

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN TEKRARLI KESME KUTUSU
DENEY YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet Rüştü ÜRKMEZ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep İYİSAN

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN TEKRARLI KESME KUTUSU
DENEY YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ahmet Rüştü ÜRKMEZ
(501071301)**

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 mukavemeti kavramı, aşırı konsolide kil zeminlerden oluşan şevlerde büyük önem taşımaktadır. Bu zemin yapısının ülkemizde en çok rastlanan tür olması, hem şev analizlerinde hem de bu şevlerde yapılacak mühendislik yapı tasarımlarında kalıcı kayma mukavemetinin önemini arttırmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılarak kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiş, kalıcı kayma mukavemeti açılarıyla endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Yüksek lisans tez konumu seçme aşamasında ve çalışmalarım sırasında hiçbir yardımı esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübeleri ile göstermiş oldukları yakın ilgi ve katkılarından dolayı öncelikle tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Recep İYİSAN'a, Sayın Dr. Gökhan ÇEVİKBİLEN'e ve Sayın Araştırma görevlisi Mustafa HATİPOĞLU'na hürmet ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür etmeyi borç bilirim. Çalışmalarım sırasında her zaman yanımda olan sevgili meslektaşım Ali Emre ATAÇ'a, sabırla beni yüreklendiren, desteğini her zaman yanımda hissettiğim sevgili aileme ve değerli sözlüm Zeynep Merve ÖZBEY'e teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2009

Ahmet Rüştü Ürkmez
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR ve SİMGELER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	2
1.2 Kapsam.....	3
2. ZEMİNLERDE KAYMA MUKAVEMETİ.....	5
2.1 Kumların Kayma Mukavemeti	7
2.2 Killerin Kayma Mukavemeti.....	8
2.3 Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi.....	9
2.3.1 Serbest basınç deneyi	9
2.3.2 Kesme kutusu deneyi	10
2.3.3 Üç eksenli basınç deneyi.....	12
2.3.4 Basit kesme deneyi.....	15
3. ZEMİNLERDE KALICI KAYMA MUKAVEMETİ	17
3.1 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tanımı	17
3.2 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Önemi	21
3.3 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Mekanizması.....	23
3.4 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi	26
3.5 Kayma Deformasyonu ile Kalıcı Kayma Mukavemetinin Değişimi	30
3.6 Kalıcı Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler	32
3.6.1 Minerolojinin etkisi.....	32
3.6.1.1 Kıvam limitlerinin etkisi	33
3.6.1.2 Kil yüzdesinin etkisi	36
3.6.2 Efektif normal gerilmenin etkisi	37
3.6.3 Kesme hızının etkisi.....	38
3.6.4 Zemin yapısının etkisi	42
3.7 Endeks Özellikleri ile Kalıcı Kayma Mukavemeti Açısı Arasındaki İlişkiler ..	44
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	55
4.1 Deney Numunelerinin Endeks Özellikleri	56
4.2 Kesme Kutusu Deney Aleti.....	57
4.2.1 Tekrarlı kesme kutusu deneyi ve deney numunelerinin hazırlanması	59
4.3 Hesaplamalar	67
5. DENEYSEL SONUÇLAR ve SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	71
5.1 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçları.....	71
5.2 Halka Kesme Deney Sonuçları.....	75
5.3 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	77

5.3.1 A numuneleri ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler.....	77
5.3.2 A ve B numunelerinin karşılaştırılması.....	93
5.3.3 Geçmişteki çalışmalarla karşılaştırma yapılması	99
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR.....	105
EKLER.....	107

KISALTMALAR ve SİMGELER

A	: Aktivite
AK	: Aşırı Konsolide
AKO	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
c	: Kohezyon
c_r	: Rezidüel veya Kalıcı Kohezyon
c_p	: Pik Kohezyon
CD	: Konsolidasyonlu, drenajlı üç eksenli deney
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
CU	: Konsolidasyonlu, drenajsız üç eksenli deney
D	: Çap
e	: Boşluk Oranı
İDO	: İnce Dane Oranı
I_p	: Plastisite İndisi
KY	: Kil Yüzdesi
N	: Deney Sayısı
UU	: Konsolidasyonsuz, drenajsız üç eksenli deney
v	: Kesme Hızı
V	: Hacim
φ	: Kayma Mukavemeti Açısı
φ_r	: Rezidüel veya Kalıcı Kayma Mukavemeti Açısı
φ_p	: Pik Kayma Mukavemeti Açısı
w_L	: Likit Limit
w_n	: Doğal Su Muhtevası
w_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
w_p	: Plastik Limit
ΔPI	: Casagrande Plastisite Kartında A Hattına Olan Uzaklık
ΔI	: Kayma Yerdeğiştirme
γ	: Birim Hacim Ağırlık
γ_n	: Doğal Birim Hacim Ağırlık
τ	: Kayma Gerilmesi
σ	: Normal Gerilme
σ'	: Efektif Normal Gerilme

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetlerin belirlendiği deplasman değerleri (Skempton, 1985)	31
Çizelge 3.2 : Bazı kil minerallerinin ortalama kalınlık-çap ve özgül yüzey değerleri (Bardet, 1997).....	33
Çizelge 3.3 : Çeşitli kil mineralleri ve likit limit (w_L), plastik limit (w_P) ve aktivite (A) değerleri (Das, 2002)	34
Çizelge 3.4 : Geri analiz ve laboratuvar kalıcı kayma mukavemetlerinin karşılaştırılması (Skempton, 1985).....	41
Çizelge 3.5 : Bazı kil mineralleri ve data sayıları (Suzuki ve diğ., 2005)	49
Çizelge 4.1 : A numunelerinin endeks özellikleri	56
Çizelge 4.2 : A-14 numunesinin düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamaları.....	68
Çizelge 4.3 : A-14 numunesinde her normal gerilme için pik kayma mukavemeti ..	69
Çizelge 4.4 : A-14 numunesinde her normal gerilme için kalıcı kayma mukavemeti	69
Çizelge 5.1 : A numunelerinin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları	75
Çizelge 5.2 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişkiler.....	78
Çizelge 5.3 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastik limit arasındaki ilişkiler....	79
Çizelge 5.4 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişkiler.....	80
Çizelge 5.5 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile $w_L + \Delta PI$ arasındaki ilişkiler	81
Çizelge 5.6 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile w_P/w_L oranı arasındaki ilişkiler....	82
Çizelge 5.7 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile ϕ_p arasındaki ilişkiler	83
Çizelge 5.8 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişkiler	84
Çizelge 5.9 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile aktivite arasındaki ilişkiler.....	85
Çizelge 5.10 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile ince dane oranı arasındaki ilişkiler.....	86
Çizelge A.1 : Elek analizi	109
Çizelge A.2 : Hidrometre analizi	109
Çizelge A.3 : Elek analizi	111
Çizelge A.4 : Hidrometre analizi	111
Çizelge A.5 : Elek analizi	113
Çizelge A.6 : Hidrometre analizi	113
Çizelge A.7 : Elek analizi	115
Çizelge A.8 : Hidrometre analizi	115
Çizelge A.9 : Elek analizi	117
Çizelge A.10 : Hidrometre analizi	117
Çizelge A.11 : Elek analizi	119
Çizelge A.12 : Hidrometre analizi	119
Çizelge A.13 : Elek analizi	121
Çizelge A.14 : Hidrometre analizi	121

Çizelge A.15 : Elek analizi	123
Çizelge A.16 : Hidrometre analizi	123
Çizelge A.17 : Elek analizi	125
Çizelge A.18 : Hidrometre analizi	125
Çizelge A.19 : Elek analizi	127
Çizelge A.20 : Hidrometre analizi	127
Çizelge A.21 : Elek analizi	129
Çizelge A.22 : Hidrometre analizi	129
Çizelge A.23 : Elek analizi	131
Çizelge A.24 : Hidrometre analizi	131
Çizelge A.25 : Elek analizi	133
Çizelge A.26 : Hidrometre analizi	133
Çizelge A.27 : Elek analizi	135
Çizelge A.28 : Hidrometre analizi	135
Çizelge A.29 : Elek analizi	137
Çizelge A.30 : Hidrometre analizi	137
Çizelge A.31 : Elek analizi	139
Çizelge A.32 : Hidrometre analizi	139
Çizelge A.33 : Elek analizi	141
Çizelge A.34 : Hidrometre analizi	141
Çizelge A.35 : Elek analizi	143
Çizelge A.36 : Hidrometre analizi	143
Çizelge A.37 : Elek analizi	145
Çizelge A.38 : Hidrometre analizi	145
Çizelge A.39 : Elek analizi	147
Çizelge A.40 : Hidrometre analizi	147
Çizelge A.41 : Elek analizi	149
Çizelge A.42 : Hidrometre analizi	149
Çizelge A.43 : Elek analizi	151
Çizelge A.44 : Hidrometre analizi	151

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Mohr-Coulomb göçme hipotezi, doğrusal zarf	6
Şekil 2.2 : Kesme kutusu (Önalp, 2007).....	11
Şekil 2.3 : Normal ve aşırı konsolide zeminler için kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi.....	12
Şekil 2.4 : Üç eksenli deney hücresi (Özaydın, 2000).....	15
Şekil 2.5 : Üç eksenli deney yöntemi için Mohr dairesi.....	15
Şekil 3.1 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetleri (Head, 2006)	18
Şekil 3.2 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetlerinin zarfları (Head, 2006).....	18
Şekil 3.3 : Kayma mukavemeti ile kayma deformasyonu ilişkisi üzerindeki aşırı konsolidasyonun etkisi (Head, 2006)	20
Şekil 3.4 : Kesme işlemi sırasındaki hacim değişimi (Head, 2006)	20
Şekil 3.5 : Kesme işlemi sırasında boşluk oranındaki değişimi (Head, 2006)	20
Şekil 3.6 : Normal ve aşırı konsolide zeminler için Coulomb zarfları (Head, 2006) 21	
Şekil 3.7 : Kil yüzdesi yüksek zeminlerin efektif normal gerilme altında kayma mukavemetleri (Skempton, 1985)	23
Şekil 3.8 : Kil yüzdesi düşük zeminlerin efektif normal gerilme altında kayma mukavemetleri (Skempton, 1985)	24
Şekil 3.9 : Pik ve kalıcı kayma mukavemeti açıları ile kil yüzdesi ve plastisite indisi arasındaki ilişki (Lupini, 1981)	25
Şekil 3.10 : Kesme kutusu deney aleti.....	28
Şekil 3.11 : Kesme kutusu deney aletinde kesilen bir numune	28
Şekil 3.12 : Halka kesme deney aleti.....	29
Şekil 3.13 : Halka kesme deney aletinde kesilmiş bir numune	29
Şekil 3.14 : Kil mineralojisinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi (Stark, 1994) ...	34
Şekil 3.15 : Güney Galler aşırı konsolide zeminlerinin w_p/w_L ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki bağıntı (De ve Furdas, 1973)	35
Şekil 3.16 : Dane şekli ile dane çapı arasındaki ilişki (Mitchell, 1993)	36
Şekil 3.17 : Farklı kesme hızlarında kaolinin belirlenen kalıcı durumları için elektron mikroskopundan görünümü	40
Şekil 3.18 : 400 mm/dak değerindeki kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisi (Skempton, 1985)	41
Şekil 3.19 : Kalıcı kayma mukavemeti açısına kesme hızının etkisi (Koltuk, 2005) 42	
Şekil 3.20 : Kalıcı kayma mukavemetine aşırı konsolidasyon oranının etkisi.....	44
Şekil 3.21 : Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemetinin değişimi (Skempton, 1964).....	45
Şekil 3.22 : Kil yüzdesiyle kalıcı kayma mukavemetinin değişimi(Skempton, 1964)	45
Şekil 3.23 : Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).....	46
Şekil 3.24 : Likit limit, kil yüzdesi ve efektif gerilme ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Stark, 1994).....	47

Şekil 3.25 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının ΔPI ile değişimi (Wesley, 2003)	48
Şekil 3.26 : Kalıcı mukavemet ile plastisite indisi arasındaki ilişki (Suzuki, 2005) .	50
Şekil 3.27 : Kalıcı mukavemet ile likit limit arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)	50
Şekil 3.28 : Kalıcı mukavemet ile plastik limit/likit limit oranı arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)	51
Şekil 3.29 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit ilişkisi (İyisan ve diğ., 2006)	52
Şekil 3.30 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastisite indisi ilişkisi (İyisan ve diğ., 2006)	53
Şekil 3.31 : Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (İyisan ve diğ., 2006)	54
Şekil 4.1 : Numunelerin plastisite kartındaki yerleri.	57
Şekil 4.2 : Kesme kutusu deney aletinin kesiti	58
Şekil 4.3 : Kesme kutusu deney aletinin genel görünümü.....	58
Şekil 4.4 : Uygun boyutlarda numune hazırlamaya yarayan kalıp	59
Şekil 4.5 : Tekrarlı kesme kutusu deney numunesinin hazırlanması.....	60
Şekil 4.6 : Deney başı su muhtevasının alınması.....	60
Şekil 4.7 : Kesme kutusu alt ve üst parçalarının yerleştirilmesi.....	60
Şekil 4.8 : Alt ve üst parçaların vidalar yardımıyla birbirine tutturulması	61
Şekil 4.9 : Kesme kutusu deney aleti parçaları ve plakaları	61
Şekil 4.10 : Numuneye poroz kağıt yerleştirilmesi.....	62
Şekil 4.11 : Numunenin kesme kutusuna yerleştirilmesi.....	62
Şekil 4.12 : Normal gerilmeyi numuneye alttan ve üstten iletecek kısım	62
Şekil 4.13 : Yatay deformasyon saati	63
Şekil 4.14 : Kuvvet halkası saati.....	63
Şekil 4.15 : Konsol kola yüklemenin yapılması	64
Şekil 4.16 : Vitesin ve kesme hızının ayarlanması	64
Şekil 4.17 : Deney düzeneğinin geri çekilmesi.....	65
Şekil 4.18 : Numunenin alt ve üst parçayla birlikte sistemden çıkarılması	65
Şekil 4.19 : Kesilen numunenin görünümü	66
Şekil 4.20 : Etüve konulmadan önceki kesilmiş yüzeyler	66
Şekil 4.21 : Etüvde kurutulduktan sonraki kesilmiş yüzeyler	66
Şekil 4.22 : A-14 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemet zarfları.....	70
Şekil 5.1 : A-9 numunesinde 5 çevrimli tekrarlı kesme kutusu deneyi	72
Şekil 5.2 : A-9 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları.....	72
Şekil 5.3 : A-11 numunesinde 5 çevrimli tekrarlı kesme kutusu deneyi	73
Şekil 5.4 : A-11 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları.....	73
Şekil 5.5 : A-14 numunesinde 3 çevrimli tekrarlı kesme kutusu deneyi	74
Şekil 5.6 : A-14 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları.....	74
Şekil 5.7 : A-14 numunesine ait halka kesme deney sonucu.....	76
Şekil 5.8 : A-14 numunesine ait göçme zarfları	76
Şekil 5.9 : A numunelerinde ϕ_r 'nin w_L ile değişimi.....	78
Şekil 5.10 : A numunelerinde ϕ_r 'nin w_P ile değişimi.....	79
Şekil 5.11 : A numunelerinde ϕ_r 'nin I_P ile değişimi	80
Şekil 5.12 : A numunelerinde ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi	81
Şekil 5.13 : A numunelerinde ϕ_r 'nin w_P/w_L oranı ile değişimi.....	82
Şekil 5.14 : A numunelerinde ϕ_r 'nin ϕ_p ile değişimi	83
Şekil 5.15 : A numunelerinde ϕ_r 'nin kil yüzdesi ile değişimi.....	84
Şekil 5.16 : A numunelerinde ϕ_r 'nin aktivite ile değişimi	85

Şekil 5.17 : A numunelerinde ϕ_r 'nin ince dane oranı ile değişimi	86
Şekil 5.18 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin w_L ile değişimi	87
Şekil 5.19 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin w_P ile değişimi	88
Şekil 5.20 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin I_P ile değişimi	88
Şekil 5.21 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi	89
Şekil 5.22 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin w_P/w_L oranı ile değişimi	90
Şekil 5.23 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin ϕ_p ile değişimi	90
Şekil 5.24 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin kil yüzdesi ile değişimi	91
Şekil 5.25 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin aktivite ile değişimi	92
Şekil 5.26 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin ince dane oranı ile değişimi	92
Şekil 5.27 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin w_L ile değişimi	94
Şekil 5.28 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin w_L ile değişimi	94
Şekil 5.29 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin w_P ile değişimi	95
Şekil 5.30 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin w_P ile değişimi	96
Şekil 5.31 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin I_P ile değişimi	96
Şekil 5.32 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin I_P ile değişimi	97
Şekil 5.33 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi	97
Şekil 5.34 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi	98
Şekil 5.35 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin ϕ_p ile değişimi	99
Şekil 5.36 : Yapılan çalışmanın geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması	100
Şekil 5.37 : A ve B numunelerinin birleştirilerek geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması	101
Şekil A.1 : A-1 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	110
Şekil A.2 : A-2 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	112
Şekil A.3 : A-3 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	114
Şekil A.4 : A-4 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	116
Şekil A.5 : A-6 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	118
Şekil A.6 : A-8 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	120
Şekil A.7 : A-9 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	122
Şekil A.8 : A-10 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	124
Şekil A.9 : A-11 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	126
Şekil A.10 : A-12 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	128
Şekil A.11 : A-13 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	130
Şekil A.12 : A-14 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	132
Şekil A.13 : A-15 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	134
Şekil A.14 : A-16 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	136
Şekil A.15 : A-17 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	138
Şekil A.16 : A-18 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	140
Şekil A.17 : A-19 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	142
Şekil A.18 : A-20 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	144
Şekil A.19 : A-21 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	146
Şekil A.20 : A-22 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	148
Şekil A.21 : A-23 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	150
Şekil A.22 : A-24 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi	152
Şekil B.1 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa	155
Şekil B.2 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa	155
Şekil B.3 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa	156
Şekil B.4 : Kalıcı ve pik göçme zarfları	156
Şekil B.5 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa	157

Şekil B.56 : Kalıcı ve pik göçme zarfları	182
Şekil B.57 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa.....	183
Şekil B.58 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa.....	183
Şekil B.59 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa.....	184
Şekil B.60 : Kalıcı ve pik göçme zarfları	184
Şekil B.61 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa.....	185
Şekil B.62 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa.....	185
Şekil B.63 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa.....	186
Şekil B.64 : Kalıcı ve pik göçme zarfları	186
Şekil B.65 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa.....	187
Şekil B.66 : Kalıcı göçme zarfı.....	187

KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN TEKRARLI KESME KUTUSU DENEY YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Kil zeminlerde, büyük kayma deformasyonlarından sonra kayma gerilmesinin ulaştığı sabit değere kalıcı veya rezidüel kayma mukavemeti adı verilmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti, aşırı konsolide kil zeminlerden oluşan şevlerde yapılacak mühendislik yapıların tasarımında ve şevlerin stabilitesinde büyük öneme sahiptir. Efektif normal gerilme seviyesi, zemin yapısı, kesme hızı ve minerolojik yapı zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini etkileyen en önemli faktörlerdir. Kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve halka kesme deneyi zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede yaygın olarak kullanılan deney yöntemleridir. Ancak, kalıcı kayma mukavemeti büyük deformasyonlardan sonra meydana geldiği için kesme kutusu ve halka kesme deney yöntemleri kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek açısından daha kullanışlıdır. Bu çalışma kapsamında kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirleyebilmek için farklı kıvam limitlerine ve kil yüzdelere sahip numuneler üzerinde farklı gerilmeler altında tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyinde çeşitli bölgelerden gelen örselenmemiş zemin numuneleri kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının zeminlerin endeks özellikleri ile ilişkileri incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda, kalıcı kayma mukavemeti açısını zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olarak kolayca tahmin edebilmek için korelasyonlar geliştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti açısının artan likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ile birlikte azaldığı gözlenmiştir.

DETERMINING RESIDUAL SHEAR STRENGTH WITH REVERSAL SHEAR BOX TEST

SUMMARY

For clayey soils, the shear strain which occurs after large shear displacements called residual shear strength. Residual shear strength of soils is very important for engineering projects at overconsolidated slopes and slope stabilities. Effective normal stress, soil type, shear displacement rate and mineralogy are the main factors affecting residual strength. The main experimental methods for determining the residual shear strength are reversal shear box test, triaxial pressure test and ring shear test. Residual shear strength of soils occurs after large shear displacements so, reversal shear box test and ring shear test are more suitable for determining residual shear strength parameters. In this study, reversal shear box tests were carried out on soil samples having different consistency limits and clay fractions in different effective normal stress value to determine the residual shear strength parameters. The undisturbed soil samples which were taken from different places, were used in these tests. Residual shear strength angles of soils were determined from reversal shear box tests. The relationships between residual shear strength angles and index properties of soils were searched. For practical aim, the correlations of the relationships were developed to determine residual shear strength angles due to the index properties of soils. Additionally, ring shear test was carried out on the one soil sample in two different effective normal stress value for comparing the results obtained from the reversal shear box test. Furthermore, the results of the reversal shear box tests were compared with the past studies. Finally, it has been observed that residual friction angle obtained by reversal shear box tests decreases with increasing of liquid limit, plastic limit and plasticity index.

1. GİRİŞ

Zemin tabakaları içerisinde, gerek kendi ağırlığından (jeolojik gerilmeler) gerekse zemin yüzünde uygulanan yüklerden dolayı gerilmeler oluştuğu bilinmektedir. Zemine uygulanan yüklerin, derinlik boyunca zemin tabakaları içerisinde gerek normal gerilmelerde gerekse kayma gerilmelerinde artış meydana getirmektedir. Bu durum zeminlerde şekil değişikliklerine yol açmaktadır. Diğer birçok inşaat malzemesine oranla zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı genellikle çok daha karmaşık olmaktadır. Zemin tabakalarının uygulanan yük altındaki davranışı, zeminin başlangıç gerilme durumu, yüklemenin hızı, yükleme sırasında zemin suyunun dışarı çıkmasının kolaylık derecesi, gerilme geçmişi ya da tarihçesi gibi birçok etmene bağlıdır. Meydana gelen şekil değiştirmeler genelde gerilme seviyesi ile doğrusal olarak artmadığı gibi yük kaldırıldığı zaman da bu şekil değiştirmelerin büyük bir kısmının kalıcı olduğu gözlemlenmektedir. Uygulanan yüklerin meydana getirdiği gerilmelerin, zeminin kayma mukavemetini yani zeminin göçme olmadan karşı koyabileceği maksimum kayma gerilmesini aşması ya da kayma şekil değiştirmelerinin yüksek değerlere ulaşması durumunda zeminlerde göçme meydana gelmektedir (Özaydın, 2000).

Göçme yüzeyi boyunca göçmeye neden olan kuvvetler ile göçmeyi engelleyen ve göçmeye karşı koyan kuvvetlerin karşılaştırılmaları ve bu göçmeye karşı bir güvenlik sayısının belirlenmesi başta şevlerin stabilitesi olmak üzere temellerin taşıma gücü, istinat duvarlarında meydana gelen yanal toprak basınçlarının belirlenmesi gibi bütün stabilite problemlerinde yapılmaktadır. Burada göçmeye karşı gelen kuvveti olası göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma mukavemeti oluşturmaktadır.

