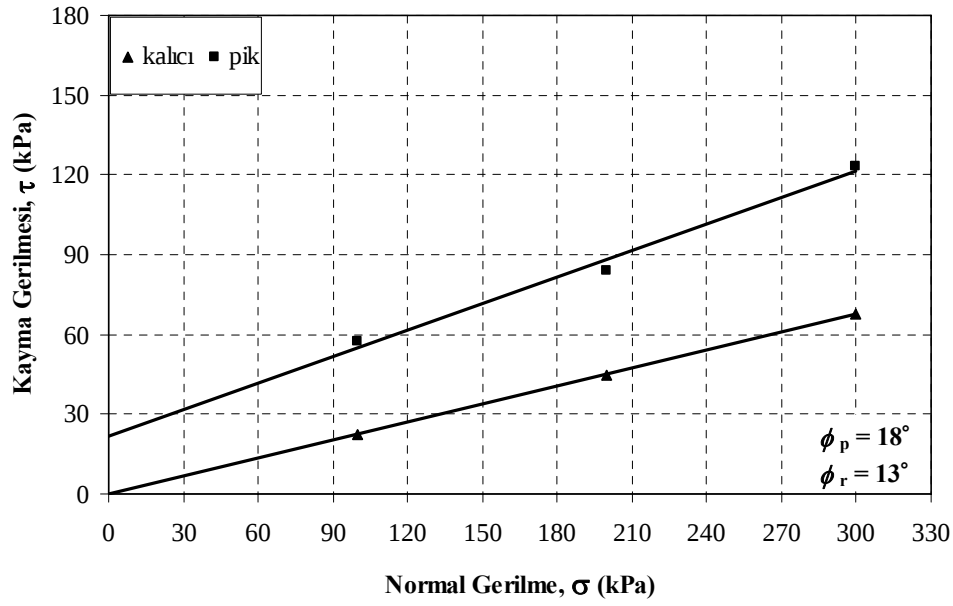
Numune No: E8, $\sigma=200$ kPa



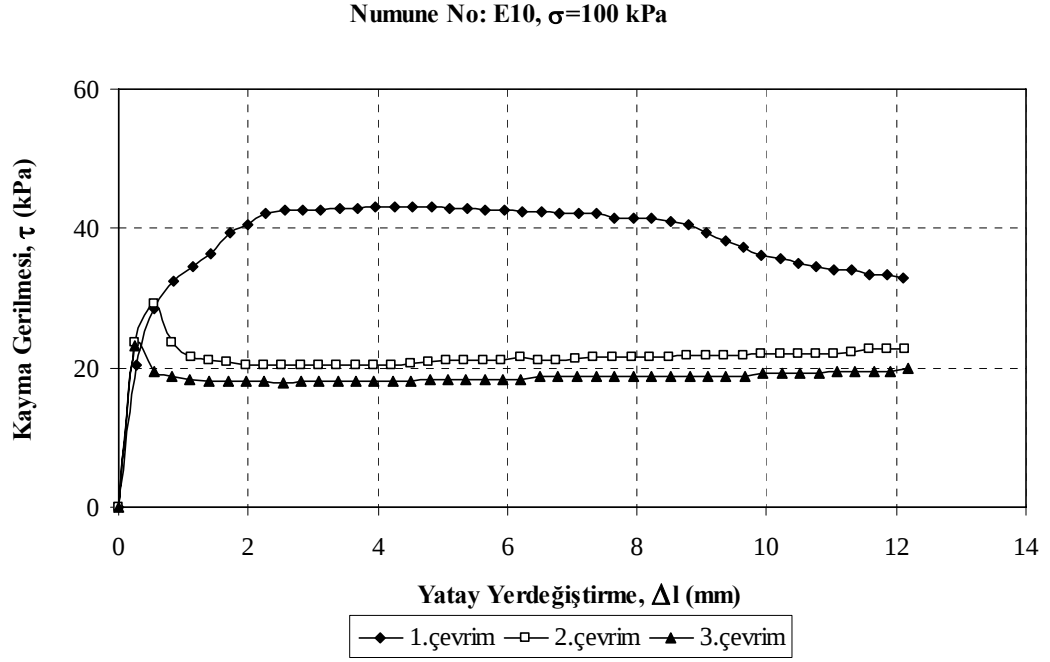
Şekil C.18 : E8 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa



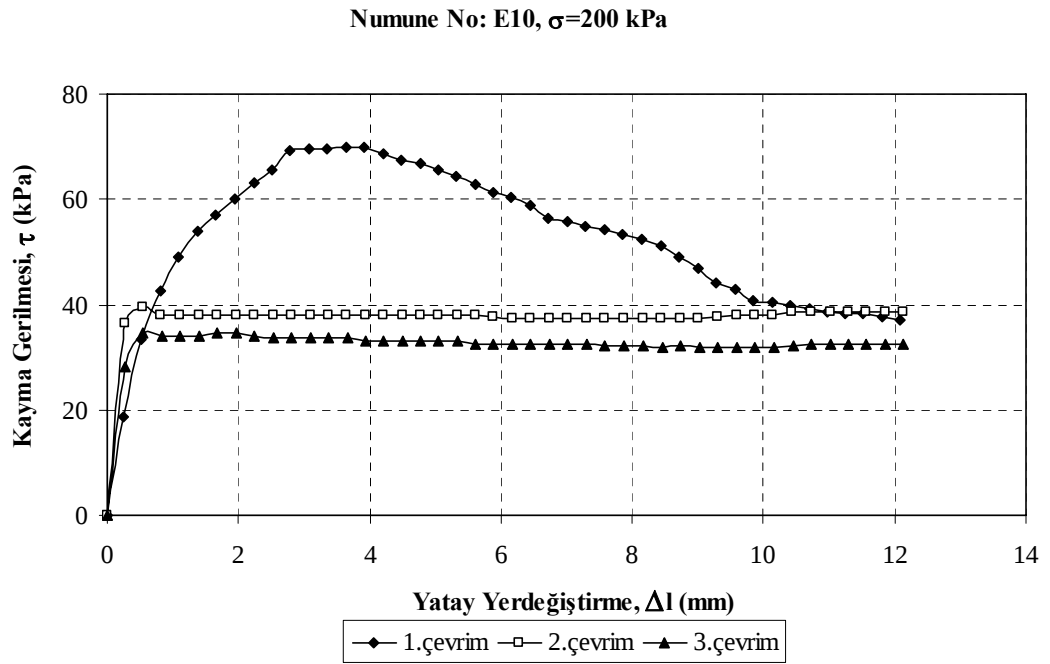
Şekil C.19 : E8 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