Gerilme – şekil değiştirme davranışları ve kayma mukavemeti parametreleri zemin tabakalarından alınan numuneler üzerinde gerçekleşen laboratuvar deney yöntemleri ile elde edilebilir. Serbest basınç, kesme kutusu, üç eksenli basınç ve basit kesme deneyleri en çok kullanılan laboratuvar deney yöntemleridir. Bu deneylerde en dikkat edilmesi gereken kural, deney koşulları ile arazi koşulları arasında en yüksek benzerliği sağlamaktır.

Aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu arasındaki ilişkiler incelendiğinde, kayma gerilmesi deformasyonla birlikte göçme gerilmesine ulaşınca kadar artma eğilimi gösterip bir pik yapmaktadır. Pike ulaşmasının ardından azalma eğilimi gösteren kayma gerilmesi göçme durumundan sonra belirli bir seviyede artık deformasyonla da değişmeyerek sabit kalacaktır. Bu sabit kalan değere kalıcı ya da rezidüel kayma mukavemeti denilmektedir. Kayma yüzeyi boyunca su muhtevasında meydana gelen artış ve dane yönelimi zeminlerde kayma gerilmesinin kalıcı değere düşmesine neden olmaktadır. Kayma gerilmesi ve kayma deformasyonu ilişkileri normal konsolide veya gevşek kumlarda incelendiğinde ise gerilme deformasyon ilişkilerinde belirli bir pik değer aldığı görülmemektedir. Ancak, artan deformasyon ile birlikte kayma gerilmesinin yönlendiği değer yine kalıcı kayma mukavemeti olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

Kalıcı kayma mukavemeti, bazen metreye varan büyük yer değiştirmeler sonucu meydana geldiğinden göçmeye neden olan mukavemet değeri değildir. Bundan dolayı geoteknik mühendisliğindeki kullanım alanları da sınırlıdır. Kalıcı kayma mukavemeti, önceden büyük kayma hareketlerinin meydana gelmiş olduğu göçme yüzeyleri içeren şevlerin stabilitesi ve fisürlü-sert kil zeminlerin oluşturduğu şevlerin stabilite analizlerinde önem kazanmaktadır (Mitchell, 1993; Mersi ve Shahien, 2003). Türkiye’de bulunan şevlerin büyük bir kısmının aşırı konsolide veya fisürlü killerden meydana geldiği göz önünde bulundurulduğunda ve özellikle ulaşım alanlarındaki bu şevlerde belirli bir süreden sonra önemli stabilite problemleriyle karşılaşılması kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin önemini göstermektedir (Önalp ve Arel, 2004). Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine etkileyen en önemli faktörler; efektif gerilme, zeminin minerolojisi ve kesme hızıdır (Mitchell, 1993).

Kesme kutusu, halka kesme ve üç eksenli basınç deneyleri zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan başlıca deney yöntemleridir. Drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde, numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı vardır. Bundan dolayı zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetlerini belirlemede kesme kutusu ve halka kesme deneyleri daha kullanışlıdır.

1.1 Amaç

Kalıcı kayma mukavemeti, aşırı konsolide kil zeminlerden oluşan şevlerin stabilitesi ve bu şevlerde yapılacak mühendislik yapı tasarımlarında önemi büyüktür. Bu çalışma ile aşırı konsolide kil zeminlerin tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin bulunması ve elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile başta likit limit, plastik limit ve plastisite indisi olmak üzere zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda; çeşitli bölgelerden gelen zemin numunelerinin kalıcı kayma mukavemet parametrelerini belirleyebilmek amacıyla tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri, farklı kil yüzdelere, likit limit ve plastisite indislerine sahip olan numuneler üzerinde 0.035 mm/dak değerindeki kesme hızıyla 100kPa, 200kPa ve 300kPa düşey gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Aktif hale geçmiş heyelanlardaki en düşük kayma hızı 0.0001 mm/dak (5 cm/yıl) ve en yüksek kayma hızı 0.35 mm/dak (50 cm/gün) olduğu göz önünde alındığında kesme hızı olarak 0.035 mm/dak değeri alınmıştır. Tüm kullanılan numuneler her düşey gerilme altında konsolidasyonunu tamamlayıncaya kadar bekletilmiş ve sonra da drenajlı olarak kesilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açıları ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda, kalıcı kayma mukavemeti açısını, zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olarak kolayca tahmin edebilmek amacıyla korelasyonlar geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar geçmiş çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde örselenmemiş numuneler kullanılmıştır. Zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla bir numune üzerinde halka kesme deneyi yapılmıştır. Halka kesme deneyleri izin verilen en düşük hız olan 20 mm/dak kesme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Fakat, halka kesme deneylerinde boşluk suyu basınçlarındaki değişim ölçülemediğinden toplam gerilmelere göre çalışma gerçekleştirilmiştir. Halka kesme deneyi rotasyonel dönme sayesinde numuneyi sınırsız kesme imkanı olması ve bu yüzden kalıcı kayma mukavemeti açısını daha doğru elde edilmesine yardımcı olmasına rağmen bu çalışma kapsamına alınmamıştır.

1.2 Kapsam

Deneysel olarak gerçekleştirilen bu çalışmada kil zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 24 set tekrarlı kesme kutusu deneyi, 15 set halka kesme deneyi yapılmıştır. Ancak, bu çalışmanın amacı kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile belirlenmesi ve geçmişteki tekrarlı kesme kutusu deney çalışması ile karşılaştırılması olduğu için halka kesme deneylerinden sadece bir tanesi çalışmada kullanılmış, diğer deneyler kapsam dışı bırakılmıştır. Çalışmada öncelikle zeminlerin kayma mukavemeti ve kalıcı kayma mukavemeti konuları hakkında çeşitli bilgiler verilmiş, bu konular üzerinde yapılmış olan önceki çalışmalar özetlenmiştir. Diğer bölümlerde ise gerekleştirilen deney yöntemi ve deneylerde kullanılan numuneler hakkında bilgilere değinilmiştir. Sonraki bölümlerde, yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinin sonuçları, bu sonuçların geçmişteki çalışma ile birlikte incelenmesi ve kalıcı kayma mukavemeti açılarının endeks özellikleri ile arasındaki ilişkilerin irdelenmesi yer almaktadır. Son bölümde ise genel sonuçlara yer verilmiştir.

2. ZEMİNLERDE KAYMA MUKAVEMETİ

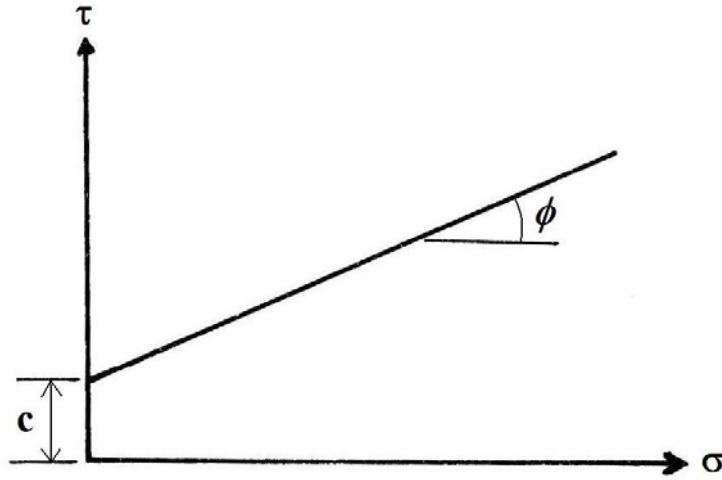
Zeminlerin kayması, kırılması, göçmesi ya da yenilmesi, ortamın uygulanan gerilmelere dayanma yeteneğinin ortadan kalkması olarak tarif edilmektedir. Diğer bir deyişle, zeminlerde göçme meydana gelebilmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma mukavemetinin aşılması gerekmektedir. Belirtilen kayma düzlemi her zaman en büyük kayma gerilmesi düzlemi olmayabilir. Kayma mukavemeti ise göçme meydana gelmeden zeminin karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanabilir (Özaydın, 2000).

Kayma mukavemeti kavramı, zeminlerin temel yada ana özelliği değildir. Ancak kayma mukavemeti arazide etkili olan koşullara bağlıdır ve zamana bağlı olarak değişim gösterebilir. Laboratuvarında yapılan deneylerde ölçülen değerler, deneylerin yapıldığı koşullara bağlı olmaktadır. Ayrıca, bazı çalışmalarda ölçülen bu değerler deneylerin süreçlerine de bağlı olabilmektedir (Head, 2006).

Kayma mukavemeti kavramını dört kategoride incelemek mümkündür.

1. Zamandan bağımsız, drenajın serbest olduğu kohezyonsuz zeminlerin (çakıl, kum gibi) kayma mukavemeti,
2. Kohezyonlu zeminlerin kayma sırasında drenaja izin veren, yeterince yavaş bir yerdeğiştirme hızına bağlı drenajlı kayma mukavemeti,
3. Aşırı konsolide killeri gibi büyük yerdeğiştirme hareketleri ve yavaş yerdeğiştirme hızı gerektiren zeminlerin uzun dönem veya kalıcı drenajlı kayma mukavemeti,
4. Drenajsız koşullar altında bulunan çok yumuşak kohezyonlu zeminlerin kayma mukavemeti.

Göçmeye neden olan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önünde bulunduran birçok hipotez geliştirilmiştir. Bu hipotezler içerisinde en basit, en bilinen ve uygulamalarda en çok kullanılan hipotez Mohr - Coulomb göçme hipotezidir (Özaydın, 2006)



Şekil 2.1 : Mohr-Coulomb göçme hipotezi, doğrusal zarf

Bu hipoteze göre zeminlerin kayma mukavemeti Şekil 2.1’de gösterilen zarf ile belirtilmektedir. Normal gerilmeler (σ) yatay eksenle gösterilirken kayma gerilmeleri (τ) ise düşey eksenle gösterilmektedir. Bu şekilde ifade edilen göçme zarfının altında kalan gerilme durumları için göçme meydana gelmezken bu göçme zarfına ulaşıldığında ise zeminlerde göçme meydana gelmektedir. Göçme zarfının üzerinde herhangi bir gerilme durumu bulunmamaktadır. Doğrusal zarfın düşey eksenini kestiği nokta kohezyon (c) olarak tanımlanmakta, yatay ile yaptığı açı ise kayma mukavemeti açısı “ ϕ ” olarak tanımlanmaktadır. Kayma mukavemetini veren bağıntı ise;

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

olarak belirtilmektedir. Kohezyon olarak ifade edilen “ c ” ve kayma mukavemeti açısı olarak tanımlanan “ ϕ ” değerleri, kayma mukavemeti parametreleri olarak adlandırılırken, kayma mukavemeti ise “ τ ” olarak gösterilir. Tanımlanan bu parametreler belirli bir zemin için sabit değildirler. Deney sırasında yapılan yüklemelere ve drenaj şartlarına göre değişim göstermektedirler. Zeminlerin boşluklu bir yapıya sahip olduğu ve dane yüzeylerinin bir düzlem olmadığı bilinmektedir. Danelerin birbirlerinin hareketine engel olacak şekilde ve konumda bulunmaları (kilitlenme etkisi) “ ϕ ” değerinin sürtünme açısı dışında başka anlamlar da yüklemektedir. Bundan dolayı zeminlerde “ ϕ ”nin “sürtünme açısı” tanımlaması yerine “kayma mukavemeti açısı” tanımlaması kullanılmalıdır (Mitchell, 1993).

2.1 Kumların Kayma Mukavemeti

Kohezyonsuz veya iri daneli olarak nitelendirilen kum zeminlerde en belirgin özellik sistemde yerçekimi yani kitle kuvvetlerinin hakim olmasıdır. Sürtünme kumlarda birincil derecede etkin olmaktadır. Kum zeminlerde kohezyon parametresi sıfır olarak alınmaktadır. Bu nedenle kum zeminler için kayma mukavemeti bağıntısı;

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

olarak belirtilmektedir. Kumlarda drenajlı koşulların geçerli olduğunu düşünmek gerçekçi bir yaklaşım olmaktadır. Bunun nedeni, yükleme sırasında boşluk suyunun rahatlıkla zemin içerisinden çıkabilmesidir. Böylece boşluk suyu basıncında da herhangi bir artış meydana gelmemektedir. Sonuç olarak, kumların arazi yüklemeleri altında davranışları incelenirken drenajlı kayma mukavemeti açısının bulunması yeterli olmaktadır. Kayma mukavemeti açısı da laboratuvarında yapılan kesme kutusu veya üç eksenli basınç deneyleri ile bulunmaktadır. Kum zeminlerin kayma mukavemeti açısını (ϕ) etkileyen faktörler;

- Dane biçimi: Yuvarlak danelerden oluşan zeminlerin kayma mukavemeti açısı köşeli danelilerden biraz daha düşük olmaktadır.
- Dane çapı dağılımı: Uniform kumların sahip olduğu kayma mukavemeti açısı iyi derecelenmiş zeminlerinkinden daha düşük değerdedir.
- Kum zeminlerin sıklık derecesi: Boşluk oranı azaldıkça yani yoğunluk arttıkça kayma mukavemeti açısının değeri artmaktadır.
- Danelerin mineral yapısı: Daneler arası sürtünmeyi etkilemekle birlikte çoğu tabii kumlar için oldukça dar aralıkta değiştiği kabul edilmektedir.
- Su etkisi: Zeminlerin kuru veya su altında olması kayma mukavemeti açısının değerini çok az etkilemektedir.

Bütün belirtilen bu unsurlar göz önüne alınarak, laboratuvarında yapılacak olan deneyler sonucunda elde edilecek kayma mukavemeti açısının doğru olabilmesi için deney numunesi ile arazi sıklığının aynı olması gerekmektedir. Bunun nedeni, sıklık derecesine bağlı olarak kayma mukavemeti açısı geniş bir aralıkta değişmesidir (Özaydın, 2000).

2.2 Killerin Kayma Mukavemeti

Arazi koşulları altında geçerli olacak şekilde killerin kayma mukavemetinin belirlenmesi kumlara oranla daha zor ve karmaşık bir sorun olarak belirmektedir. Kayma mukavemeti konusunda killeri kumlardan ayıran en önemli özelliklerin kumların yüksek geçirimliliğe sahip olması ve killerde jeolojik geçmiş etkilerinin daha ağır basması olduğu belirtilmektedir. Arazideki kil tabakalarının suya doygunluk derecesi, başlangıç gerilme durumu ve gerilme tarihçesi ile kayma gerilmelerinin oluşması sırasında geçerli yükleme ve drenaj koşulları, dane boyutlarının mikroskobik boyutlara sahip olması kayma mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca gevşek kumlarla normal konsolide killer ve sıkı kumlarla da aşırı konsolide killerin kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişkilerin birbirleriyle paralellik gösterdiği belirtilmektedir (Özaydın, 2000).

Kilin su muhtevası, kilin kıvamı, efektif gerilme düzeyi, kil yüzdesi, daneler arası çekme veya itme, kesilme hızı, çimentolanma, alınmış numunenin kalitesi, gevreklik, ortamın anizotropluğu, kullanılan ölçüm teknikleri, mineraloji, dane boyutu ve şekli, kilin absorbe ettiği su miktarı, kil minerallerinin içerdiği suyun kimyası gibi birçok faktör killeri kayma mukavemetini önemli derecede etkilemektedir. Kil zeminlerde yapılacak stabilite analizleri ve yapı tasarımları sırasında bu faktörler göz önüne alınmalı ve kayma mukavemeti ona göre belirlenmelidir.

Belirli bir kil çeşidi için, yapılan kesme deneylerinde kayma mukavemetini etkileyen çok önemli 3 faktör bulunmaktadır. Bunlar;

- 1.Su muhtevası,
- 2.Doygunluk derecesi (tam doymuş veya kısmen doymuş),
- 3.Zeminin permeabilitesine bağlı olarak kayma deformasyonunun hızı. Hızlı (drenajsız), yavaş (drenajlı).

olarak sıralanabilmektedir.

Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde kayma deformasyonunun artmasıyla kayma gerilmesi ilk önce artarak belirli bir pik değere ulaşır. Ardından kayma gerilmesi azalarak belirli bir seviyeye ulaşır ve artık kayma deformasyonu da değişmeyen sabit bir değer alır. Bu sabit değer, kil zeminlerin kalıcı veya rezidüel kayma

mukavemeti değerini oluşturmaktadır. Kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki normal konsolide kil zeminlerde incelendiğinde kayma gerilmesinin artan deformasyon ile birlikte belirli bir pik değere ulaştığı görülmemekte ve kayma gerilmesinin yönlendiği değer kalıcı kayma mukavemeti olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

Zeminler eğer arazide yeraltı suyu tabakası altında yer alıyor ise suya doğgun olmaktadır. Ayrıca, yer altı suyu tabakasının üzerinde bulunan kohezyonlu zeminlerin belirli bir yüksekliğe kadar kapilarite etkisiyle doğgun hale geldiği bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı, geoteknik mühendisliğinde meydana gelen problemlerin çoğunda suya doğgun kil zeminlerin davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Arazide bazı tabii zemin tabakalarının, sıkıştırılmış toprak dolgularının tamamen suya doğgun değildir ve bu tür zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi oldukça zordur. Suya doğgun olmayan bu tür zeminlerin kayma mukavemeti zarfı genelde bütün gerilme seviyeleri için doğrusal olmamaktadır. Bu nedenden dolayı uygulama sırasında zarf, yaklaşık doğrularla gösterilerek kayma mukavemeti parametreleri bulunabilmektedir ( zaydın, 2000).

2.3 Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri ve gerilme - şekil değiştirme davranışları zemin tabakalarından alınan numuneler üzerinde yapılan çeşitli laboratuvar ve arazi deney yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan başlıca laboratuvar deney yöntemleri; serbest basınç, kesme kutusu, üç eksenli basınç ve basit kesme deneyleridir.

2.3.1 Serbest basınç deneyi

Dayanımı en basit yoldan ölçümü, zemin numunesinin düşey ekseninde basınç uygulayarak kırılmasıyla gerçekleşir. Silindirik zemin numunesinin yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulması serbest basınç deneyinde gerçekleşir. Bu deneyde, eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boyunun kısılması yani eksenel şekil değiştirmesi ölçülmekte ve gerilme şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Eksenel gerilmenin maksimum değeri veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri zeminin serbest basınç mukavemet değeri (q_u) değerini verir. Serbest basınç deneyini özel bir UU (konsolidasyonsuz

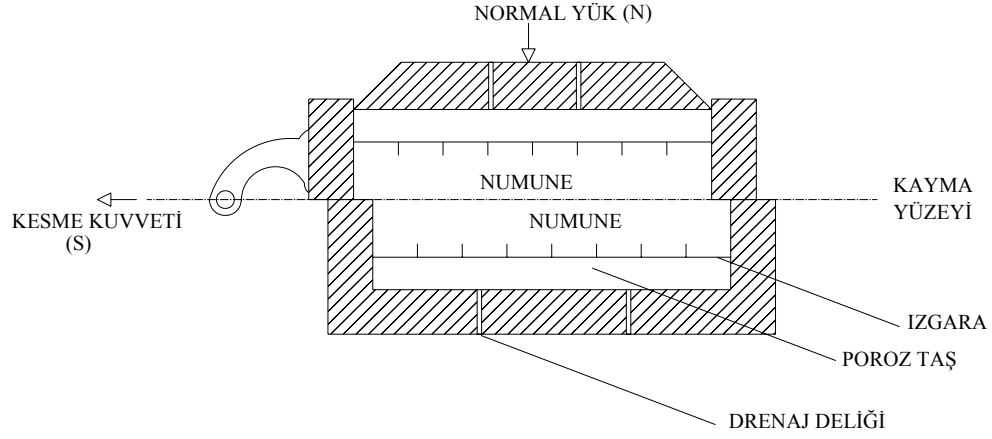
drenajsız) deneyi olarak görülebilir. Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yanal destek olmadan kendiliğinden dik olarak ayakta durabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde yani sadece killi zeminler üzerinde uygulanabilen bir deney yöntemidir. Bu nedenden dolayı kum zeminlerde uygulanmaz. Drenaj koşullarının deney sırasına kontrol edilemediğinden dolayı zeminin drenajsız kayma mukavemetinin hızlı yükleme yapılarak elde edildiği kabul edilir. Eksenel yükleme sırasında boşluk suyu basıncını ölçmek ve eksenel yüklemeye önce zemini konsolide etmek mümkün değildir. Ancak bütün belirtilen olumsuz ya da kısıtlayıcı yönlerine karşın zeminlerin drenajsız kayma mukavemetlerini belirlemede en çok kullanılan deney yöntemlerinden bir tanesidir. Serbest basınç deneyi ile drenajsız kayma mukavemeti, c_u ;

$$\tau = c_u = \frac{q_u}{2} \quad (2.3)$$

bağıntısı yardımıyla bulunabilmektedir. Bu ifadede “ q_u ” zeminin serbest basınç mukavemeti değeridir (Özaydın, 2000).

2.3.2 Kesme kutusu deneyi

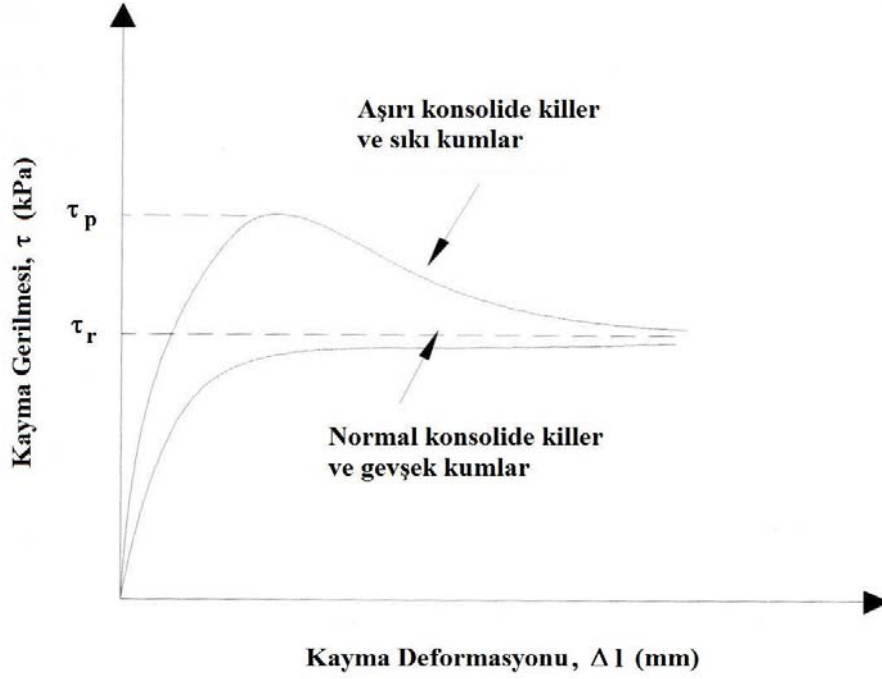
Laboratuvar deney yöntemleri içerisinde en eski ve en çok kullanılan yöntemlerden biri doğrudan kesme deneyidir. Dikdörtgen kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içerisine yerleştirilen zemin numunesi sabit düşey yük altında konsolide edilir ve uygulanan sabit bir kesme kuvveti altında kutunun üst parçası sabit dururken alt bölümü yatay bir düzlem üzerinde hareket ederek numunenin ortasından geçen düzlem boyunca kesilmeye ya da diğer bir deyişle kaymaya zorlamaktadır. Bu işlem, değişik düşey yükler için tekrarlanarak zeminin göçme zarfı elde edilir. Kesme kutusu deneyinde numuneyi kesme hızı zeminin arazideki drenaj şartlarına göre seçilir. Yüksek geçirimsizliğe sahip olan kum ve çakıl gibi iri (kaba) daneli zeminler özel durumlar (deprem yükleri gibi) haricinde uygulamalarda drenajın sağlanmasıyla boşluk suyu basınçlarının sönmüneceği kabul edilmektedir. Düşük permeabiliteye sahip olan kil ve silt gibi zeminlerde kısa zamanlı stabilite analizlerinde toplam gerilmelere göre, drenajın sağlanacağı kabul edilerek uzun zamanlı stabilite analizlerinde ise efektif gerilmelere göre çalışılmalıdır (Mitchell, 1993).



Şekil 2.2 : Kesme kutusu (Önalp, 2007)

Zeminlerde göçme, kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişkide birim deformasyona karşılık gelen gerilme değeridir. Birim deformasyon yaklaşık %15 - %20 gibidir. Ancak, kayma gerilmesi belirtilen bu deformasyondan önce bir pik değere ulaşıyor ise o zaman buradaki kayma gerilmesi değerinde zeminin yenildiği ya da göçtüğü kabul edilebilmektedir.

Normal konsolide killerde veya gevşek kumlarda kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisinde belirgin olarak bir pik mukavemet belirlenmemektedir. Kayma gerilmesinin grafikte yönlendiği değer kalıcı kayma mukavemet değeri olarak kabul edilmektedir. Aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisinde deformasyonun artmasıyla birlikte kayma gerilmesinin öncelikle bir pik değere ulaşır. Daha sonra azalma eğilimi göstermekte ve belirli bir değerden sonra deformasyon artsa dahi değişmeyen sabit bir değer alır. Kayma gerilmesinin almış olduğu bu sabit değere kalıcı (rezidüel) kayma mukavemeti adı verilmektedir. Şekil 2.3’de normal ve aşırı konsolide zeminler için kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Normal ve aşırı konsolide zeminler için kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkisi

Kesme kutusu deneyinin birçok sakıncalı yönü bulunmaktadır. Zemin numunesi hangi hızla kesilirse kesilsin drenaj tamamen önlenememektedir. Bu durum, gerçek anlamda konsolidasyonlu – drenajsız (CU) deneyinin gerçekleştirilemeyeceği anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra kesme kutusu deneyinde boşluk suyu basıncı da ölçülememektedir. Göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması da kesme kutusu deneyinin sakıncalarından biridir. Kesme kutusunun diğer bir sakıncası ise kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmamasıdır. Bunun nedeni de numune sınırlarında oldukça fazla gerilme yoğunluğunun oluşmasıdır. Kesme işlemi sırasında zorlanan kayma yüzeyinin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmama ihtimali kesme kutusu deneyinin diğer bir sakıncalı yanıdır. Bütün bu sakıncalı yanlarına karşın kesme kutusu deneyi bilinen en eski ve günümüzde de çok yaygın olarak kullanılan laboratuvar deney yöntemidir.

2.3.3 Üç eksenli basınç deneyi

Üç eksenli basınç deneyi zeminlerin kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan diğer bir laboratuvar deney yöntemidir. Bu deney yöntemi, en çok gelişmiş yöntem olarak da bilinmektedir. Bunun nedeni arazi koşullarını laboratuvar ortamında en benzer

şekilde modelleyebilmesidir. Böylece kayma mukavemeti parametreleri gerçeğe yakın olarak belirlenebilir. Üç eksenli deney yönteminde, bir hücre içerisine silindirik biçimdeki zemin numunesi yerleştirilir. Deneyde, hücreye hava ya da genelde su basıncı yardımıyla numune üzerine hidrostatik bir basınç uygulanır. Numune etrafında bulunan lastik kılıf sayesinde hücre içerisinde bulunan olan zemin numunesinin sudan etkilenmesini ve suyla temasını önlemekte ve zemin numunesinin içine ve dışına ayrı ayrı basınçlar uygulanmasını sağlar. Eksenel gerilme, numune üzerindeki başlığa temas eden bir piston yardımıyla numuneye etkir. Drenaj eğer istenirse, numune alt ve üst başlıklara bağlı halde bulunan kanallar yardımıyla kontrol edilebilmektedir (Özaydın, 2000). Üç eksenli basınç deneyinde sağlanabilen koşullar, ölçülebilen ve kontrol edilebilen parametreler aşağıda belirtilmektedir;

1. Eksenel yükleme sırasında drenajsız veya drenajlı koşullar sağlanabilmektedir. Buna bağlı olarak 3 çeşit üç eksenli deney yöntemi bulunmaktadır. Bunlar;

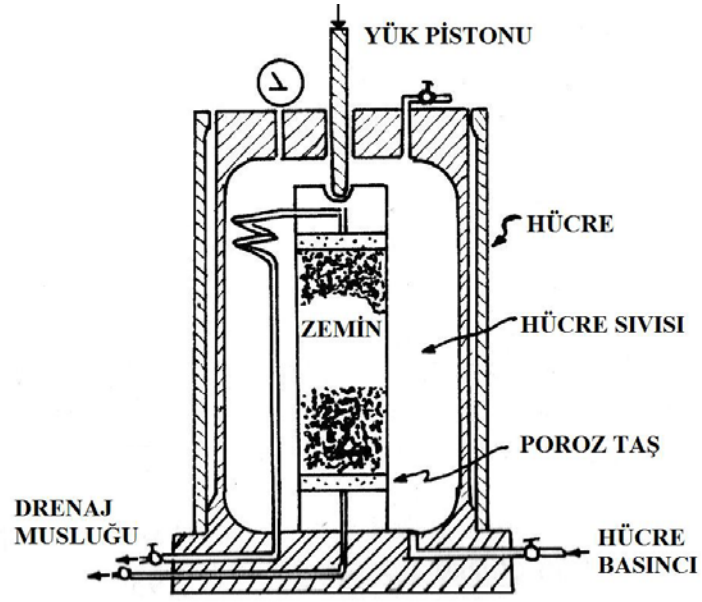
- Konsolidasyonsuz – Drenajsız Deneyler (UU) : Hücre basıncı uygulamasında ve eksenel yükleme yapılması sırasında zemin suyunun numuneden dışarı çıkmasına yani drenajına ve gerilmeler altında konsolidasyonuna izin verilmemektedir. Kesme ani olarak gerçekleşir. Bu nedenle bu tip deney “hızlı” olarak da nitelendirilir. Boşluk suyu basınçları konsolidasyon ve kesme aşamasında sistem dışına çıkamadığı için en yüksek düzeyde kalır. Yumuşak kil tabakası üzerine hızlı dolgu yapımı, kil zemin üzerine hızla yapılan temeller UU kesme problemlerine örnektir (Önalp, 2007).
- Konsolidasyonlu – Drenajsız Deneyler (CU) : Deneye başlamadan önce arazide altında bulunduğu çevre gerilmesine eş değer bir basınca tabi tutularak zemin numunesinin konsolide olmasına izin verildikten sonra eksenel yükleme yapılması sırasında zemin suyunun dışarı çıkmasına yani drenaja izin verilmemektedir. Arazi yüzeyine dolgu yapılmadan doğal kilin yerinde drenajsız kayma mukavemetini bulurken, su seviyesinde ani düşüş olmadan sürekli sızıntı altında konsolide olmuş barajların kil çekirdeğinin kayma mukavemeti belirlenirken, kil dolguların konsolide olduktan sonraki kilin kayma

mukavemetini bulunurken ve bunun gibi problemlerde bu deney türü kullanılabilmektedir (Önalp, 2007).

- Konsolidasyonlu – Drenajlı Deneyler (CD) : CU deneyinde olduğu gibi numune öngörülen basınçta konsolide edilmekte ve sonra da drenaj koşulları tümüyle sağlanarak uygulanan kesme gerilmelerinin boşluk suyu basıncını arttırmaması için numune yeterince düşük hızda kesilmektedir. Böylece elde edilecek parametreler sadece efektif gerilme türünden olacaktır. Tabakalar halinde yavaş yükselen dolgu altında yumuşak kilin kayma mukavemetinin belirlenmesi, sürekli sızıntı kuvvetleri etkisindeki barajların kil çekirdeğinin kayma mukavemetinin elde edilmesi ve kilde kazı veya doğal yamaçta drenajlı kayma mukavemetinin bulunması gibi problemlerde kullanılabilmektedir (Önalp, 2007). Bu deneyde zemin numunesi ilk olarak hücre içinde bulunan etrafındaki sıvının uyguladığı basınç (σ_3) maruz kalır. Bu basınç uygulandığı anda numunenin boşluk suyu basıncı (u_c) artar. Boşluk suyu basıncındaki artış boyutsuz parametre formunda tanımlanabilir. Skempton (1954)'ın boşluk basıncı parametresi “B” olarak tanımlanır ve doymuş zeminler için 1’dir (Das, 2002).

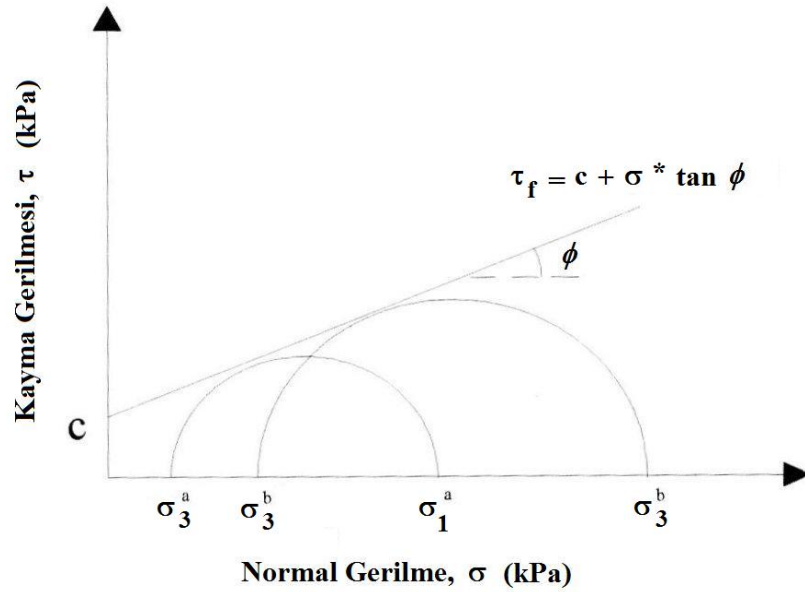
$$B = \frac{u_c}{\sigma_3} \quad (2.4)$$

2. Arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler, eksenel ve yanal gerilmeler uygulanarak gerçekleştirilebilir ve zemin numunesinin konsolidasyonu bu gerilmelerle arazi koşullarına benzer olacak şekilde sağlanabilir.
3. Zemin numunesinin suya doymuluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
4. Üç eksenli deney sistemine drenajsız olarak gerçekleştirilecek deneylerde zemin numunesinde oluşacak boşluk suyu basıncı değişimleri belirlenmesinin yanında drenajlı olarak gerçekleştirilecek olan deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir.



Şekil 2.4 : Üç eksenli deney hücresi (Özaydın, 2000)

Üç eksenli deney yönteminde göçme zarfı, kırılma anındaki asal gerilmelere göre çizilen Mohr dairelerinden elde edilir. Şekil 2.5’de görülen grafikteki Mohr dairelerine göre çizilen teğet yardımıyla kayma mukavemeti denklemi elde edilir.



Şekil 2.5 : Üç eksenli deney yöntemi için Mohr daireleri

2.3.4 Basit kesme deneyi

Kesme kutusunda numunenin deney aletinin yapısı nedeniyle belirli bir düzlemden kesilmesi sakıncasını gidermek için üst üste dizilmiş metal halkaların içine yerleştirilen silindirik biçimli numunenin öne itilmesi yoluyla kesilmesi ilk olarak 1940’lı yıllarda gündeme gelmiştir. Daha sonraları halkaların yerini bir kauçuk kılıfla

kaplanmış tel sargılı gömlek almıştır. Böylece numunede değişmez kesit ve üniform gerilme dağılımı sağlanır. Bu deney yöntemine basit kesme deneyi denilmektedir. Basit kesme deney yönteminin 3 çeşit modeli bulunmaktadır. Bunlar; İsveç, Norveç ve Cambridge modelleridir. İsveç modelinde numunenin çevresi üstüste dizilen ince çelik halkalar, Norveç modelinde kauçuk kılıfın içinde tel sargı, Cambridge modelinde ise numune çevresinde rijit plakalar kullanılmaktadır. Basit kesme deneyi drenaj, boy ve hacim kontrolü yanında statik ve dinamik yüklerle yapılabilmesi ve kayma düzlemi kenarlarında olası gerilme yığımlarını önlemesi nedeniyle tercih edilmektedir. Böylece, numuneler tam drenajsız koşullarda üniform olarak kesildiği gibi oluşan boşluk suyu basınçlarının ölçümü de sağlanmaktadır.

Belirtilen laboratuvar deney yöntemlerinden kesme kutusu deneyi aynı zamanda aşırı konsolide veya fisürlü killerin kalıcı kayma mukavemetini belirlemede kullanılabilmektedir. Düşük hızda gerçekleştirilen deney üç farklı gerilme altında ve her gerilme için yeterli çevrimler yapılarak gerçekleştirilir. Bu deneye tekrarlı kesme kutusu deneyi adı verilmektedir. Bu deney haricinde kalıcı kayma mukavemeti belirlemede kullanılan diğer bir deney türü ise halka kesme deneyidir. Halka kesme deney aleti, halka şeklindeki zemin numunesi üzerinde farklı gerilmeler altında büyük deformasyonlar yaratmaya izin vermektedir. Büyük deformasyonlara izin vermesi halka kesme deneyinin en önemli özelliğidir. Kalıcı kayma mukavemetini belirlemede drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı olması ve kalıcı kayma mukavemetinin de büyük deformasyonlar sonucu ortaya çıkması bu deney yönteminin kalıcı kayma mukavemetini belirleme açısından kullanışsız olmasına neden olmaktadır.

Kayma mukavemetini arazide yerinde belirleyebilmek için çeşitli deney yöntemleri vardır. Bunlar arazi deney yöntemleridir ve deneyler genellikle muayene çukurları veya sondaj kuyuları içerisinde gerçekleştirilirler. Kumlu zeminlerden ve yumuşak killerden örselenmemiş numune almanın zor olması arazi deneylerinin sonuçlarından yararlanmayı faydalı kılacaktır. Kumlu zeminlerde yapılan arazi deneylerinde kumun kayma mukavemeti açısı ile arazi ölçümleri arasında ampirik korelasyonlardan yararlanırken, killi zeminlerde drenajsız kayma mukavemeti doğrudan ölçülerek ya da korelasyon yolu ile belirlenmektedir (Özaydın, 2000).

3. ZEMİNLERİDE KALICI KAYMA MUKAVEMETİ

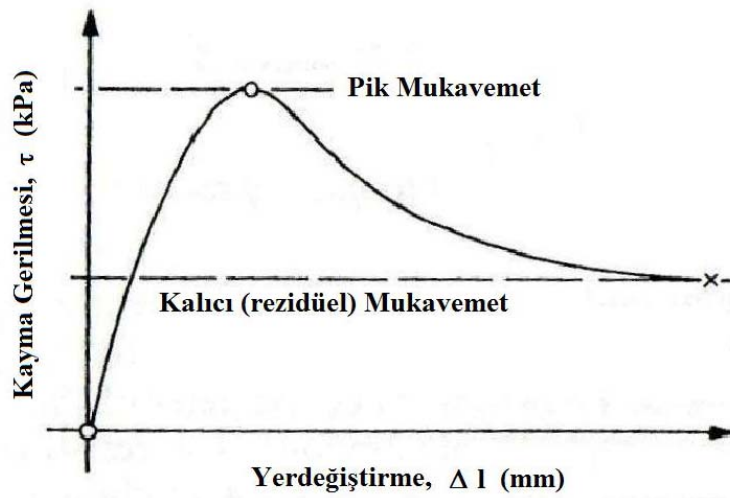
Kalıcı kayma mukavemeti, aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminler için belirlenmektedir. Geçmişte yapılmış olan çalışmalarda, pik değerlere göre yapılan uzun süreli stabilite analizlerinde güvenli olduğu düşünülen şevlerin belirli bir zaman sonra göçtüğü gözlemlenmiştir ve göçmenin meydana gelmiş olduğu şevler üzerinde ortalama bir kayma gerilmesi değeri belirlenmiştir. Belirlenmiş olan ortalama değerlerin tasarım sırasında kullanılan pik mukavemet değerinden küçük olduğu görülmüştür. Bundan dolayı sonraki çalışmalarda laboratuvar deneyleri pik mukavemetin bulunmasıyla durdurulmamış ve deneylere devam edilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, kayma gerilmesinin deformasyonun artmasıyla aslında önce bir pik yaptığı sonrasında ise azalmaya başladığı gözlemlenmiş olup deformasyon ile değişmeyen sabit bir değer aldığı belirlenmiştir. Kayma gerilmesinin pik değerden sonra azalmasının nedenlerinden biri zemin numunesinde kesilen yüzeye suyun girmesi ve kesilen yüzeylerin ıslanarak cilalanma etkisini yaratmasıdır. Diğer bir neden ise zemin danelerinin yönelimidir. Daneler, numune aynı doğrultuda kesilmeye devam edildikçe kesme yüzeyine paralel olacak şekilde yönelmeye başlar. Bu nedenlerden dolayı kayma gerilmesi artan kayma yerdeğiştirmesiyle azalır. Belirli bir noktadan sonra kesilme işlemine devam edilse de kayma gerilmesi artık yerdeğiştirmeye değişmeyen sabit değere ulaşır. Bu sabit değere kalıcı kayma mukavemeti denir (Skempton, 1964). Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde kayma mukavemetinin zamanla azalarak kalıcı değere ulaşması ani göçmelere neden olabilmektedir (Mitchell, 1993). Bu tür zemin yapısının ülkemizde en çok rastlanan tür olması hem şev analizlerinde hem de yapılacak mühendislik yapılarının tasarımında kalıcı kayma mukavemetinin önemini arttırmaktadır.

3.1 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Tanımı

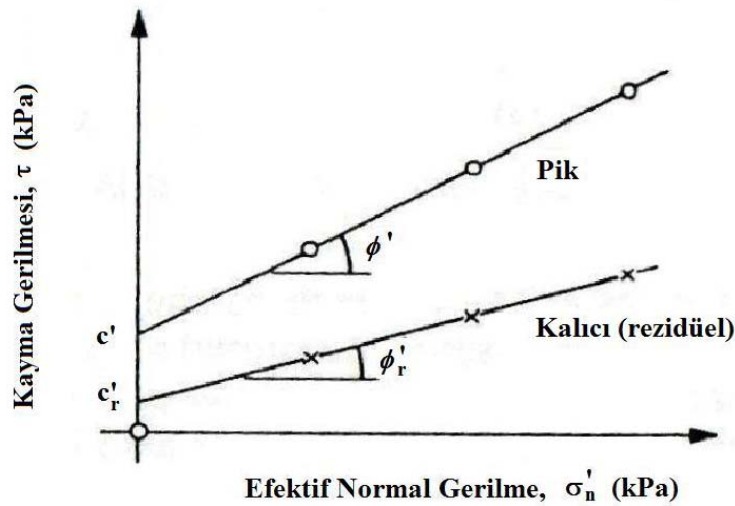
Kalıcı kayma mukavemeti, aşırı konsolide-fisürlü kil zeminlerde kayma gerilmesiyle kayma deformasyonu arasındaki ilişki incelendiğinde görülmektedir. Kayma gerilmesi deformasyonla birlikte göçme gerilmesine ulaşınca kadar artarak bir pik

yapar. Pike ulaşmasının ardından düşüşe geçen kayma gerilmesi göçme durumundan sonra belirli bir seviyede artan deformasyonla da değişmeyen sabit bir değer almaktadır. Kayma gerilmesinin almış olduğu bu sabit değere kalıcı veya rezidüel kayma mukavemeti adı verilmektedir.

Üç ya da daha fazla zemin numunesi üzerinde yapılan kalıcı kayma mukavemeti deneyleri sonucu Mohr-Coulomb zarfı pik ve kalıcı mukavemet koşulları için çizilebilmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti toplam gerilmelere göre değil efektif gerilmelere göre hesaplanmaktadır. Şekil 3.1 pik ve kalıcı mukavemetlerini, Şekil 3.2 ise pik ve kalıcı mukavemet zarflarını göstermektedir.



Şekil 3.1 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetleri (Head, 2006)



Şekil 3.2 : Pik ve kalıcı kayma mukavemetlerinin zarfları (Head, 2006)

Pik kayma mukavemeti için denklem;

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

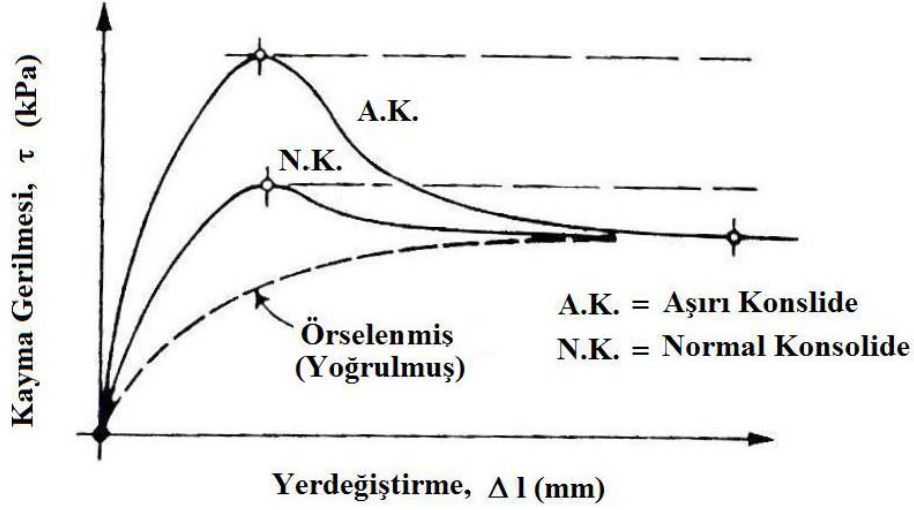
Kalıcı kayma mukavemeti için denklem;

$$\tau = c_r' + \sigma' \times \tan \phi_r' \quad (3.2)$$

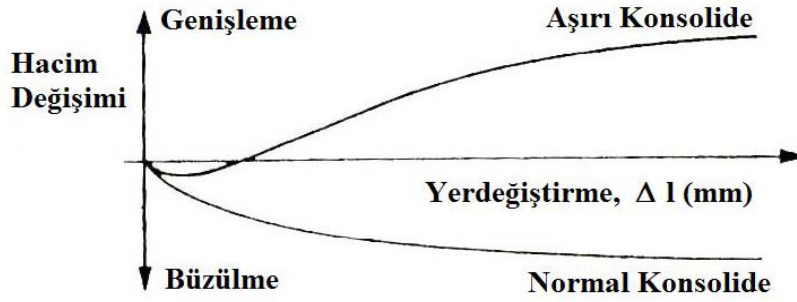
olarak belirtilmektedir. Bu denklemlerde bulunan ifadeler, drenajlı laboratuvar deneyleri ile elde edilen efektif mukavemet parametre değerleridir. (3.1)'de pik kohezyon (c_p') ve pik kayma mukavemeti açısı (ϕ_p') değerleri, (3.2)'de ise kalıcı kohezyon (c_r') ve kalıcı kayma mukavemeti açısı (ϕ_r')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

Şekil 3.3'de kayma mukavemeti ile kayma deformasyonu ilişkisi üzerindeki aşırı konsolidasyonun etkisi verilmiştir. Aşırı konsolide killeri için önkonsolidasyon efektif gerilmesi uygulanan normal gerilmeden daha büyük olabilir. Zeminlerin pik ve kalıcı mukavemet değerleri arasındaki fark, yüksek plastisite indisine sahip olan zeminlerde büyük olmasına rağmen bu fark normal konsolide zeminlerde küçüktür. Aşırı konsolide kil zeminler, normal konsolide zeminlerle karşılaştırıldığında küçük yerdeğiştirme değerlerinde daha büyük pik mukavemete sahiptir ve daha sonra mukavemet belirgin bir azalma gösterir ve kalıcı değere ulaşır. Kesme işlemi sırasında hacimdeki ve boşluk oranındaki değişim Şekil 3.4'de ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi aşırı konsolide zeminlerde hacim öncelikle artan yerdeğiştirme ile azalmakta yani büzülme görülmektedir. Daha sonra kesme işleminin devamında hacim genişlemeye başlar. Normal konsolide zeminlerde ise kesme işleminin tamamında hacimde azalma veya büzülme görülmektedir. Bunun nedeni aşırı konsolide zeminlerde önkonsolidasyon efektif gerilmesinin uygulanmakta olan normal gerilmeden daha büyük olabilmesi, normal konsolide zeminlerde ise bu koşulun söz konusu olmamasıdır. Bu duruma bağlı olarak normal konsolide zeminlerde yerdeğiştirmenin artmasıyla boşluk oranının azalmakta, aşırı konsolide zeminlerde ise boşluk oranının artmaktadır ve Şekil 3.5'de görülmektedir. Normal ve aşırı konsolide zeminler için Coulomb zarfları Şekil 3.6'de görüldüğü gibi düz çizgi ile çizilmişken kalıcı mukavemet zarfı ise kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Normal ve aşırı konsolide zeminlerin pik mukavemet zarfları paralel olmasına karşın aşırı konsolide zeminlerde genelde kohezyon oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 3.3'de aynı kil çeşidinin örselenmiş (yoğrulmuş) numunesi üzerinde yapılan drenajlı kesme kutusu

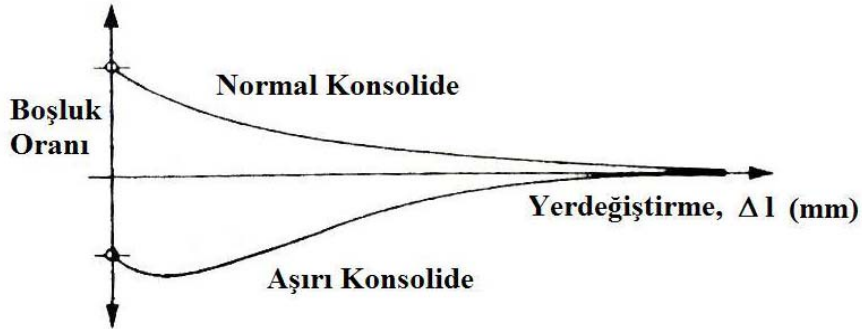
deneyi ile kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi arasındaki ilişkiyi vermektedir. Pik değere ulaşmadan, büyük deformasyonlar sonucu kalıcı değere ulaşır (Head, 2006).