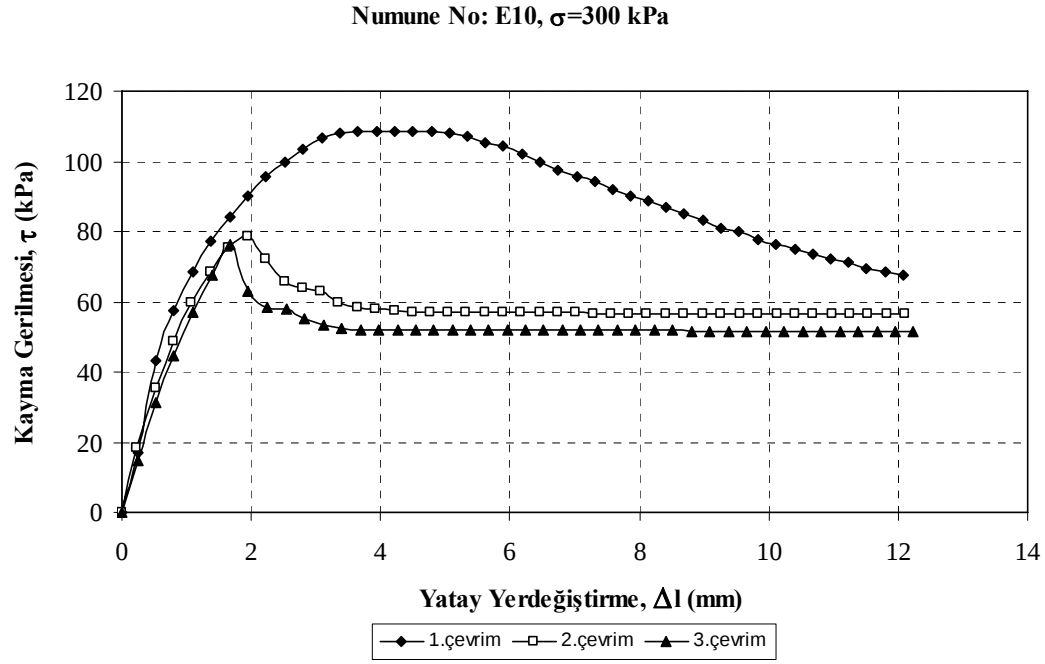
Şekil C.20 : E8 numunesi göçme zarfları



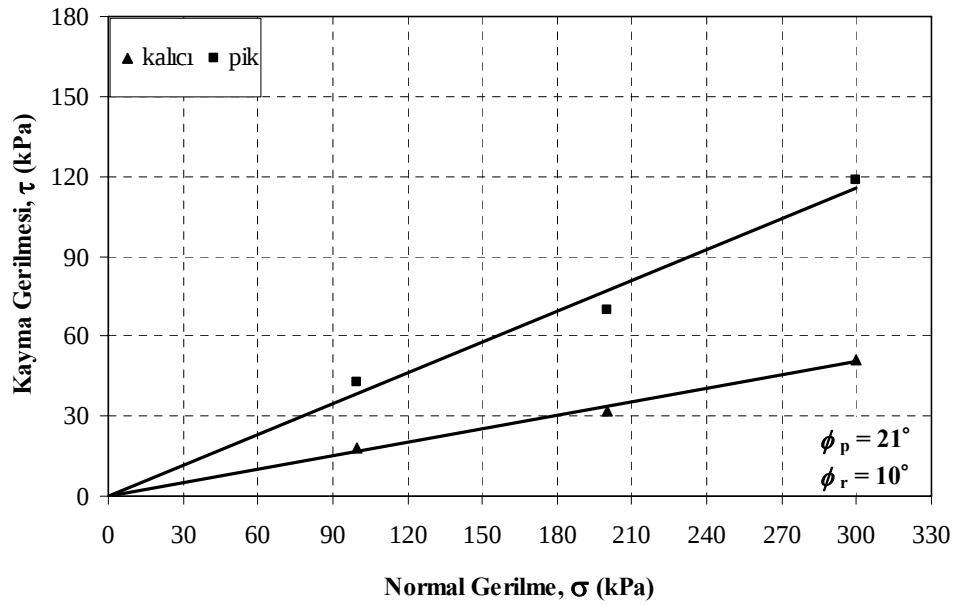
Şekil C.21 : E10 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa



Şekil C.22 : E10 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa

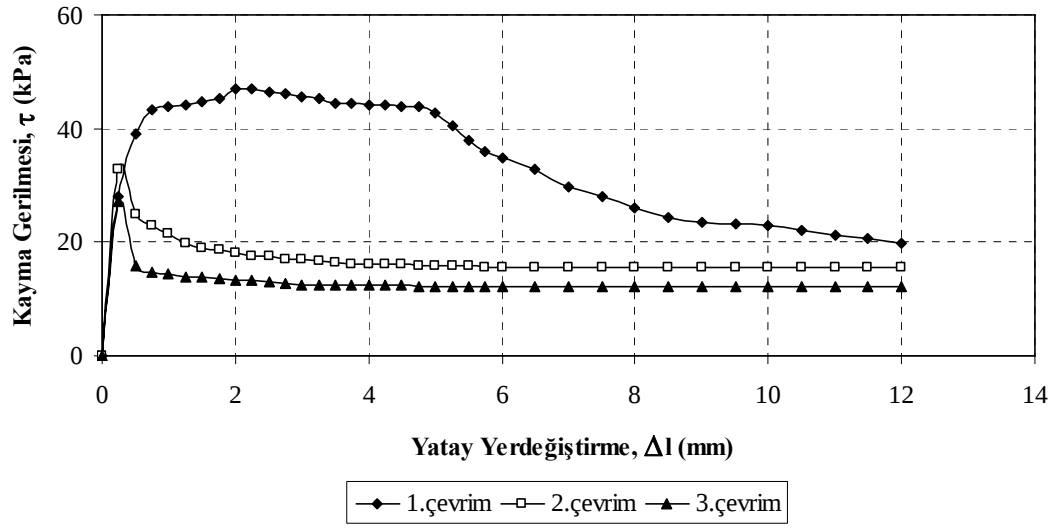


Şekil C.23 : E10 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



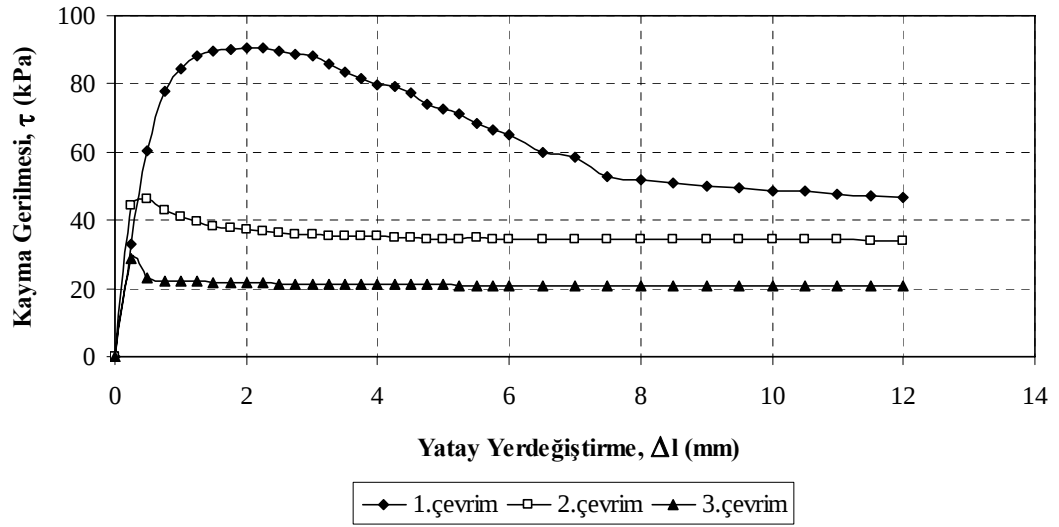
Şekil C.24 : E10 numunesi göçme zarfları