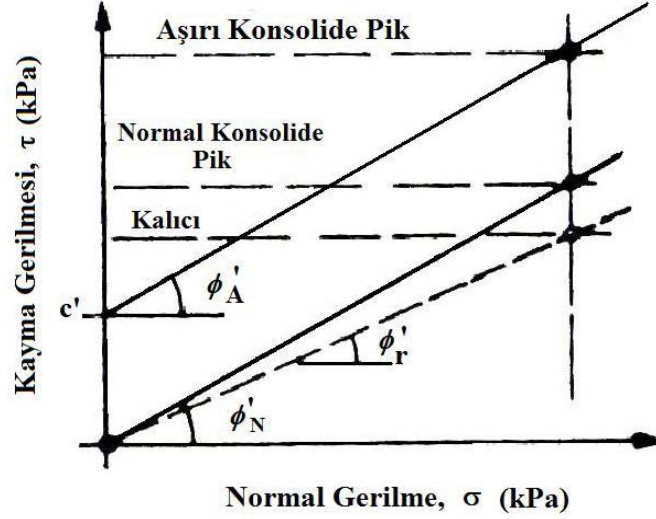
Şekil 3.3 : Kayma mukavemeti ile kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi üzerindeki aşırı konsolidasyonun etkisi (Head, 2006)



Şekil 3.4 : Kesme işlemi sırasında hacimdeki değişimi (Head, 2006)



Şekil 3.5 : Kesme işlemi sırasında boşluk oranındaki değişimi (Head, 2006)



Şekil 3.6 : Normal ve aşırı konsolide zeminler için Coulomb zarfları (Head, 2006)

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

3.2 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Önemi

İnce daneli veya kohezyonlu zeminlerde kayma mukavemetinin büyük kayma deformasyonlarından sonraki özellikleri ilk olarak 1930'lu yılların başlarında incelenmeye başlanmış ve bu yöndeki çalışmalar günümüze kadar gelmiştir. Kalıcı kayma mukavemetinin tanımı ve zeminlerdeki önemi ilk kez 1960'lı yılların başlarında ortaya konulmuştur. Geçmişte yapılan normal uygulamalarda kil şevlerin stabilite analizleri sırasında kayma yüzeyi olduğu düşünülen bölgeden alınan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen drenajlı kayma mukavemeti deneyleri sonucunda elde edilen pik mukavemet değerleri zeminin kayma mukavemeti

parametrelerini oluşturmaktadır. Fakat, belirtilen bu yöntemle güvenli olduğu düşünülen aşırı konsolide veya fisürlü kil şevlerde aniden göçme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şevlerde göçme meydana gelebilmesi için güvenlik sayısının “1” olması gerekmektedir. Skempton (1964) ’nın yapmış olduğu çalışmalar sonucunda göçme yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesinin, laboratuvarında deneyler sonucu elde edilen pik kayma gerilmesi değerinden daha küçük olduğu görülmüştür. Ortalama kayma gerilmesini hesaplayabilmek için göçme yüzeyinin yeri ve kayan zemin kitlesinin ağırlığının bilinmesi yeterlidir. Bu sonuçla birlikte, laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler sırasında kayma gerilmesinin pik değere ulaşmasıyla deneyler sonlandırılmamış ve deneylere devam edilmiştir. Böylece, kayma gerilmesinin artan kayma deformasyonu ile belirli bir seviyeye kadar azaldığı ve daha sonra artık deformasyonla da değişmeyen sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Ulaşılan bu sabit kayma gerilmesi değerine zeminin kalıcı veya rezidüel kayma mukavemeti adı verilmektedir.

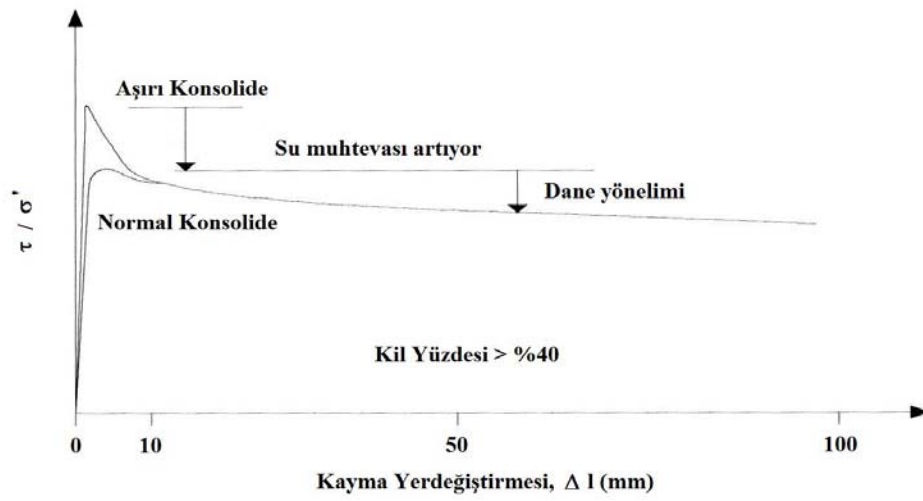
Önceden büyük deformasyonların meydana gelmiş olduğu kayma yüzeyleri içeren şevlerdeki mukavemet değerinin kalıcı kayma mukavemet değeri olduğunu Skempton (1985) yapmış olduğu çalışmalar sonucunda ortaya koymuştur ($\tau \approx \tau_r$). Ayrıca fisürlü kil zeminlerin oluşturduğu şevlerde göçmenin pik ile kalıcı değerler arasında bir kayma mukavemeti değerinde gerçekleştiğini ($\tau_r < \tau < \tau_p$) belirlemiş ve burada belirtilmekte olan mukavemet değerinin yoğrulmuş normal konsolide kilin pik mukavemeti olarak kabul edilebileceğini öne sürmüştür. Bunların dışında, ilk kez göçmenin meydana geldiği fisürlü kil şevlerde ise göçme anındaki kayma mukavemetinin pik değerde olduğunu belirlemiştir ($\tau \approx \tau_p$) (Skempton, 1985).

Aşırı konsolide veya fisürlü kil şevlerin stabilite analizlerinde kayma mukavemeti değerinin zamanla azalarak kalıcı kayma mukavemet değerine düştüğü ve bunun ani göçmelere neden olabileceği bilinmeli, varolan göçme yüzeylerindeki kayma mukavemeti değerinin, kalıcı kayma mukavemetinin büyük deformasyonlar sonucu meydana gelmesinden dolayı kalıcı değerde olduğu veya gittikçe kalıcı değere yaklaştığı yapılacak her türlü stabilite analizleri ve tasarımlar sırasında dikkate alınmalıdır (Mitchell, 1993). Kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki normal konsolide yada gevşek kum zeminlerde incelendiğinde gerilme-deformasyon ilişkisinde belirli bir pik değer aldığı görülmemektedir. Fakat, artan

deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin yönlenmiş olduğu değer yine kalıcı kayma mukavemeti olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

3.3 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Mekanizması

Kil yüzdesi yüksek olan (kil yüzdesi > %40) zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde, normal konsolide zeminlerin kayma mukavemetindeki düşüş tek kademedir, fisürlü veya aşırı konsolide zeminlerin kayma mukavemetindeki düşüş iki kademedir oluşmaktadır. Belirtilen bu durum aşağıdaki Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

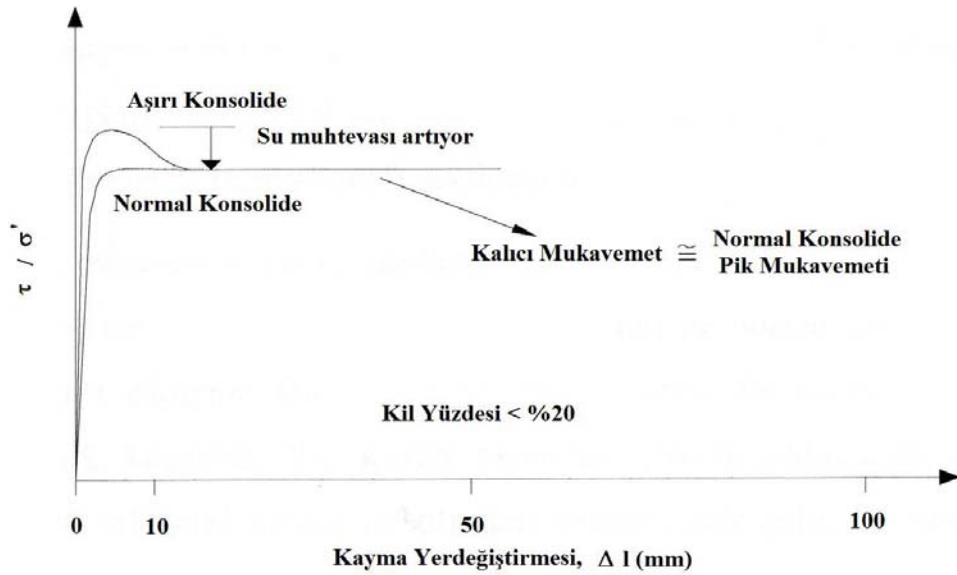


Şekil 3.7 : Kil yüzdesi yüksek zeminlerin efektif normal gerilme altında kayma mukavemetleri (Skempton, 1985)

Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerin kayma mukavemetindeki iki kademe halinde gerçekleşen düşüşlerden ilk kademesi küçük deplasmanlarda su muhtevasında meydana gelen artıştan meydana gelir. Buradaki su muhtevasındaki artış dışarıdan ilave edilen ekstra su miktarı değil, mevcut suyun kesilen yüzeylere girmesidir. Su, kesilmiş yüzeyleri ıslatarak cıalanma etksi yaratmaktadır. Bu etki nedeniyle kayma mukavemetinde ilk kademedeki düşüş oluşur. İkinci kademe ise meydana gelen deplasmanların büyük olması sonucu yassı kil minerallerinin kayma yüzeyine paralel olarak dane yönelimi oluşturmasıyla meydana gelir. Dane yönelimi kesilmekte olan yüzeyler arasındaki sürtünme gerilmesini azaltır. Böylece kayma mukavemetinde ikinci kademedeki azalma görülmektedir. Daha sonrasında kayma gerilmesi kayma deformasyonu ile değişmeyen sabit bir değer almaktadır (Skempton, 1985).

Kil yüzdesinin yaklaşık %20-%25 arasında değişen ve yassı şeklindeki kil minerallerine sahip zeminlerde dane yönelmesi gerçekleşmektedir. %50 kadar kil yüzdesine sahip zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti kil danelerinin kayma sürtünmesi tarafından kontrol edilmektedir. Bu kil yüzdesinin artması durumunda, etki daha az olur (Skempton, 1985).

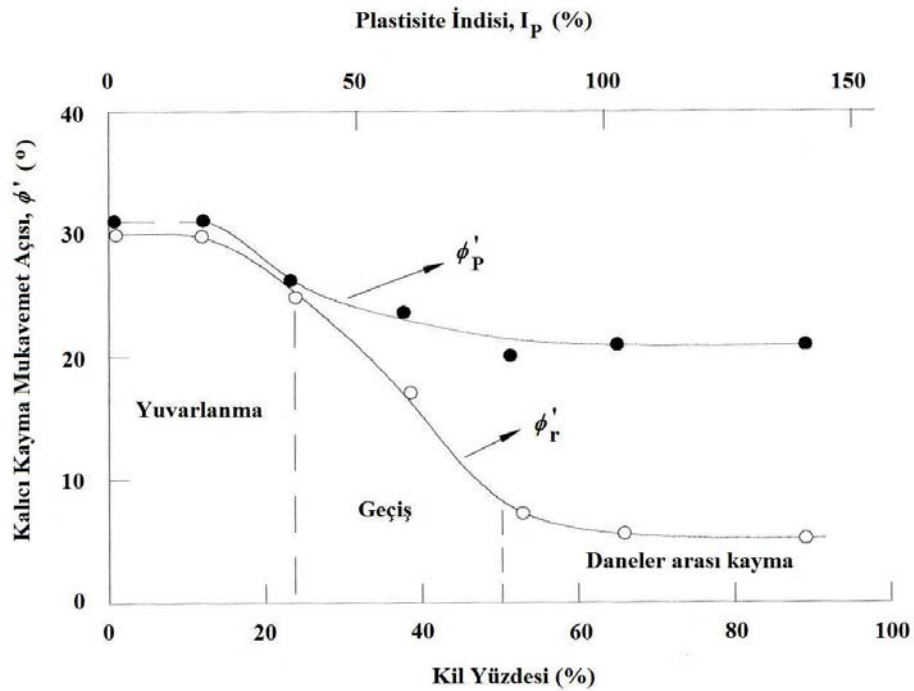
Zeminlerde kil yüzdesinin düşük değerlerde olması ya da başka bir deyişle zeminlerin kil yüzdesi %20-%25 değerlerinden daha az bir değere sahip olması durumunda ikinci kademe mümkün olduğunca dikkate alınmaz. Bu durumda kayma mukavemeti silt ve kum daneleri tarafından kontrol edilmektedir. Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerde pik kayma mukavemetinden kalıcı değere kadar meydana gelen düşüşün sebebi kesilmiş yüzeylerdeki su muhtevastaki meydana gelen artış olmaktadır. Dane yöneliminden kaynaklanan ikinci kademe nadiren olaya dahil edilmektedir. Normal konsolide kil zeminlerde kayma deformasyonu ile artış gösteren kayma gerilmesinde belirgin bir pik değer görülmemektedir. Bu tür zeminlerde büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetiyle yani kalıcı kayma mukavemetiyle pik mukavemet arasındaki fark çok küçük değerlerdedir. Açıklanan bu durum Şekil 3.8’de gösterilmektedir (Skempton, 1985).



Şekil 3.8 : Kil yüzdesi düşük zeminlerin efektif normal gerilme altında kayma mukavemetleri (Skempton, 1985)

Daneler arası sürtünmeye ve baskın olan dane yapısına bağlı olarak kalıcı kayma mukavemetinin davranışları incelenmiş ve üç tip farklı davranış şekli Lupini ve diğerleri tarafından belirlenmiştir. Bunlar, yuvarlanma tipi, geçiş tipi ve kayma tipi davranışlarıdır. Yuvarlanma tipi davranış baskın olarak hacimli, yuvarlak ve dolgun

danelerden oluşan zeminler için, geçiş davranışı belirli bir dane yapısının olmadığı durumlarda, kayma tipi davranış ise yüksek oranda yassı şekilli daneler içeren zeminler için geçerlidir. Yuvarlanma tipi davranışa sahip zeminlerde dane yönelimi oluşmamaktadır. Ayrıca bu tip zeminlerde kalıcı kayma mukavemet değeri yüksektir ve kalıcı kayma mukavemeti açısı daneler arasındaki sürtünme katsayısına bağlı değil, iri danelerin yapısına ve bağlanmalarına bağlı olmaktadır. Geçiş davranışı, kayma yüzeyinin farklı bölümlerinde kayma ve yuvarlanma tipi davranışlarını birlikte ihtiva eder. Kalıcı kayma mukavemetinde zeminin özellikleri yuvarlanma tipinden kayma tipine doğru geçiş şeklindedir. Bu tür zemin davranışında kalıcı kayma mukavemeti açısı zemin derecelenmesindeki küçük değişikliklere karşı son derece hassas olmaktadır. Kayma tipi davranışa sahip zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti açısı, daneler arası sürtünme katsayısına ve mineralojiye bağlıdır. Ayrıca, kayma tipi davranış ilk kayma yüzeyi oluştuğundan sonra meydana gelen gerilme durumundan fazla etkilenmemektedir. Gevreklik özelliği ilk kayma yüzeyi oluşumu sırasında birincil olarak baskın dane yapısının yönelimine bağlıdır (Lupini ve diğ., 1981). Bu durum, aşağıdaki Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9 : Pik ve kalıcı kayma mukavemeti açıları ile kil yüzdesi ve plastisite indisi arasındaki ilişki (Lupini, 1981)

İri daneli veya kohezyonsuz zeminlerde pik ile kalıcı sürtünme açıları arasındaki fark küçüktür. Bunun nedeni kohezyonsuz zeminlerin kalıcı sürtünme açısının daneler

arasında meydana gelen kaymadan çok, danelerin birbirleri üzerinden yuvarlanması ile meydana gelen yeni dizilimlerinden etkilenmesidir. Kum ve silt daneleri, kil yüzdesinin yüksek olması durumunda yuvarlanarak yeniden dizilimi önemsiz hale getirmektedir. Kaymanın sebebi kil daneleri arasındaki sürtünmedir. Fakat, kil yüzdesi %50'den fazla olan volkanik kökenli yüksek plastisiteli kil zeminler aynı zamanda yüksek oranda allophane gibi yassı olmayan kil mineralleri içermektedir. Bu durum kalıcı kayma mukavemeti açısının yüksek değerde olmasına neden olur. Böylece bu tür volkanik kökenli zeminler bu duruma uymamaktadırlar (Mitchell, 1991).

3.4 Kalıcı Kayma Mukavemetinin DeneySEL Yöntemlerle Belirlenmesi

Zeminlerin kayma mukavemeti parametrelerini bulmaya yarayan laboratuvar deneyleri benzer şekilde kullanılarak aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerin büyük kayma deformasyonlarından sonra meydana gelen kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini bulmada yardımcı olmaktadır. Kesme kutusu, halka kesme ve üç eksenli basınç deneyleri, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan başlıca laboratuvar deney yöntemleridir (Bromhead, 1983).

Aşırı konsolide zeminlerin kayma mukavemetleri, drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde artan deformasyonla birlikte önce artma eğilimi göstererek bir pik değere ulaşır ve ardından mukavemet düşüş eğilimi göstererek azalır. Ancak, drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan zemin numunesine uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı bulunması dezavantaj olarak görülmektedir. Çünkü, zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti büyük kayma deformasyonlarından sonra belirlenebilmektedir. Bu sebepten dolayı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemet değerlerini belirleme daha uygun olmaktadır (Craig, 1987).

Kesme kutusu deneyi uzun yıllardan beri kullanılmakta olan en eski ve en kolay laboratuvar deney yöntemidir. Ayrıca diğer deneylere göre anlaşılması rahat ve karmaşık olmayan bir deneydir. Bir zeminin kayma mukavemetini ölçmek amacıyla bilinen en eski çalışma Fransız mühendis Alexandre Collin (1846)'e aittir. En eski ölçümler İngiltere'de günümüzde gelişmiş halde bulunan kesme kutusu aletinin ilkel halini yapmış olan Bell (1915) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Bell, ilk kez

değişik zemin tipleri üzerinde kesme kutusu deneyi yapmış ve bu deneylerin sonucunu yayımlamış bir bilim adamıdır (Skempton, 1958).

Kesme kutusuna günümüzdeki modern halini 1932 yılında A. Casagrande Harvard(USA)'da vermiştir. Fakat detayları yayımlanmamıştır. Günümüzde, kesme kutusu deney aleti çok geniş yelpazede yerdeğiştirme hızına sahiptir. Hız, dakikada birkaç milimetreden 10000 kat daha yavaş olacak şekilde kadar değişebilmektedir.

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

Kesme kutusu deneyinde, belirli bir normal gerilme altında, uygulanan kesme kuvveti ile zemin numunesi üst parçası sabit, alt parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket edebilen ve numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca kayma mukavemeti belirleninceye kadar ileri-geri olacak şekilde kesilmektedir. Deney değişik normal gerilmeler altında tekrarlanarak zemin numunesinin mukavemet zarfını elde etmek mümkün olmaktadır. Böylece zeminin kalıcı kayma mukavemeti parametreleri bu zarf yardımıyla belirlenebilmektedir. Tekrarlı kesme kutusu deneyi, aşırı konsolide killerin kalıcı kayma mukavemetini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu deneyde, zemin numunesi belirli bir normal gerilme altında kalıcı duruma ulaşabilmek için gerekli hız ile yatay düzlemde kesilmektedir. Yeniden aktif hale geçmiş heyelanlardaki en yüksek hızın 0.35 mm/dak, en düşük hızın 0.0001 mm/dak olduğu göz önünde tutulursa kesme hızı olarak 0.035 mm/dak'yı seçmek uygun olmuştur. Değişik normal gerilmeler altında yeterli çevrimler yapıldıktan sonra zeminin mukavemet zarfı belirlenebilir. Kesme kutusu deney aleti ve kesilmiş numune sırayla Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.10 : KESME KUTUSU DENEY ALETİ



Şekil 3.11 : KESME KUTUSU DENEY ALETİNDE KESİLEN BİR NUMUNE

Halka kesme aleti, herhangi bir şekilde deneyi durdurmadan ve tekrar etmeden numuneyi sınırsız yerdeğiştirme sağlayarak kesen, kayma yüzeyinde temas eden alan sabit olana kadar da kesme işlemini devam ettiren bir laboratuvar deney aletidir (Şekil 3.2). İlk halka kesme aleti Casagrande tarafından tasarlanmış ve Hvorslev (1939) tarafından anlatılmıştır. Halka kesme deneyinde, belirli bir normal gerilme altında, sistemin izin verdiği hız ile halka şeklindeki zemin numunesi yatay düzlem boyunca belirli bir sınır olmaksızın kesilir (Şekil 3.13). Kesme kuvvetinde, düşey sürtünme kuvvetinde, düşey deplasman değerlerinde ve düşey gerilme değerlerinde meydana gelen değişim amplifikatörden incelenir. Çeşitli korelasyonlar yardımıyla gerçek değerler elde edilir. Kesme kutusundaki gibi farklı normal gerilmeler altında deney tekrarlanarak zemin numunesinin mukavemet zarfı elde edilir. Böylece deneyi gerçekleştirilen zeminin kalıcı kayma mukavemeti parametreleri bulunabilmektedir. Deney sonuçları öncelikli olarak heyelan yüzeyleri ve faylar gibi önceden oluşmuş

kayma yüzeyi içeren şevlerin kayma mukavemetini belirlemede kullanılmaktadır (ASTM D-6467, 2000).



Şekil 3.12 : Halka kesme deney aleti



Şekil 3.13 : Halka kesme deney aletide kesilmiş bir numune

Kesme kutusu deneyi ile halka kesme deneyi karşılaştırılırsa, kesme kutusu deneyinin; uzun süreli olması, kesme sırasında boşluk suyu basıncının ölçülememesi, göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması, kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması, numunenin ileri-geri olacak şekilde kesilmesinden dolayı sürekli aynı yönde kaymaya maruz bırakılmadığından yassı kil danelerinin tümünün kayma doğrultusuna paralel olarak yönelimi elde edilememesi (Bromhead ve Curtis, 1983) ve kalıcı mukavemetin büyük deformasyonlar sonucu elde edildiği göz önüne alındığında kesme kutusunun hareketinin kısıtlı olduğundan (yaklaşık 10-25 mm yerdeğiştirme sağlanabilir) deneyin bitmesiyle kutunun geriye alınma zorunluluğunun bazı sorunlar yaratması gibi bir çok faktör dezavantajlarını oluşturmaktadır. Öte yandan, numune çapının 500 mm'ye kadar büyütülebilmesi bu

deneye fisürlü killerin kayma mukavemeti ölçümünde önemli bir avantaj sağlamaktadır (Önalp, 2007). Halka kesme deneyi ise rotasyonel dönmeyi sağlaması ve bu sayede kesme işlemini sınırsız yapmasından dolayı çok avantajlıdır. Böylece bütün kil danelerinin kayma yönüne paralel olarak yönelimi sağlanmakta ve kalıcı kayma mukavemetinin elde edilmesi kısa sürede gerçekleşmektedir. Ayrıca kayma yüzeyinin kesme işlemi süresince sabit en kesit alanına sahip olması da diğer bir avantajdır (Stark, 1994). Tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile halka kesme deney yöntemi Skempton (1985) tarafından detaylı olarak incelendiğinde halka kesme deneylerinde hataların daha az oranda olduğu ve gerçek değerden daha küçük mukavemet değerleri verdiğini belirlemiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde yaptığı çalışmada ise sonucun gerçek değerlerden ortalama 0.5° daha büyük kalıcı mukavemet değerleri verdiğini bulmuştur. Ancak laboratuvarında mevcut olan halka kesme deney aletinin kesme hızı oldukça fazladır. Bu da halka kesme deneyi sonucunu etkileyebilmektedir. Yapılan karşılaştırmalar sonucu halka kesme deneyinin tekrarlı kesme kutusu deneyinden daha avantajlı olduğu görülse de bu çalışma kapsamına alınmamıştır. Kalibrasyonu ve kurulumu kolay, en eski deney yöntemlerinden biri olan tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi kullanılarak zeminlerin kalıcı mukavemeti belirlenmiştir.

3.5 Kayma Deformasyonu ile Kalıcı Kayma Mukavemetinin Değişimi

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

Geçmişte, zeminlerin kayma mukavemetlerinin kayma deformasyonu ile değişimini gözlemlemek için bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Çeşitli kesme kutusu ve halka kesme deneyleri zemin numuneleri üzerinde yapılarak kayma gerilmesinin deformasyon karşısındaki davranışı incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan halka kesme deney sonuçlarına göre zeminlerin kayma mukavemetinin kalıcı kayma mukavemeti

değerine genelde 100 mm' yi aşan yerdeğiştirmeler sonucunda ve bazen 500 mm'yi aşan yerdeğiştirmelerden sonra geçtiği Skempton (1985) tarafından belirlenmiştir. Ayrıca Skempton (1985) halka kesme deneylerini 600 kPa değerine kadar olan normal efektif gerilmelerde gerçekleştirmiştir. 600 kPa değerinden daha düşük efektif normal gerilmelerdeki değişik mukavemet durumları için gerekli olan yerdeğiştirme değerleri bozulmamış killeri yani kil yüzdesi %30'dan yüksek killeri için Çizelge 3.1'de belirtilmektedir. Bu çizelgeye göre kil yüzdesi %30'dan fazla olan aşırı konsolide zeminlerin pik mukavemete deplasman değerleri normal konsolide killerden daha düşük değerlerde ulaştığı görülebilmektedir. Ayrıca pik mukavemetin ardından kalıcı değere yaklaştıkça aşırı ve normal konsolide zeminlerin aynı miktarda deplasman yaptığı görülmektedir.

Çizelge 3.1 : 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
$\phi_r' + 1$ (Kalıcı mukavemete yaklaşan değer)	30-200	
ϕ_r' (Kalıcı)	100-500	

Zemine uygulanan yüksek normal gerilmelerde dane yönelmesi daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Dolayısıyla büyük gerilmeler altında küçük yerdeğiştirme değerlerinde kayma mukavemeti değeri kalıcı değerine ulaşmaktadır.

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine yaklaşan mukavemet değerleri (Çizelge 3.1'de gösterilen $\phi_r' + 1$ değeri gibi), kalıcı kayma mukavemetine erişebilmek için gerekli olan yerdeğiştirmenin yaklaşık %20-%50 arasında değişen deplasmanlar sonucu belirlenebilmektedir (Lupini, 1980).

Kesme kutusu veya halka kesme deneylerinde normal konsolide killerde pik kayma mukavemetleri daha ilerideki kayma hareketleri sonucunda oluşmaktadır. Su muhtevasında meydana gelen değişimler genelde 5-10 mm yerdeğiştirmeler sonucu tamamlanmaktadır. Aşırı konsolide veya fisürlü kil zeminlerin pik kayma mukavemetleri ise ortalama 1 mm mertebesindeki yerdeğiştirmeler sonucu belirlenebilmektedir (Petley, 1966).

3.6 Kalıcı Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini etkileyen başlıca faktörler; mineroloji, efektif normal gerilme etkisi, kesme hızının etkisi, zemin yapısı olarak sıralanabilmektedir. Bu faktörlerin kalıcı kayma mukavemetindeki etkileri aşağıda açıklanmıştır.

3.6.1 Mineralojinin etkisi

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

Kil daneleri arasında elektriksel çekim ve itki kuvvetleri oluşmaktadır. Bunun nedeni danelerin yüzeyinde ve su molekülleri ile kimyasal maddelerde birbirinden farklı elektriksel yüklerin bulunmasıdır. Bu kuvvetlerin şiddeti büyük ölçüde danelerin mineral yapısına bağlıdır. Su molekülleri, kil danelerinin yüzeyine elektriksel çekim kuvvetleri sonucu yapışmaktadır. Böylece dane yüzeylerinin absorbe su olarak tanımlanan su tabakası ile kaplanmasına sebep olur. Daneler arasında, absorbe su tabakaları ile, zeminin düşük su muhtevasına sahip olduğu durumlarda temas meydana gelmektedir. Ayrıca, su tabakalarının yüksek viskoziteye sahip olmasından dolayı danelerin birbirlerine göre hareketi zorlaşmaktadır. Daneler, zeminin su muhtevasının artış göstermesi durumunda birbirlerinden uzaklaşmakta ve absorbe su tabakaları arasında bağlantı veya temas ortadan kalkmaktadır.

Kil yüzdeleri, likit limitleri ya da plastisite indisleri ile kalıcı kayma mukavemet açısı aralarında bir ilişki ya da bir bağıntı belirleyebilmek isteniyor ise bu etmenlerin aralarında ortak olan ya da olmayan temel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Mersi ve Cepeda-Diaz, 1986).

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

3.5.1.1 Kıvam limitlerinin etkisi

Likit limit, zeminlerin katı kıvamdan sıvı kıvama dönüştüğü su muhtevası olarak bilinmektedir. Aynı zamanda likit limit, zemin bileşiminin suyu tutma kabiliyetinin de bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Zeminin sahip olduğu su muhtevası eğer likit limit değerinden daha büyük bir değere sahipse, bu durum zeminin bir sıvı gibi akışkan olmasına neden olmaktadır. İnce daneli bir zemine kırılmalara yol açmadan, yoğrularak istenilen şekil verilebiliyor ise o zeminin plastik bir kıvamda olduğu kabul edilmektedir ve zeminin plastik özelliğini koruduğu en düşük su muhtevasına da plastik limit adı verilmektedir. Plastisite indexi ise zeminin likit limiti ile plastik limiti değerleri arasındaki farka eşittir. İfade edilen bu kavramlar, killerin su muhtevasına bağlı olarak kıvamlarında meydana gelen değişimleri belirleyebilmek için Atterberg'in tanımladığı sınır su muhtevası değerleridir. Bu nedenle Atterberg sınır limitleri olarak da bilinmektedir. Aktivite ise plastisite indisi ile kil yüzdesi arasındaki orandır.

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

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

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

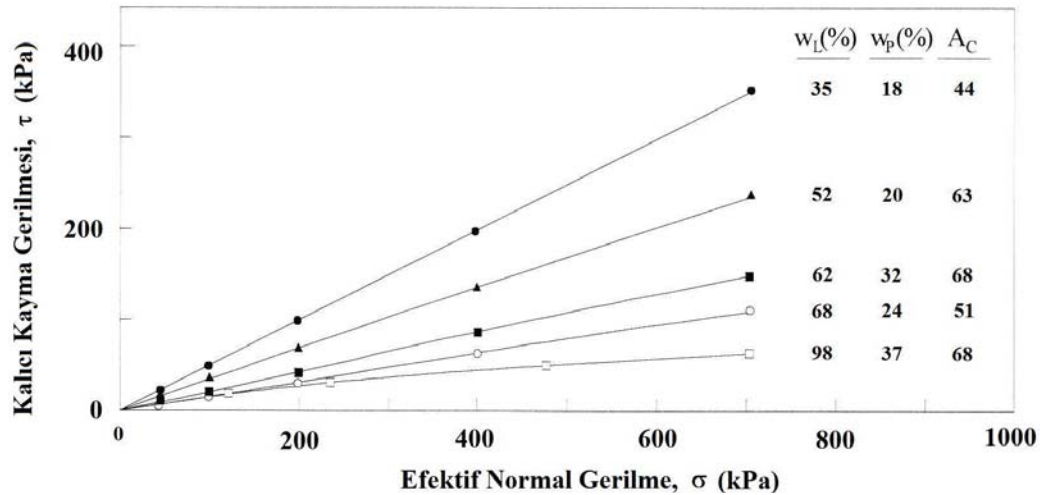
Dane boyutunun artması özgül yüzeyin azalmasına neden olur. Zeminlerde özgül yüzey hesabı, danelerin yüzeyleri herhangi bir geometrik şekle sahip olmamasından

dolayı pratikte hesaplanamamaktadır. Fakat, aynı hacmi dolduran iri daneli zeminlerin özgül yüzeyi ile ince daneli zeminlerin özgül yüzeyleri karşılaştırıldığında ince daneli zeminlerin özgül yüzeyi daha fazla olmaktadır.

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

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

Mineral	w_L (%)	w_p (%)	A
İllit	60-120	35-60	0.5-1.2
Kaolinit	35-100	20-40	0.3-0.5
Montmoillonit	100-900	50-100	1.5-7
Halloysit(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

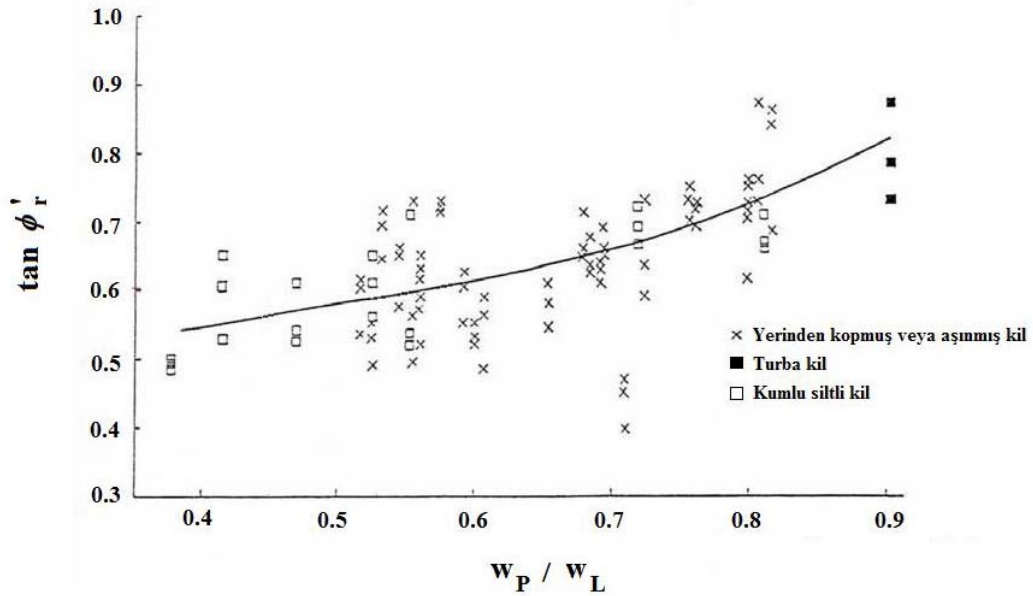


Şekil 3.14 : Kil minerolojisinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi (Stark, 1994)

Zeminin likit limiti ve aktivitesinin artmasıyla kalıcı kayma mukavemetinin Şekil 3.14’te görüldüğü üzere azalmakta olduğu görülmektedir. Stark (1994) yapmış olduğu çalışmada, zeminlerin likit limit ve aktivite değerlerinin kil mineralleri

çeşitlerine birer gösterge olduğunu ve bu nedenle dane şekli ve boyutu için de birer gösterge halini aldığını belirtmiştir.

R.E. Gibson (1953), T.C. Kenney (1959 ve 1967), B. Voight (1973), P.K. De ve B. Furdas (1973), J.K. Mitchell (1976), R.D Holtz ve W.D Kovacs (1985) ve A.W. Skempton (1985), zeminlerin (drenajlı arazi koşulları için) plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında bağıntı kurulabileceğini yapmış oldukları çalışmalarla ifade etmişlerdir. Bu çalışmalardan en önemlisi De ve Furdas (1973) tarafından gerçekleştirilmiştir. Güney Galler'den gelen aşırı konsolide zeminler üzerine yapılan çalışmalarda plastik limitin likit limite oranı (w_p/w_L) ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında bağıntı geliştirilmiştir. Şekil 3.11'de De ve Furdas'ın bağıntısı görülebilmektedir.



Şekil 3.15 : Güney Galler aşırı konsolide zeminlerinin w_p / w_L ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki bağıntı (De ve Furdas, 1973)

Şekil 3.15'te görüldüğü üzere datalar geniş olarak dağılıma sahiptir. Fakat, De ve Furdas (1973), Güney Galler aşırı konsolide zeminleri için kalıcı kayma mukavemet açısını ortalama 29° - 31° olarak önermişlerdir. Ancak plastisite indisi ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki ilişkiyi belirleyen bu çalışmalar yanlış sonuçlara sebep olabilir. Bunun nedenleri;

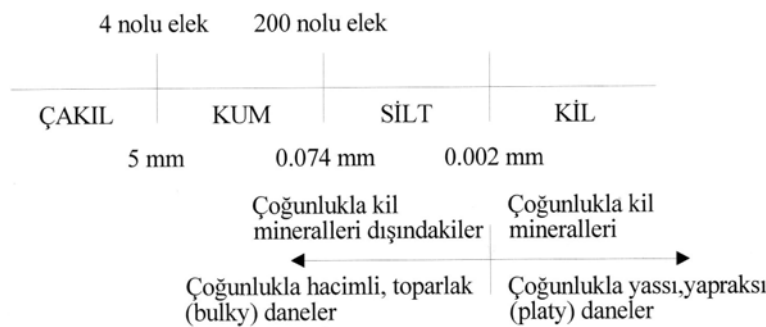
- Bütün çalışmalarda ortalama değerler baz alınmıştır.
- Drenajlı koşullar altında pik kayma mukavemeti ve kalıcı kayma mukavemeti için sürtünme mukavemeti unsurları karıştırılmıştır.

- Voight (1973)'un çalışması haricinde, diğer çalışmalarda farklı kil mineralojisine sahip zeminlerin mukavemet dataları birleştirilmiştir. Voight (1973) sadece montmorillonit kil zeminler üzerinde çalışmıştır.

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

3.6.1.2 Kil yüzdesinin etkisi

İnce daneli zeminlerin özellikle kil minerallerinin dane biçimlerinin kalınlıkları diğer boyutlarına göre çok az olan ince plakalar halinde oldukları bilinmektedir. Bu daneler çok küçük oldukları için biçimleri ancak mikroskop altında incelenebilir. Kil yüzdesi ile kil içeriği ifadelerinin ayrı anlamlar taşıdığı bilinmelidir. Bunun nedenini Mitchell (1993), her ne kadar killer, dane çapı 0.002 mm'den yani 2 μ m'dan ufak daneler olarak bilinse de bütün kil mineralleri 0.002 mm'den küçük olmadığını ve her kil olmayan minerallerinin de 0.002 mm'den daha büyük olduğu ifade edilse de bütün kil olmayan minerallerin 0.002 mm'den büyük olmadığını belirtmiştir. Yani, plastik özelliği göstermeyen ve 0.002 mm'den küçük boyutlarda olan danelerin bulunabileceğini ifade etmiştir. Kil minerallerinin zemindeki miktarını kil yüzdesiyle yani 0.002 mm'den daha küçük çaplı dane yüzdesiyle verildiğini ve bunun sebebinin, kil minerallerinin genellikle 0.002 mm'den daha küçük olduğunu Mitchell (1993) belirtmiştir. Ayrıca kil içeriği ifadesini ise dane boyutu göz etmeksizin zeminde bulunmakta olan kil mineralini ifade etmekte olduğunu belirtmiştir. Dane şekli ile dane çapı arasındaki ilişki Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16 : Dane şekli ile dane çapı arasındaki ilişki (Mitchell, 1993)

Mitchell (1993)'in dane şekli ile dane çapı arasında yapmış olduğu Şekil 3.16'da görüldüğü üzere 0.002 mm'den büyük çaplı danelerin genellikle kil mineralleri olmayıp hacimli ve toparlak danelerden oluştuğu ve 0.002 mm'den küçük çaplı danelerin ise genelde kil mineralleri olduğu ve minerallerin yassı şekilli oldukları görülmektedir.

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

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

3.6.2 Efektif normal gerilmenin etkisi

Kil yüzdesi yüksek olan zeminlerde, Hawkins ve Privett (1985) 'in birlikte yapmış oldukları çalışmalarda göçme zarflarında eğrilikler olduğu bulunmuştur. Ayrıca Hawkins ve Privett (1985), zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin plastisite indisi ve/veya kil yüzdesi gibi diğer parametrelerle ilişkilendirilen bağıntıların, sadece aynı efektif normal gerilmede göz önüne alınırsa ve bu gerilme düzeyi söz konusu olan problemlerle alakalı ise anlam taşıdığını ifade etmişlerdir. Az miktarda ince kil içeriğine sahip olan zeminlerde daha büyük eğrilik görülmesine karşın bu eğriliklerin sebebi tam olarak belirlenememiştir. Normal gerilme ne kadar yüksek olursa, kayma

bölgesi o kadar düz ve kenar-yüzey etkileşiminden yüzey-yüzey etkileşimine dönüşüm o kadar fazla olmaktadır. Zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti, temas alanı arttığında azalmaktadır. Böylece kalıcı göçme zarfı doğrusal olmamaktadır (Hawkins ve Privett, 1985).

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

3.6.3 Kesme hızının etkisi

Kesme hızı, kalıcı kayma mukavemetini etkileyen bir diğer faktördür. Diğer bir deyişle kesme veya kayma hızının etkisinin bilinmesi kalıcı kayma mukavemet çalışmalarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Çünkü, zeminlerde oluşması muhtemel kayma yüzeyleri çok farklı hızlardaki kesme etkisine maruz kalabilmektedir. Zeminler depremle uyarılan çok hızlı hareketlerden veya deprem yükleri altında çok yüksek kayma hızlarının etkisinden, heyelanlardaki çok yavaş hareketlere veya heyelanlardaki düşük kayma hızlarına kadar değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalar hızlı ve yavaş kesme hızı etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Lemos (1985 ve 2003), Suzuki ve diğ. (2001) ve Skempton (1985) yaptıkları çalışmalarla kesme hızının etkilerini incelemişlerdir.

Farklı kil yüzdesine sahip zeminler üzerinde Lemos (1985) yaptığı deneylerle yüksek kesme hızlarının kalıcı kayma mukavemetine etkisini incelemiş ve kil yüzdesine bağlı olarak kesme hızının üç farklı etki gösterdiğini ifade etmiştir. Elde etmiş olduğu sonuçlar;

- Kil yüzdesi %25'den daha az olan zeminlerde, kalıcı kayma mukavemet açısı kesme hızı arttıkça azalır (negatif hız etkisi) veya değişmez (nötr hız etkisi). Kil yüzdesi %25'den daha az olan bazı

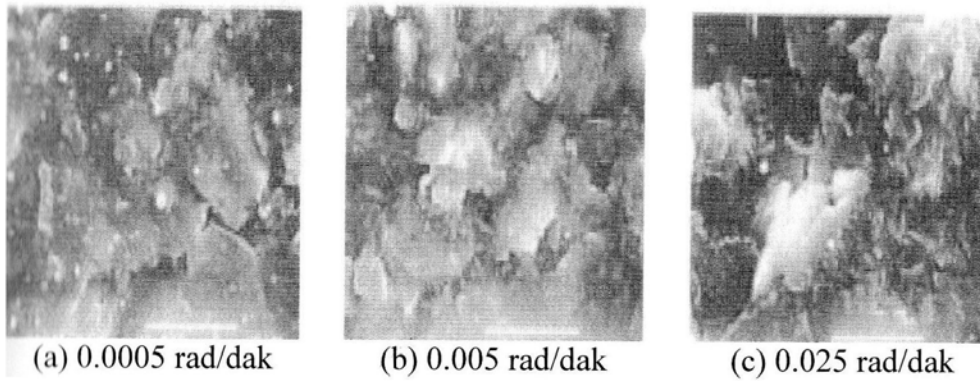
zeminlerde ise normal gerilme seviyesine bağılı olarak her iki etki de görülebılır.