Numune No: E11, $\sigma=100$ kPa

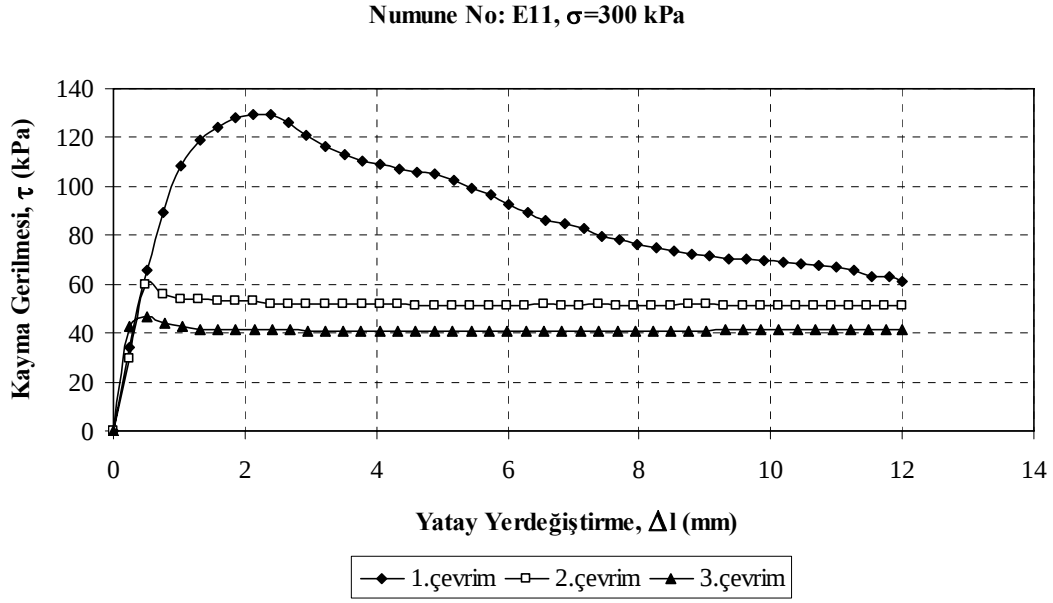


Şekil C.25 : E11 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=100$ kPa

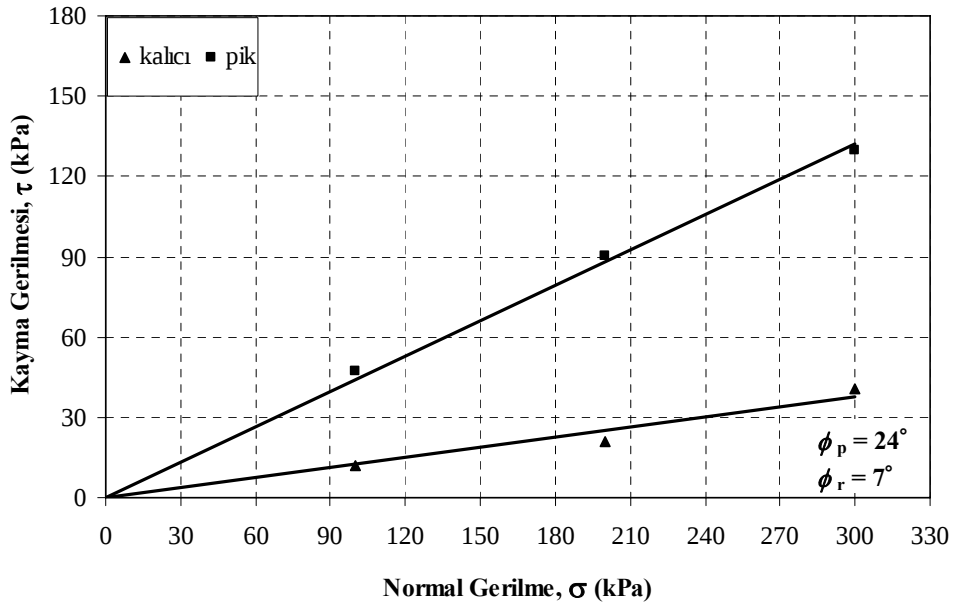
Numune No: E11, $\sigma=200$ kPa



Şekil C.26 : E11 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=200$ kPa



Şekil C.27: E11 numunesi tekrarlı kesme deneyi, $\sigma=300$ kPa



Şekil C.28 : E11 numunesi göçme zarfları

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ali Emre ATAÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: Beyoğlu / İSTANBUL, 27/06/1985

Lisans Üniversitesi: 2003 – 2007 Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, İnşaat Mühendisliği

Eğitim

2000 – 2003 Özel Doğu Fen Lisesi, İstanbul

1991 – 2000 Özel Doğu İlköğretim Okulu, İstanbul

Deneyim

2006 Şengüller İnşaat, İstanbul. Stajyer Mühendis, Suadiye şantiyesi

2005 Anadolu Metro Ortaklığı, İstanbul. Stajyer Mühendis, Aksaray-Yenikapı tünel inşaatı.

Kurslar

2008 İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, SAP 2000 kursu

2006 Autodrom, İstanbul. Skid Car Güvenli Sürüş Teknikleri eğitimi

2003 – 2004 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnsan Kaynaklarını Geliştirme Merkezi, İstanbul, AutoCAD Kursu

Yabancı Dil

Akıcı İngilizce

Diğer

B tipi sürücü belgesi

İnşaat Mühendisleri Odası, üye 2007 - ...

Marmara Yelken Kulübü, üye 2003-...

E-posta: aliemreatac@gmail.com