- Kil yüzdesi %25-50 arasında olan zeminlerde kalıcı kayma mukavemeti açısı kesme hızı arttıkça azalmaktadır (negatif hız etkisi).
- Kil yüzdesi %50'den daha fazla olan zeminlerde kalıcı kayma mukavemet açısı kesme hızı arttıkça artar (pozitif hız etkisi) veya azalır (negatif hız etkisi) (Lemos, 1985).

100-400 mm/dak arasındaki yüksek kesme hızlarında Lemos (2003) yapmış olduğı deneysel çalışmalar sonucunda üç çeşit hızlı kalıcı kayma mukavemet değışimleri olduğunu belirtmiştir. Bu üç çeşit hızlı kalıcı kayma mukavemet değışimleri negatif, nötr ve pozitif olarak sıralanabilmektedir. Nötr veya negatif hız etkisi genellikle yuvarlanma tipi kayma davranışına sahip zeminlerde görülebilmektedir. Bu tür zeminler kil yüzdesinde meydana gelen değışimlere karşı çok hassastır. Ayrıca normal gerilmeye bağılı olarak her iki hız etkisini de gösterebilirler. Geçiş tipi kayma davranışı gösteren zeminlerde negatif hız etkisi altındadırlar. Diğer bir davranış olan kayma tipi davranış gösteren zeminlerde ise negatif veya pozitif hız etkisi gösterirler. Negatif hız etkisinin nedenleri hakkında Lemos (2003)'un yapmış olduğı çeşitli araştırmalar sonucu bir mekanizma belirlemiştir. Kayma yüzeylerindeki meydana gelen su muhtevastaki ve boşluk oranındaki artışa numunelerin hızla kesilmesi olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle zemin numunelerinde kayma mukavemetinde kalıcı düşmeler meydana gelmekte olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca kritik değerdan daha yüksek yer değıştirmelerde oluşan düşük kayma mukavemet değeri sürtünmeye veya büzülmeye bağılı oluşan efektif gerilmelere bağılı olmadığını ve sabit bir değeri olduğunu tanımlamıştır. Lemos (2003), kayma yüzeyinin hızlı kesme işleminin yavaşladığı veya durduğı zaman büzülme eğilimine girdiğini ve aşırı boşluk suyu basıncı oluştuğunu belirtmiştir. Ancak kayma yüzeyindeki düşük mukavemet bu etkene önemli olacak şekilde bağılı olmamaktadır. Hızlı kesme evresinin ardından devam etmekte olan yavaş kesme hızlarında da kayma yüzeyindeki düşük mukavemet aşırı boşluk suyu basıncı ortadan kalkana kadar devam etmektedir. Serbest suyun kayma yüzeyine girişı negatif hız etkisi görülebilmesi için önkoşulu oluşturmaktadır (Lemos, 2003).

Suzuki ve diğeri (2001), yapmış oldukları deneysel çalışmalarda zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine kayma yerdeğiştirmesi hızının etkisini belirleyebilmek için 0.02-2 mm/dak arasında farklı hızlarda çamurtaşı ve kaolin numuneler üzerinde halka kesme deneyleri gerçekleştirmişler ve hız etki katsayısını (α) belirlemişlerdir. Çamurtaşının ve kaolinin kalıcı kayma mukavemetinin kayma yerdeğiştirmesi hızına bağı olduğı gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarda belirlemişlerdir. Böylece kesme hızının zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine olan etkisini değerlendirmelerde hız etki katsayısının çok önemli bir etkisinin olduğunu ortaya koymuşlardır. Suzuki ve diğeri (2001), kalıcı kayma mukavemetindeki kesme hızının oluşturduğı değişimlerin kil minerallerinin çeşidine ve yapısına bağı olduğunu ifade etmişlerdir.

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



Şekil 3.17 : Farklı kesme hızlarında kaolinin belirlenen kalıcı durumları için elektron mikroskopundan görünümü

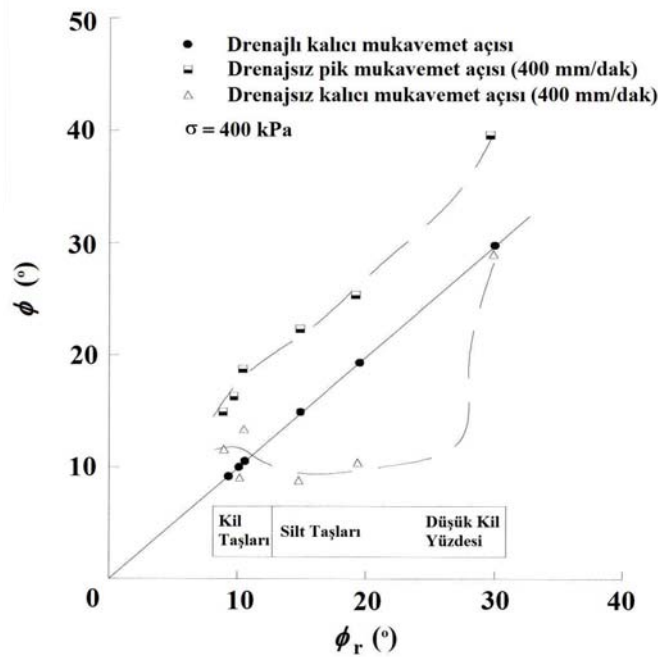
Skempton (1985), yavaş ve hızlı olacak şekilde değişik kesme hızlarında zemin numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri yaparak kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine olan etkisini incelemiştir. Yaptığı düşük hızlı (0.002-0.01 mm/dak) deneylerde mukavemet değişimlerinin dikkate alınmayacak değerlerde olduğunu belirlemiş ve kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine önemli derece etkisinin olmadığını ifade etmiştir. Bilindiğı üzere aktif halde bulunan toprak kaymalarında en düşük ortalama hızın 5 cm/yıl, en yüksek ortalama hızın 50 cm/gün değerleri civarındadır.

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

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

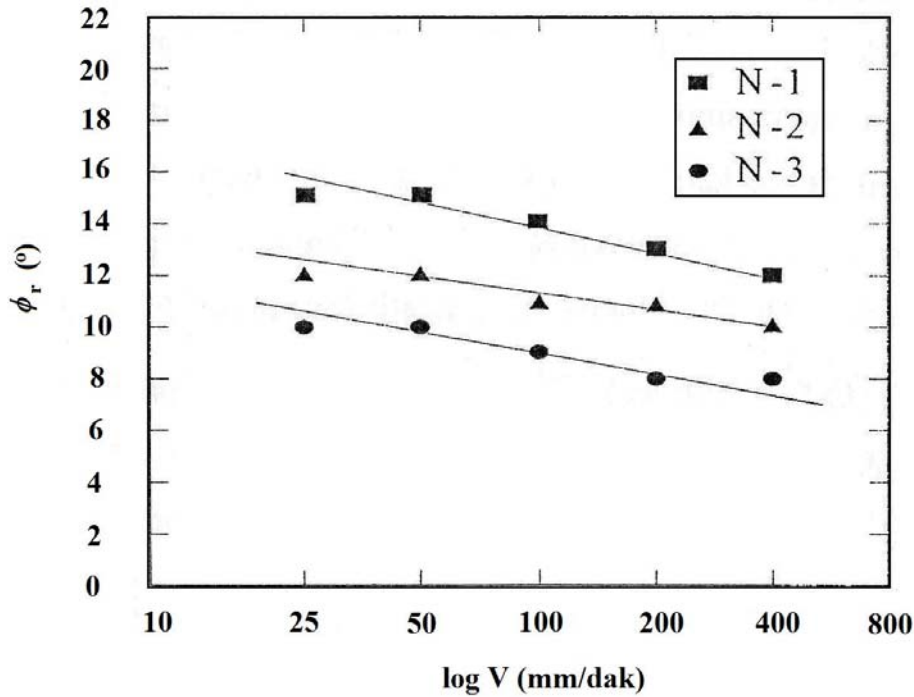
Standart laboratuvar hızı 0.005 mm/dak olarak alınır. Çizelge 3.4’den görüldüğü üzere tüm bu aralıkta mukavette meydana gelen sapmalar -%3 ile +%5 arasında bulunmaktadır. Bundan dolayı tüm bu aralıkta değişen hızlardaki kalıcı kayma mukavemet değeri olarak yavaş laboratuvar hızı ile elde edilen mukavemet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

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



Şekil 3.18 : 400 mm/dak değerindeki kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisi (Skempton, 1985)

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



Şekil 3.19 : Kalıcı kayma mukavemeti açısına kesme hızının etkisi (Koltuk, 2005)

Koltuk (2005)'un yapmış olduğu farklı kesme hızları altındaki deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan kalıcı kayma mukavemet açısı değerlerinin kesme hızı ile değişimi N-1, N-2 ve N-3 numuneleri için Şekil 3.19'da incelenmiştir. Şekil 3.15'de görüldüğü üzere kalıcı kayma mukavemet açısı kesme hızı arttıkça 2-3° azalmaktadır.

3.6.4 Zemin yapısının etkisi

Zeminlerin yapısı kalıcı kayma mukavemetini etkileyen önemli faktörlerden bir tanesidir. Burada zemin yapısı olarak kullanılan kavram aslında zemin daneleri arası kuvvetler ve zemin dokusu olarak tanımlanan danelerin geometrik olarak dizilimleridir.

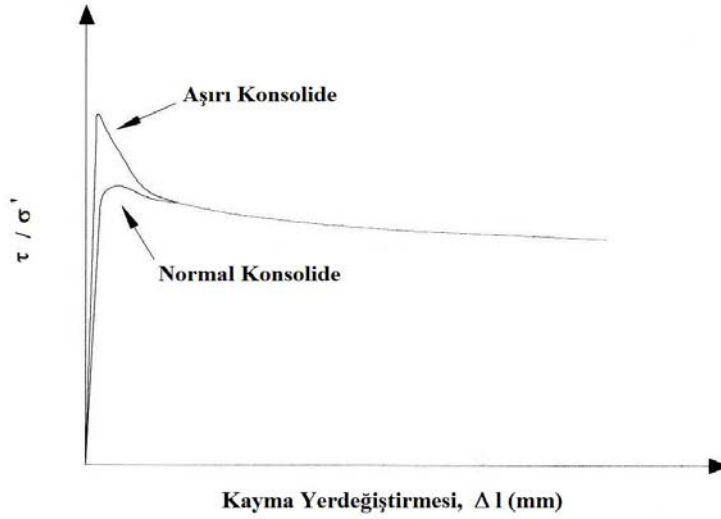
Zemin yapısında, yapı ve doku olarak iki kavramdan söz edilebilir. Doku kavramı, kohezyonsuz veya iri daneli zeminler için daneler arası kuvvetlerin, yerçekimi kuvveti yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olmasından dolayı yapı kavramının yerine kullanılmaktadır. Yapı kavramı ise kohezyonlu zeminlerde doku ifadesine ilave anlam taşıdığı belirtilmektedir.

Büyük deformasyonlar sonucunda kalıcı duruma ulaşılmasından dolayı zemin danelerinin başlangıçtaki konumlarının kalıcı kayma mukavemetine etkisi olmadığı doğrulanmış ve örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile gösterilmiştir (Bishop, 1971; Tiwari ve Marui, 2004). Ayrıca bilindiği üzere Garga (1970), La Gatta (1970) ve Bishop (1971)'da yapmış oldukları çalışmalarla aynı sonuçlara ulaşmışlardır.

Bishop (1971), zemin yapısının kalıcı durumda, zeminin kayma mukavemetini kayma düzlemine paralel olarak yönelen yassı biçimli daneler arasındaki sürtünme direnci meydana getirdiğinden kalıcı kayma mukavemetine etkisinin olmadığını belirtmiştir.

Zeminlerin kayma mukavemeti, artmakta olan deformasyonlar sonucu zeminlerin normal konsolide veya aşırı konsolide olmasına bağlı olmadan yaklaşık aynı değeri aldığı görülmüştür. Bu nedenden dolayı, belirli bir zemin için diğer bütün şartlar (efektif normal gerilme gibi) değişmemesi koşuluyla aşırı konsolidasyon oranının (AKO) zeminin kalıcı kayma mukavemetine etkisinin olmadığı belirtilmektedir (Skempton, 1985).

Kil yüzdesi yüksek olan aşırı konsolide kil zeminlerde pik ile kalıcı kayma mukavemetleri arasındaki farkın oldukça büyük olması kalıcı kayma mukavemeti değerinin önemini daha fazla arttırmaktadır. Aşırı konsolidasyon oranı (AKO) ile pik mukavemeti arasında doğru bir orantı bulunmaktadır. Bundan dolayı, aşırı konsolidasyon oranı arttıkça pik mukavemeti de artma eğilimi gösterecek ve kayma mukavemetindeki düşüş aşırı konsolide kil zeminler için daha fazla olmaktadır. Böylece, her ne kadar aşırı konsolidasyon oranının artması kalıcı kayma mukavemeti değerini değiştirmese de önemi artacaktır. Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemetine olan etkisi Şekil 3.20'de gösterilmektedir.

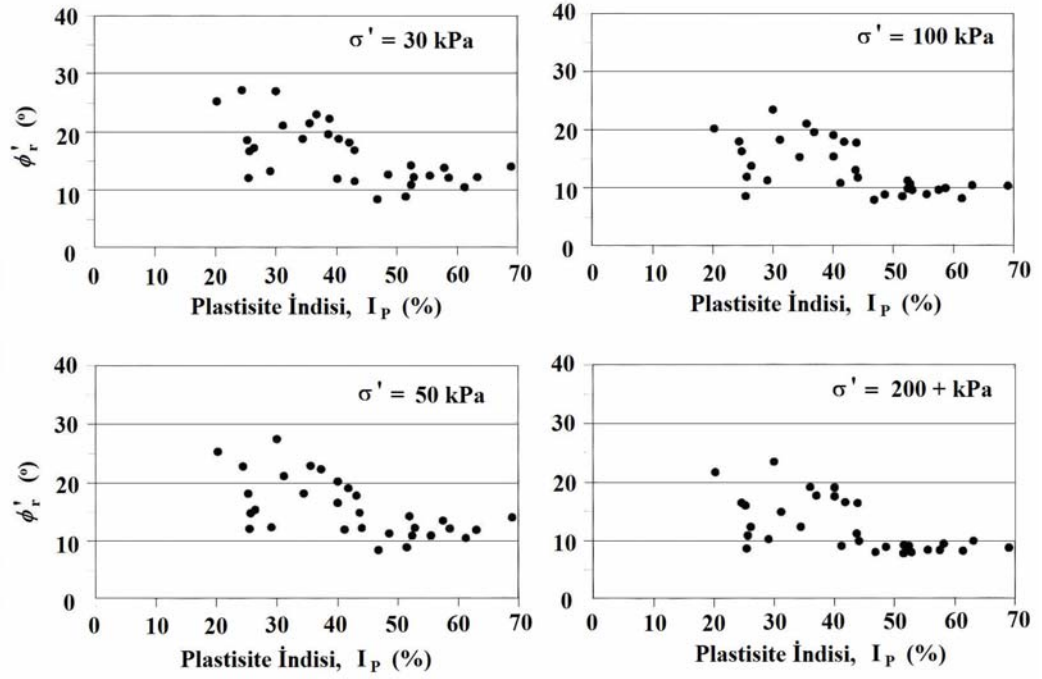


Şekil 3.20 : Kalıcı kayma mukavemetine aşırı konsolidasyon oranının etkisi

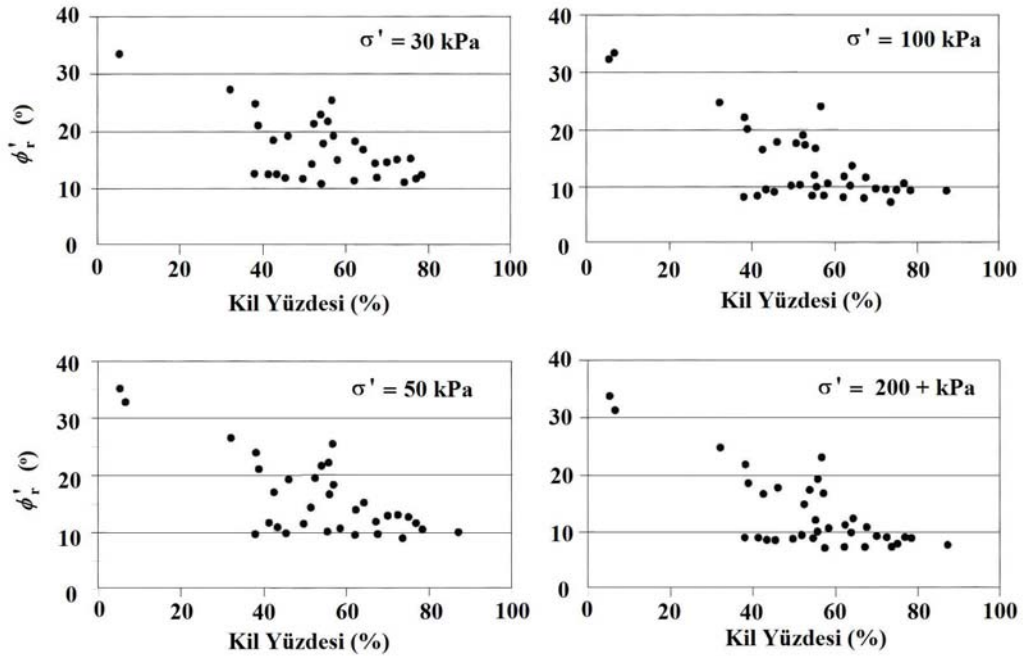
3.7 Endeks Özellikleri ile Kalıcı Kayma Mukavemeti Açısı Arasındaki İlişkiler

Zeminlerin kıvam limitleri ve/veya kil yüzdesi ile drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısı (ϕ') arasında çeşitli çalışmalar sonucunda birçok bağıntı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar ilk olarak 1964 yılında Skempton tarafından başlatılmış ve sırasıyla Lupini (1981), Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), Collotta (1989), Stark (1994), Wesley (2003), Suzuki ve diğ. (2005), İyisan ve diğ. (2006) gibi bilimadamları çalışmalarıyla katkıda bulunmuşlardır. Bu bağıntılar, numunenin alınmadığı veya yeterli imkanların olmadığı durumlarda kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde faydalı olmaktadır (Tiwari ve Marui, 2005).

İlk çalışmayı 1964 yılında gerçekleştiren Skempton, drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısının dört farklı efektif normal gerilme için, plastisite indisi ve kil yüzdesi ile değişimini incelemiştir. Deneyler kullanılan zeminlerin çoğu plastisite indisi %20'den büyük ve kilce zengindir. Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de Skempton (1964)'ın yapmış olduğu çalışmayla ilgili olarak plastisite indisi ve kil yüzdesi ile drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısının değişimini gösteren grafikler bulunmaktadır.



Şekil 3.21 : Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemetinin değişimi (Skempton, 1964)

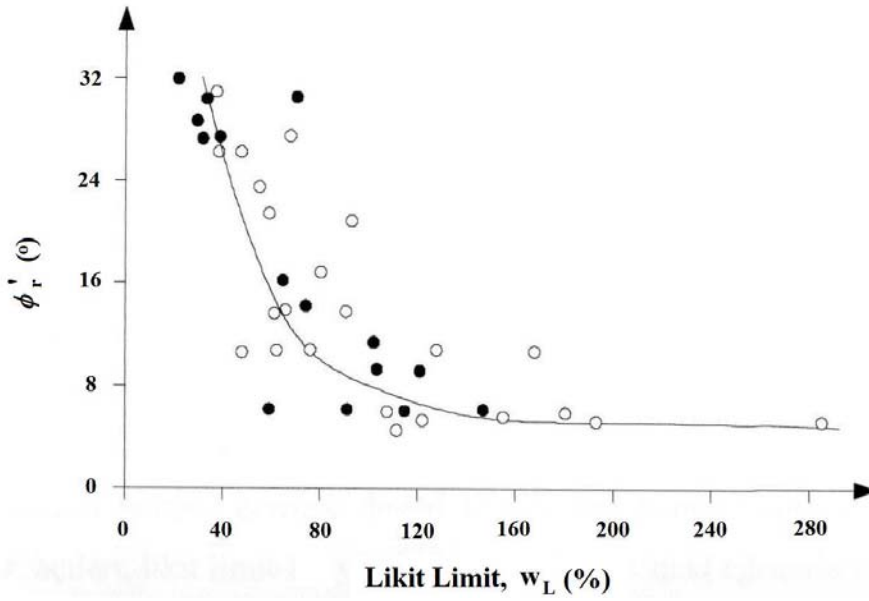


Şekil 3.22 : Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemetinin değişimi (Skempton, 1964)

Skempton (1964)'ın yapmış olduğu bu çalışmadan da anlaşılacağı üzere plastisite indisi %45'den büyük veya kil yüzdesi %60'dan fazla olan zeminlerin kalıcı kayma mukavemet açıları düşük değerlerdedir ve genelde geniş bir dağılım göstermezler. Plastisite indisi %25-45 arasında ve/veya kil yüzdesi %35-60 arasında olan zeminlerle mühendislik uygulamalarında çokça karşılaşılır. Bu tür plastisite indisi ve

kil yüzdesine sahip olan zeminler geniş bir kalıcı mukavemet dağılımı göstermektedirler. Bundan dolayı, korelasyonların bu zeminlerde uygun olmadığı görülebilir.

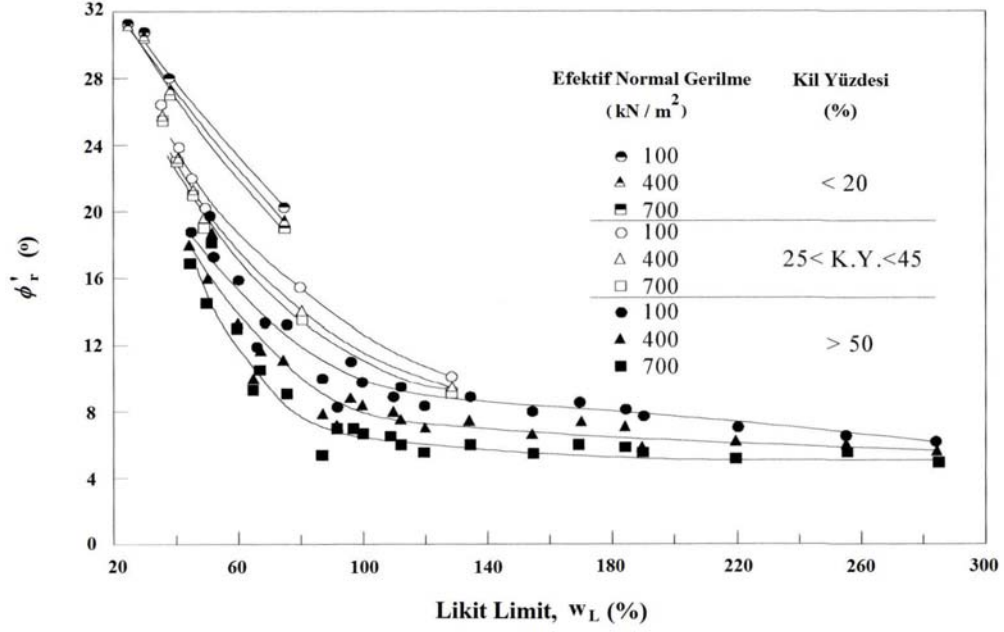
5×10^{-4} mm/dak'lık kesme hızında Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), aşırı konsolide kil şeyller üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapmışlar ve kalıcı kayma mukavemeti ile likit limit arasında bir ilişki elde etmişlerdir. Bu ilişki Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



Şekil 3.23 : Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986)

Mesri ve Cepeda-Diaz (1986)'ın elde etmiş oldukları Şekil 3.23'teki ilişki incelendiğinde kalıcı kayma mukavemetinin likit limit değeri ile azaldığı görülebilir. Ayrıca Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), %160'dan daha büyük likit limit değerinin kalıcı kayma mukavemet açısından önemli bir azalmaya sebep olmadığını ifade etmişlerdir.

Yapılan bu tür çalışmalara 1994 yılında T.D.Stark kil yüzdesi, likit limit ve efektif normal gerilme ile zeminlerin kalıcı kayma mukavemet açısı arasında bir ilişki belirleyerek katkıda bulunmuştur. Bu ilişkiyi belirleyebilmek için zemin numuneleri üzerinde halka kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.24'te kil yüzdesi, likit limit ve efektif normal gerilme ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



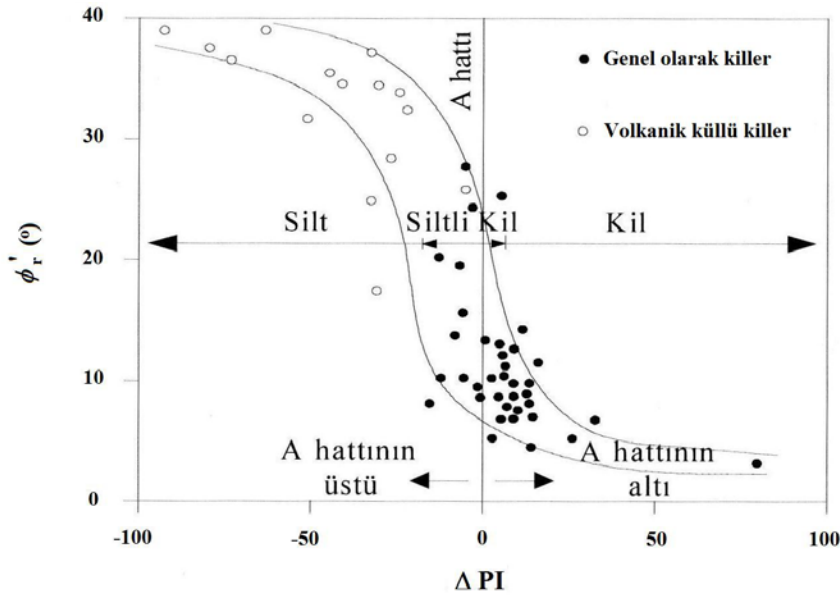
Şekil 3.24 : Likit limit, kil yüzdesi ve efektif gerilme ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Stark, 1994)

Kohezyonlu zeminler için belirli bir efektif normal gerilme altında kalıcı kayma mukavemet açıları Şekil 3.24 yardımıyla belirlenebilmektedir. Stark(1994)'ın yapmış olduğu bu çalışmayla 100-400 ve 700 kPa efektif normal gerilme değerlerindeki kalıcı kayma mukavemet açıları belirlenerek bu değerlere karşılık gelen kayma gerilmeleri belirlenir ve kayma gerilmesi-normal gerilme grafiği çizilerek doğrusal olmayan kalıcı göçme zarfı elde edilir. Ayrıca Stark (1994), likit limit ve kil yüzdesinin drenajlı kalıcı kayma mukavemet açısı hesaplanırken beraber kullanılmasının önemini vurgulayabilmek ve açıklayabilmek amacıyla elde etmiş olduğu korelasyonları Portekiz Bendi (Los Angeles, California yakınlarında) ve Gardiner Barajı (Kanada'nın batısında) heyelanlarına uygulamış, korelasyonları karşılaştırmıştır ve bölgelerden alınan numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yapmıştır. Güvenlik sayıları Gardiner Barajı için 1.01, Portekiz Bendi için 1.02 olarak elde edilmiştir.

Önceki yapılmış bu çalışmaları L.D.Wesley, 2003 yılında eleştirerek ince daneli zeminlerin özelliklerinin plastisite indisi veya likit limitten birinin olmadığı bir bağıntı ile ifade edilemeyeceğini ifade etmiştir. Wesley (2003), Casagrande'nin yapmış olduğu ve bu yüzden Casagrande kartı olarak bilinen kohezyonlu zeminlerin benzer mühendislik özelliklerine göre sınıflandırılmasında kullanılan plastisite kartını örnek göstermiş ve eleştirisinin doğruluğunu belirtmiştir. Casagrande kartı

incelendiğinde aynı plastisite indisine veya aynı likit limite sahip zeminlerin çok değişik özellikler gösterebileceği ve bundan dolayı farklı gruplarda yer alabileceği bilinmektedir. Ayrıca farklı likit limit ve farklı plastisite indisine sahip zeminlerin ise aynı grupta olabilecekleri bilinmektedir.

Kalıcı kayma mukavemet açısı değerinin, likit limit değerinin %50'den büyük olan zeminler için, A hattı veya çizgisiyle alakalı olarak Casagrande kartındaki yerine çok bağlı olduğunu Wesley (2003) belirtmiştir. Ayrıca Wesley (2003), kalıcı kayma mukavemet açısının A hattının üstündeki ve altındaki mesafeye yani ΔPI 'ya karşı değişimini incelemiştir. ΔPI 'daki ve likit limitteki meydana gelen artışların kalıcı kayma mukavemetini düşürdüğü Wesley (2003) tarafından gözlemlenmiştir. Bu ilişki Şekil 3.25'te gösterilmiş ve formül olarak (3.3)'de ve (3.4)'de belirtilmiştir.



Şekil 3.25 : Kalıcı kayma mukavemeti açısının ΔPI ile değişimi (Wesley, 2003)

$$\Delta PI = I_p - 0.73 \times (w_L - 20) \quad (3.3)$$

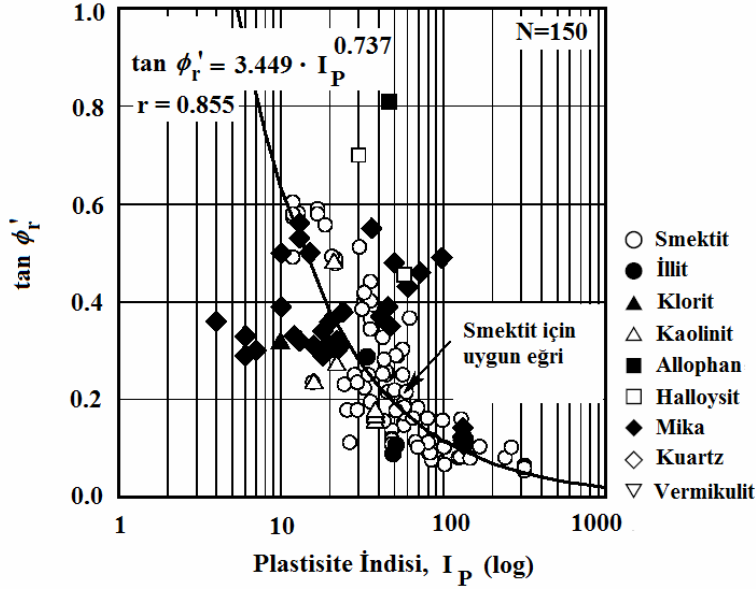
$$\phi_r' = 322.04 \times (w_L \pm \Delta PI)^{-0.782} \quad (3.4)$$

Şekil 3.25'te görüldüğü üzere A hattının çok altında kalan zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açısı değerinin yüksek, çok üstünde kalanların ise kalıcı kayma mukavemeti açısı değerinin düşük olması beklenebilir. Ayrıca, Şekil 3.25'te silt ve kil gibi kavramlar, silt veya kil özelliği gösteren zeminler için kullanılmış ve dane boyutuna göre kullanılmamıştır.

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

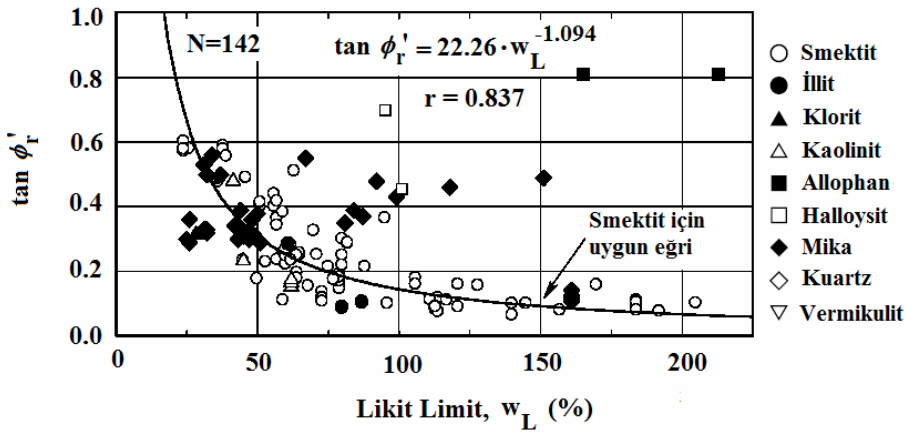
Kil Mineralleri	Data Sayısı
Smektit	323
İllit	3
Klorit	1
Kaolinit	9
Allophan	2
Halloysit	2
Mika	37
Kuartz	1
Vermikulit	1

Değişik çalışmalarda kullanılan zemin numunelerinin endeks özellikleri ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler Suzuki ve diğ. (2005) tarafından çeşitli istatistiksel yöntemler kullanarak irdelenmiştir. Suzuki ve diğ. (2005)'nin bu çalışmalarda kullanmış oldukları zemin numunelerinin sahip olduğu kil mineralleri ve sayıları Çizelge 3.5'te verilmiştir. Çizelge 3.5'te görülen mika, halloysit ve allophan içeren zemin numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucu belirli bir bağıntı elde edilememiştir. Çizelge 3.5'te belirtilen kil minerallerinden biri olan smektit içeren zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarda ise kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri ve kil yüzdesi ile yüksek korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı belirlemişlerdir. Bu çalışmalar göz önünde bulundurularak zemin numunelerinin kalıcı kayma mukavemetleri ile plastisite indisleri arasındaki ilişki Şekil 3.26'da belirtilmiştir. Kalıcı kayma mukavemetleri ile likit limitleri arasındaki ilişki Şekil 3.27'de, plastik limit/likit limit oranı ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki bağıntı ise Şekil 3.28'de gösterilmiştir. Şekillerde görülmekte olan “N” ifadesi kullanılan data sayılarını, “ I_p ” plastisite indisini, “ ϕ_r ” kalıcı kayma mukavemeti açısını, “ w_L ” likit limiti, “ w_p/w_L ” plastik limit ile likit limit arasındaki oranı, “r” ise korelasyon katsayısını göstermektedir. Ayrıca grafiklerdeki simgelerin hangi kil minerallerine ait olduğu da belirtilmiştir.



Şekil 3.26 : Kalıcı mukavemet ile plastisite indisi arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)

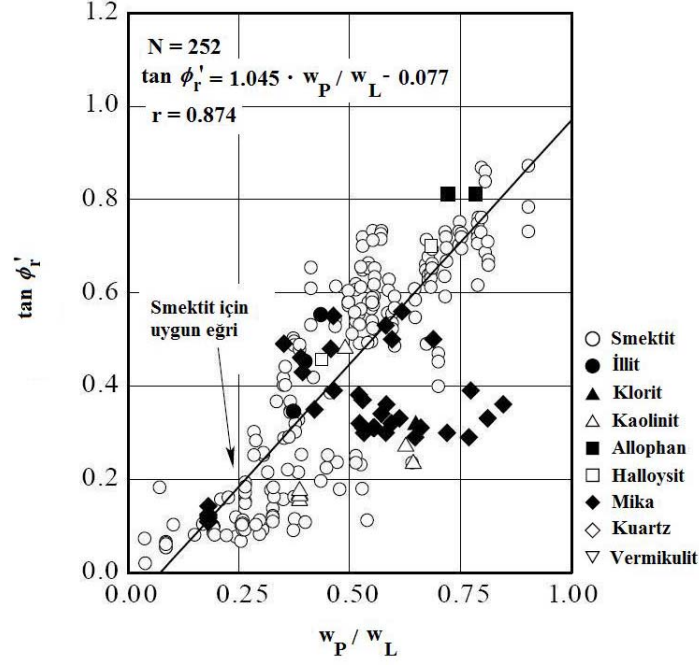
Suzuki (2005)'in yapmış olduğu çalışma sonucunda farklı kil mineralleri üzerinde gerçekleşen deneyleri göz önüne almış ve plastisite indisiyle kalıcı kayma mukavemeti arasında bir ilişki belirlemiştir. %86 korelasyon katsayısına sahip olan ilişkinin bağıntısı (3.5)'de ifade edilmektedir.



Şekil 3.27 : Kalıcı mukavemet ile likit limit arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)

Kalıcı kayma mukavemeti ile likit limit arasında yapmış olduğu inceleme sonucunda %84 korelasyon katsayısına değerine sahip bir ilişki belirlemiştir. Bu ilişkinin denklem olarak ifadesi (3.6)'da gösterilmektedir.

Suzuki (2005), gerçekleştirilmiş olan 252 adet deneyi göz önünde bulundurarak Şekil 3.28'de görülmekte olan kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit / likit limit oranı arasındaki ilişkiyi belirlemiştir.



Şekil 3.28 : Kalıcı mukavemet ile plastik limit/likit limit oranı arasındaki ilişki (Suzuki, 2005)

İçerisinde yoğun miktarda smektit kil minerali içeren zemin numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti ile plastisite indisleri, plastik limit/likit limit oranları ve likit limitleri arasında bağıntılar elde etmişlerdir. Suzuki ve diğ. (2005), yaptıkları çalışma sonucu plastik limit/likit limit oranı ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkinin en yüksek korelasyon katsayısına ($r=0.874$) sahip olduğunu bulmuşlardır. Bağıntı (3.7)'de verilmektedir.

$$\tan \phi_r' = 3.449 \times I_p^{-0.737} \quad (3.5)$$

$$\tan \phi_r' = 22.26 \times w_L^{-1.094} \quad (3.6)$$

$$\tan \phi_r' = 1.045 \times (w_p / w_L) - 0.077 \quad (3.7)$$

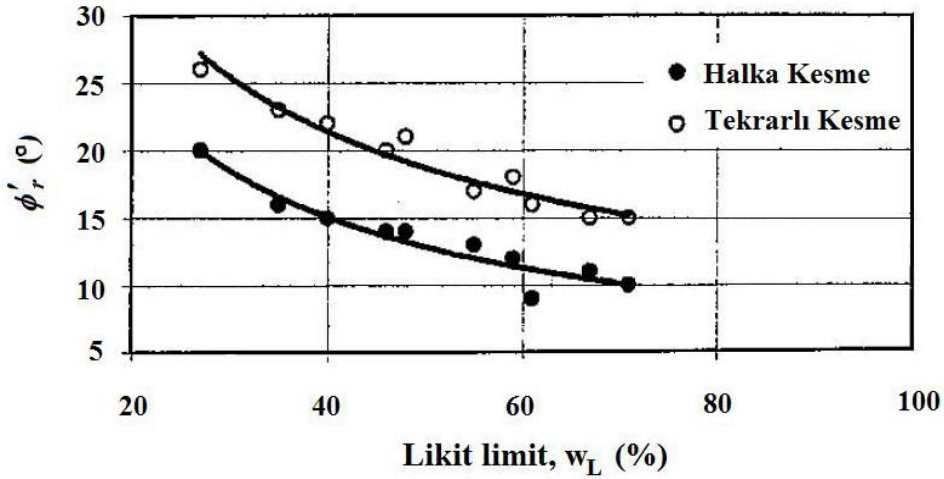
Farklı plastisite indislerine ve farklı kil yüzdelere sahip hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde İyisan ve diğ. (2006), üç değişik normal gerilme altında tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapmışlardır. Bu çalışma yardımıyla kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ve plastisite indisi ile değişimini incelemişlerdir. Likit limitleri %27 ve %70 arasında olan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kalıcı kayma mukavemeti açısı (ϕ_r') ile likit limit (w_L) arasında $R^2=0.93$ korelasyon katsayısına sayısına sahip bir denklem elde edilmiştir.

$$\phi_r' = 201 \times w_L^{-0.605} \quad (3.8)$$

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

$$\phi_r' = 213 \times w_L^{-0.718} \quad (3.9)$$

İyisan ve diğ. (2006)'ın gerçekleştirdikleri tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri sonucu elde edilen bağıntılarda likit limit değerinin artması ile kalıcı kayma mukavemeti açısının azaldığı görülmektedir. Fakat, bu deney yöntemleri ile elde edilen sonuçlar arasında farklılıklar olduğu ifade edilmektedir. İyisan ve diğ. (2006), kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişkiyi Şekil 3.29'da görüldüğü gibi belirtmektedir. Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri ile elde edilen kalıcı kayma mukavemet açılarının plastisite indisi ile değişimi Şekil 3.30'da olduğu gibi ifade edilmektedir. Şekil 3.30'da görülen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi, kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki değişime benzer olduğu görülmektedir.

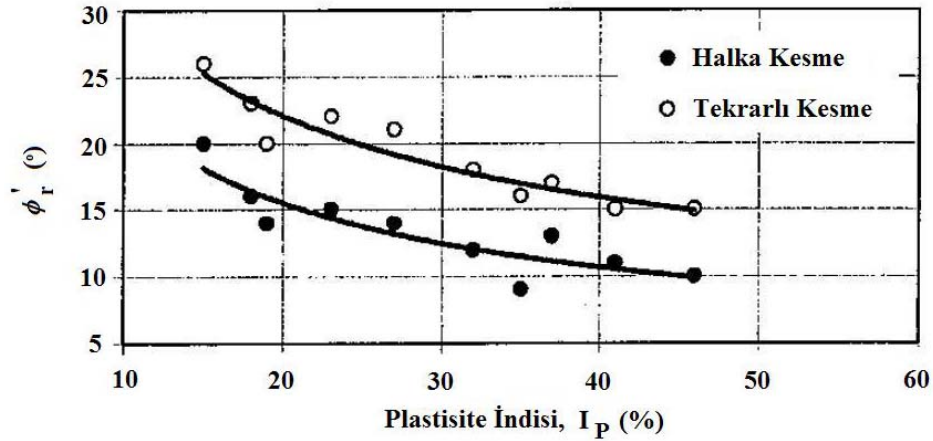


Şekil 3.29 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit ilişkisi (İyisan ve diğ., 2006)

Şekil 3.29'da belirtilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişki için iki ayrı denklem elde edilmiştir. Halka kesme deneyi ile elde edilen bağıntı (3.10)'da, kesme kutusu deneyinden elde edilen denklem ise (3.11)'de verilmiştir. Halka kesme deneyi bağıntısının korelasyon katsayısı %87 iken tekrarlı kesme kutusu deneyi bağıntısı korelasyon katsayısı ise %93'dür.

$$\phi_r' = 213 \times w_L^{-0.718} \quad (3.10)$$

$$\phi_r' = 201 \times w_L^{-0.605} \quad (3.11)$$



Şekil 3.30 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastisite indisi ilişkisi (İyisan ve diğ., 2006)

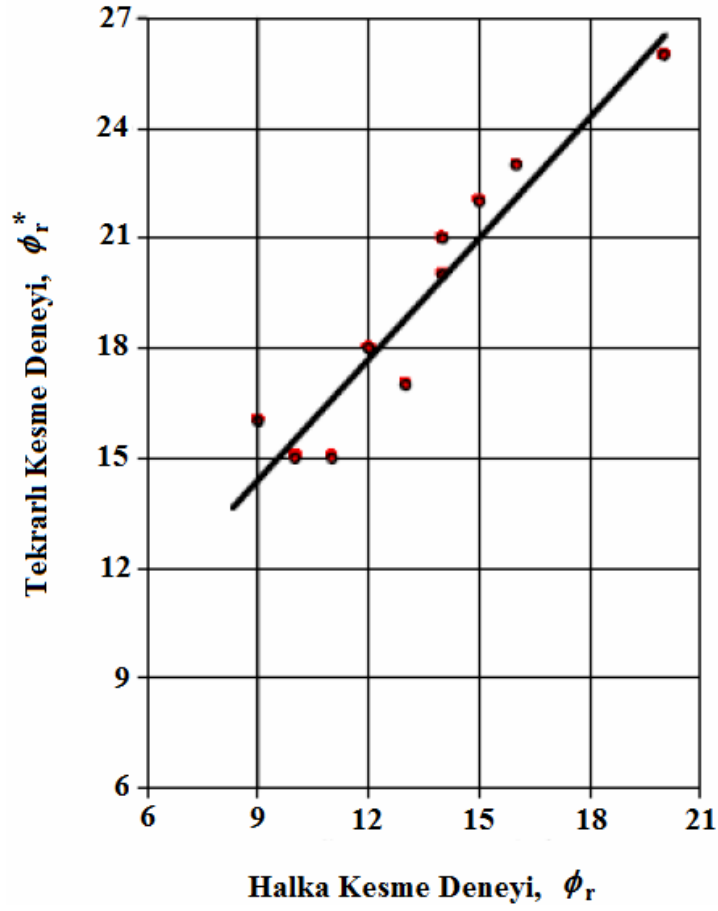
İyisan ve diğ. (2006) ayrıca plastisite indisleri %15 ve %46 arasında değişmekte olan zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri ile kalıcı kayma mukavemeti açıları elde etmiş, kalıcı kayma mukavemet açıları ve plastisite indisleri kullanarak gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda sırasıyla %76 ve %90 korelasyon katsayıları olan bağıntılar belirlenmiştir.

$$\phi_r' = 78 \times I_p^{-0.539} \quad (3.12)$$

$$\phi_r' = 90 \times I_p^{-0.471} \quad (3.13)$$

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

İyisan ve diğ. (2006)'nin gerçekleştirdikleri bu çalışmada aynı zamanda tekrarlı kesme kutusu deneyleri ile belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açısının (ϕ_r^*) halka kesme deneyleri ile elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı (ϕ_r) ile değişimi incelenmiştir. Bu değişim Şekil 3.31'de görülebilmektedir.



Şekil 3.31 : Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (İyisan ve diğ., 2006)

Şekil 3.31’de tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının artması ile halka kesme deney sonuçlarında arttığı görülmüştür. Elde edilen bu ilişki lineer yani doğrusal bir ilişkidir ve denklem olarak ifadesi **(3.14)**’de verilmiştir. Korelasyon katsayısı ise yaklaşık olarak %90’dır.

$$\phi_r^* = 1.2\phi_r + 3 \quad (3.14)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma ile aşırı konsolide kil zeminlerin tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin bulunması ve elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile likit limit, plastik limit ve plastisite indisi başta olmak üzere zeminlerin endeks özellikleriyle ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çeşitli bölgelerden gelen likit limitleri %41 ile %128 arasında, plastisite indisleri %23 ile %95 arasında olan örselenmemiş zemin numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. 24 adet farklı zemin numuneleri üzerinde 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında, yeniden aktif hale geçmiş heyelanlardaki en düşük kayma hızının 0.0001 mm/dak ve en yüksek hızın 0.35 mm /dak olduğu göz önüne alınarak seçilen 0.035 mm/dak deformasyon hızı ile tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Her normal gerilme altında iki numune için 5 çevrim, diğer numuneler için ise 3 çevrim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan 5 çevrimlik deney sonuçlarından kalıcı duruma 3. çevrim sonucunda ulaşıldığı kabul edilmiş ve bu yüzden diğer deneyler 3 çevrim yapılmıştır. Zemin numuneleri her bir normal gerilme altında konsolidasyonunu tamamlayıncaya kadar beklenmiş ve belirtilen kesme hızında kesilmiştir. Sonuçların karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla tek bir numune üzerinde halka kesme deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen zeminlerin kalıcı kayma mukavemetleriyle likit limit, plastik limit, plastisite indisi, likit limit ve Casagrande plastisite kartındaki A hattına olan uzaklığın toplamı ($w_L + \Delta PI$), plastik limit / likit limit oranı (w_p/w_L), pik kayma mukavemet açısı (ϕ_p), ince dane oranı, kil yüzdesi ve aktivite ile olan ilişkileri incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda kalıcı kayma mukavemeti açısını zeminlerin endeks özelliklerine bağlı olarak kolayca tahmin edebilmek amacıyla korelasyonlar geliştirilmiştir. Bu işlemin ardından, elde edilen sonuçlar İyisan ve diğ. (2006)'nin çalışmalarındaki modifiye Proktor kalıbında standart Proktor enerjisiyle hazırlanmış likit limitleri %27 ile %75 arasında, plastisite indisleri %15 ile %48 arasında olan 15 adet numunenin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile birlikte incelenmiştir. Ancak bu iki çalışmada farklı

numune hazırlama yöntemleri bulunmaktadır. Bu inceleme yapılırken literatürde Bishop (1971), Tiwari ve Marui (2004)'ün belirttikleri üzere numunelerin başlangıçtaki konumlarının yani hazırlama yönteminin kalıcı kayma mukavemetine etkisi olmadığı ifadesi göz önüne alınmıştır.

4.1 Deney Numunelerinin Endeks Özellikleri

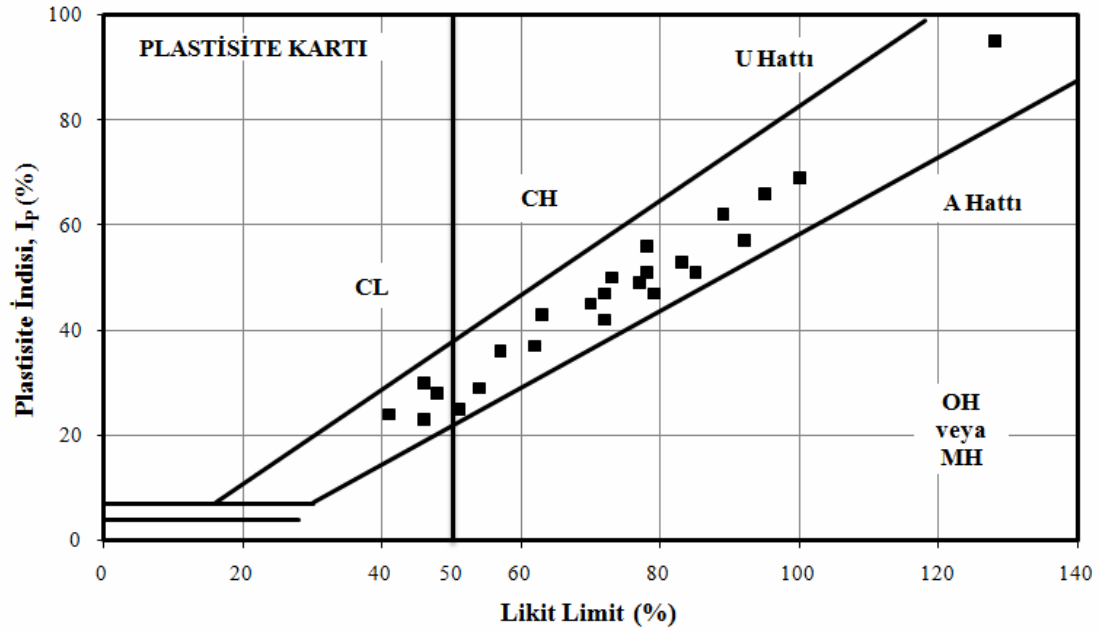
Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılmış olan zemin numunelerinin endeks özelliklerini elde etmek için bu numuneler üzerinde ıslak elek ve hidrometre analizleri, likit limit ve plastik limit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sınıflandırma deneyleri yapılarak bu numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde yer almış olduğu gruplar elde edilmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılan numunelerinin endeks özellikleri Çizelge 4.1'de, plastisite kartındaki yerleri ise Şekil 4.1'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan zemin numuneleri "A" numuneleri olarak isimlendirilmiştir.

Çizelge 4.1 : A numunelerinin endeks özellikleri

#	Numune Adı	w _n (%)	w _L (%)	w _P (%)	I _P (%)	γ _n (kN/m ³)	Zemin Sınıfı	İ.D.O (%)	Kil Yüzdesi (%)	Aktivite (A)
1	A1	43	92	35	57	17.0	CH	98	42	1.36
2	A2	22	70	25	45	17.9	CH	86	5	9.00
3	A3	31	54	25	29	18.1	CH	84	35	0.83
4	A4	23	46	23	23	18.6	CL	94	32	0.72
5	A5	42	89	27	62	18.0	CH	100	-	-
6	A6	30	51	26	25	17.2	CH	98	32	0.81
7	A7	63	85	34	51	15.8	CH	-	-	-
8	A8	31	48	20	28	18.4	CL	89	10	2.00
9	A9	5	73	23	50	18.5	CH	97	46	0.50
10	A10	38	72	30	42	17.8	CH	100	19	1.58
11	A11	42	79	32	47	18.1	CH	98	32	1.00
12	A12	52	72	25	47	17.2	CH	99	33	0.76
13	A13	59	128	33	95	17.3	CH	97	28	1.18
14	A14	29	78	22	56	15.1	CH	97	19	1.16
15	A15	21	41	17	24	20.9	CL	88	14	1.21
16	A16	41	95	29	66	17.5	CH	99	9	3.22
17	A17	23	46	16	30	18.6	CL	91	9	3.33
18	A18	32	57	21	36	17.5	CH	92	10	3.60
19	A19	25	62	25	37	17.3	CH	89	8	4.63
20	A20	42	63	20	43	17.8	CH	95	17	2.53
21	A21	22	77	28	49	18.2	CH	98	33	1.48
22	A22	19	78	27	51	18.4	CH	96	25	2.04
23	A23	38	83	30	53	16.4	CH	99	45	1.18
24	A24	59	100	31	69	17.4	CH	99	47	1.47

*w_n: Doğal su muhtevası, w_L: Likit limit, w_P: Plastik limit, I_P: Plastisite İndisi, γ_n: Doğal birim hacim ağırlığı, İ.D.O: İnce dane oranı, CH: Yüksek Plastisiteli kil, CL: Düşük plastisiteli kil

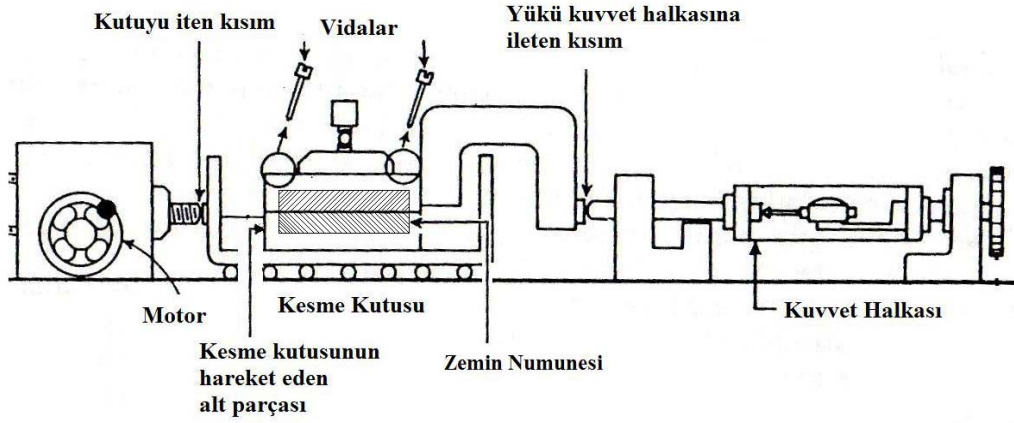
Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere deney numunelerinin likit limitleri %41 ile %128 arasında, plastik limitleri %16 ile %35 arasında, plastisite indisleri %23 ile %95 arasında değişmektedir. Ayrıca numunelerden 4 tanesi düşük plastisiteli kil, diğer numuneler ise yüksek plastisiteli killerdir. Ayrıca Çizelge 4.1’de zemin numunelerinin doğal su muhtevası, doğal birim hacim ağırlığı, ince dane oranı, kil yüzdesi ve aktivite değerleri verilmiştir.



Şekil 4.1 : Numunelerin plastisite kartındaki yerleri

4.2 Kesme Kutusu Deney Aleti

Kesme kutusu deneyi zeminlerin kayma mukavemetini belirlemede kullanılan laboratuvar deney yöntemleri içerisinde en eski ve en kullanışlı olanıdır. Deney aletinin en önemli özelliği kutunun üst parçası sabit tutulurken alt parçasının yatay düzlem üzerinde hareket edebilmesi ve böylece numuneyi ortasından geçen yatay bir düzlem boyunca kaymaya zorlamasıdır. Bu işlem, farklı gerilmeler altında tekrarlanarak zeminin kalıcı mukavemet zarfı belirlenir. Kesme kutusu deney aletinin kesiti Şekil 4.2’de, aletin genel görünümü ise Şekil 4.3’de verilmektedir.



Şekil 4.2 : Kesme kutusu deney aletinin kesiti



Şekil 4.3 : Kesme kutusu deney aletinin genel görünümü

Yapılan çalışmalarda, iki parçadan oluşan, 60 mm x 60 mm en kesitli kesme kutusu deney aletleri kullanılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri 24 adet numune üzerinde farklı normal gerilmeler altında zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirleyebilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi 0.035 mm/dak sabit deformasyon hızı ile yapılmıştır. Ayrıca kesme işlemi 12 mm yerdeğiştirme sonucu tamamlanmasından dolayı kesme kutusu geri çekilerek aynı yönde yeniden kesilmiştir. Çalışmada, tekrarlı kesme kutusu deneylerinde 2 numune için 5 çevrim yapılmış ve kalıcı duruma 3. çevrimler sonucu ulaşıldığı kabul edilmiş ve diğer deneyler 3'er çevrim yapılmıştır. Her çevrim sonunda numune düşey gerilme altında konsolidasyonunu sağlayabilmesi amacıyla yaklaşık 24 saat süre ile bekletilmiştir. Her numunenin belirli bir normal gerilme altında 3 çevrim olarak gerçekleştirilen kesme kutusu deneyi konsolidasyon ve kesme işlemleriyle yaklaşık 3

gün sürmüştür. Böylece bir numunenin 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altındaki tekrarlı kesme kutusu deney süresi yaklaşık 9 gün olmuştur.

4.2.1 Tekrarlı kesme kutusu deneyi ve deney numunelerinin hazırlanması

Numuneler, başta İstanbul'dan (Arnavutköy, Kuyumcukent, Zincirlikuyu) olmak üzere Konya (Çomaklı) ve Türkmenistan'dan gelen, örselenememiş halde bulunan numunelerdir. Bu numuneler İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği laboratuvarına blok halde arazilerden gelmiştir.

Kesme kutusu deney aletine numunenin uygun boyutlarda olacak şekilde yerleştirilmesi için kesme kutusunun ring adı verilen kalıpları kullanılmıştır. Bu ringlerin boyutları kesme kutusu deney aletine bağlı olarak farklı çeşitlerde olabilmektedir. Ringler kare prizması şeklindedir. Laboratuvarımızda bulunan kesme kutusunun ring boyutu 60 mm x 60 mm x 20 mm'dir.



Şekil 4.4 : Uygun boyutlarda numune hazırlamaya yarayan kalıp

Şekil 4.4'de görülen ring, numuneye yapışmaması amacıyla iyice yağlanmıştır. Araziden laboratuvara blok halde gelen numunelere fazla zarar vermeyecek şekilde ring batırılmıştır. Daha sonra iyice bastırılarak ringin örselenmemiş blok numuneye sokulması sağlanmıştır. Tel testere kullanılarak ringin etrafındaki fazla numune parçaları kesilerek alınmıştır. Bu parçalar, ağırlıkları önceden belirlenmiş olan metal kaplara konularak tartılmış ve su muhtevasını belirleyebilmek amacıyla etüve atılmıştır. Şekil 4.5'de numuneye batırılmış ringin tel testere yardımıyla fazla olan numune parçalarının alındığı ve sonucunda ring yardımıyla düzgün olarak hazırlanan kesme kutusu deney numunesi, Şekil 4.6'da ise deney başı su muhtevası için metal kaplara konulan zemin parçaları görülmektedir.



Şekil 4.5 : Tekrarlı kesme kutusu deney numunesinin hazırlanması



Şekil 4.6 : Deney başı su muhtevasının alınması

Deney numunesinin hazırlanmasının ardından kesme kutusu deney aletinin montaj işlemine geçilmiştir. İlk önce kesme kutusunun alt parçası, ardından da üst bölüm yerleştirilmiştir. Bilindiği üzere alt parça hareket ederken üst parça ise sabittir. Alt parça montajı sırasında yan tarafındaki yatay konumdaki vida yardımıyla sıkıştırılmıştır. Böylece kutuya sabitlenmıştır.



Şekil 4.7 : Kesme kutusu alt ve üst parçalarının yerleştirilmesi

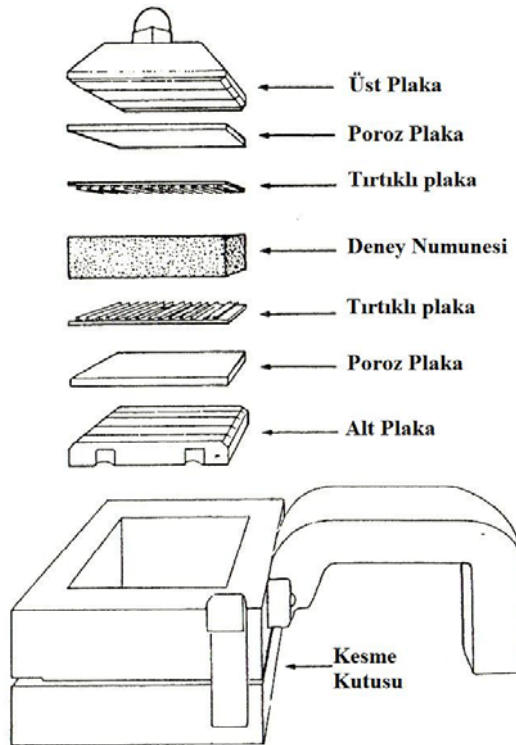
Alt ve üst parçalar mümkün olduğunca alt alta getirilmiştir. İki adet vida kullanılarak parçalar birbirlerine tutturulmuşlardır. Böylece zemin numunesi üniform olarak

yerleştirilmiştir. Vidalar, numunenin konsolidasyonu tamamlandıktan sonra deney başlatılmadan önce çıkartılmıştır.



Şekil 4.8 : Alt ve üst parçaların vidalar yardımıyla birbirine tutturulması

Plakalar, kesme kutusu deneyi sırasında drenajı sağlaması bakımından önemlidir. Üzerinde bulunan girinti ve çıkıntılar drenajı gerçekleştirir. Deneyi yapılacak olan zemin numunesi sisteme getirilmeden önce alt plaka yerleştirilmiştir. Onun üzerine sırasıyla poroz ve tırtıklı plakalar konulmuştur. Numune üzerine ise alt kısımdaki işlemin tersi olacak şekilde sırayla tırtıklı, poroz plakalar ve son olarak üst plaka yerleştirilmiştir. Plakalar ve onların yerleştirme sırası Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9 : Kesme kutusu deney aleti parçaları ve plakaları

Zemin numunesinin her iki tarafına poroz kağıt Şekil 4.10’da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Ring içerisinde bulunan numune, kesme kutusu içerisine ahşap bir tokmak yardımıyla itilerek konulmuştur. Bu işlem ise Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.10 : Numuneye poroz kağıt yerleştirilmesi



Şekil 4.11 : Numunenin kesme kutusuna yerleştirilmesi

Kesme kutusu içerisindeki numune üzerine üst plaka konulmuş ve ardından kapak bölümü yerleştirilmiştir. Deney sırasında numuneye üstten ve alttan normal gerilmeyi uygulayacak olan konsol kol (Şekil 4.12), kapak üzerine konulmuştur. Bu konsol kola ağırlıklar konularak normal gerilme sağlanmaktadır.



Şekil 4.12 : Normal gerilmeyi numuneye alttan ve üstten gerilmeyi iletecek kısım

Kesme kutusu deneyinde yatay ve düşey deformasyonlar ve kesme kuvveti takip edilmiş ve ölçülmüştür. Bu ölçme işlemleri yatay ve düşey deplasman saatleri ve kuvvet halkası saati yardımıyla yapılmıştır. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de görülmektedir.



Şekil 4.13 : Yatay deformasyon saati



Şekil 4.14 : Kuvvet halkası saati

Okumaların yapılabilmesi için saatler ayarlanmış ve sıfırlanmıştır. Ardından, sisteme 100 kPa normal gerilme uygulanmaya başlanmıştır. Şekil 4.15’de yapılan uygulama gösterilmiştir. Bu işlemin numuneye zarar vermemesi için gerilmenin uygulanması kademeli olarak yapılmıştır. Numune, ilk çevrim için bu yük altında konsolidasyona bırakılmıştır. Yükleme yapıldıktan 5 dakika sonra numunenin suya doymun olması amacıyla kesme kutusu içerisine su konulmuştur. Konsolidasyonunu tamamlanıncaya kadar beklenilmiştir.



Şekil 4.15 : Konsol kola yüklemenin yapılması

Konsolidasyonunun tamamlanmasının ardından kesme kutusu motor vitesi boştan 2. vites kademesine sabitlenmiş ve kesme hızı 0.035 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16 : Vitesin ve kesme hızının ayarlanması

Ayarlamaların yapılmasıyla kesme kutusu deney için hazır hale getirilmiştir. Böylece kesme kutusu deney aleti kapalı durumdan ileri duruma geçirilmiş ve deney başlatılmıştır. Numuneyi kesme işlemi 12 mm deformasyona kadar yani yaklaşık 7 saat sürmüştür. Bu süre zarfında kuvvet halkasından ve deformasyon saatlerinden sürekli okumalar alınmıştır. Numunenin 12 mm yatay deformasyona uğramasıyla kalıcı kayma mukavemetine ulaşıldığı kabul edilerek deney sonlandırılmıştır. Deneyin bitmesiyle kesme kutusu deney aletinde boşluk geri çekilerek kesilme işlemi gerçekleştirilmeden önceki ilk haline getirilmiştir. Geri sarma işlemi Şekil 4.17’de görülmektedir.



Şekil 4.17 : Deney düzeneğinin geri çekilmesi

Numune deney düzeneğinden çıkarılmadan sanki ilk kez kesiliyormuş gibi saatler sıfırlanmıştır ve üzerindeki gerilme kaldırılmadan aynı yük altında konsolidasyona bırakılmıştır. Böylece 100 kPa normal gerilme altında 1. çevrim bitmiştir. Aynı normal gerilme altında 2. ve 3. çevrimler de benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. 3. çevrim sonunda geri sarma işlemi gerçekleştirilmemiştir. Böylece numunenin kesildiği yüzey rahatlıkla gözlemlenmiştir. Normal gerilmeyi sağlayan ağırlıklar alınmış ve konsol kol boşaltılmıştır. Ardından kesme kutusundaki su dışarı alınmıştır. Konsol kol numune üzerinden kaldırılmıştır. Kesme kutusunun alt parçası sistemden ayrılmış, numune üst ve alt parçayla birlikte deney aletinden çıkartılmıştır. Bu işlem Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : Numunenin alt ve üst parçayla birlikte sistemden çıkarılması

Numune dikkatlice parçalardan çıkarılmış ve ağırlığı önceden bilinen bir kap içerisine konulmuştur. 3. çevrim sonunda geri sarma işlemi gerçekleştirilmemiştir. Böylece numunenin kesildiği yüzey Şekil 4.19’da verildiği gibi rahatlıkla gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19 : Kesilen numunenin görünümü

Deney sonrası su muhtevasını belirleyebilmek için kesilmiş numunenin ağırlığı tartı yardımıyla ölçülmüş ve ardından kuruması için etüve konulmuştur. Etüve konulmadan önceki kesilmiş yüzeyler Şekil 4.20’de, kurutulduktan sonraki yüzeyler de Şekil 4.21’de görülebilmektedir.



Şekil 4.20 : Etüve konulmadan önceki kesilmiş yüzeyler



Şekil 4.21 : Etüvde kurutulduktan sonraki kesilmiş yüzeyler

200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler için numunelerin ring ile hazırlanması, deney sistemine yerleştirilmesi, deney sisteminin montajı ve bu gerilmeler altında gerçekleşen 1.,2. ve 3. çevrimlerin yapılması yukarıda anlatılan yöntemlere benzer

şekilde gerçekleştirilmiştir. İşlemlerdeki tek değişim uygulanan normal gerilmenin farklı olmasıdır.

4.3 Hesaplamalar

Tekrarlı kesme kutusu deneyinde yatay (ΔL) ve düşey (ΔH) deplasman değerleri ve yatay yük (τ) değeri okunmuştur. Bu okumalar yatay ve düşey deformasyon saatlerinden ve kuvvet halkası saatinden yapılmıştır. Yatay deformasyon saati 1/100 ölçeklidir. Saatin başlangıç değerinden 600 birim yani 6 mm deformasyon sağlanıncaya kadar her 25 birimde (0.25 mm) kuvvet halkasından okumalar alınmıştır. 6 mm deformasyondan sonra her 0.50 mm deplasmanda okumalar alınmıştır.

Kuvvet = Kuvvet okuması x Ring faktörü

Ring faktörü değeri kullanılan kesme kutusu deney aletine göre değişiklik göstermektedir. Kesme kutusu deneyi hesaplamaları düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alanlara göre iki şekilde gerçekleşir.

- **Düzeltilmiş alana göre yapılan hesaplamalar**

Başlangıç alanı yani daha deformasyon başlamadan önceki alan 6 cm x 6 cm = 36 cm² olarak alınmıştır. Kesme işlemi başladıktan sonraki düzeltilmiş alanlar;

$$A_i = 60(60 - \Delta l) \text{ mm}^2 \quad (4.1)$$

olarak hesaplanmaktadır. (4.1) bağıntısında “ A_i ” düzeltilmiş alan, “ Δl ” deplasmandır.

Kayma gerilmesi;

$$\tau = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Düzeltilmiş Alan}} \quad (4.2)$$

Normal gerilme;

$$\sigma = \frac{\text{Düzeltilmemiş Alan} \times \text{Uygulanan normal gerilme}}{\text{Düzeltilmiş Alan}} \quad (4.3)$$

Düzeltilmemiş alan 6 cm x 6 cm = 36 cm² olarak bilinmektedir. Uygulanan normal gerilme, kesme kutusu deneyinde numunenin konsolidasyonu ve kesimi sırasında uygulanan normal gerilmedir. Düzeltilmiş alan ise (4.1) bağıntısında ifade edilen A_i ’dir.

- **Düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamalar**

Düzeltilmemiş alan, 6 cm x 6 cm = 36 cm² sabit bir değer olarak alınmıştır ve hesaplama sırasında değiştirilmemiştir.

Kayma gerilmesi ifadesi;

$$\tau = \frac{Kuvvet}{Düzeltilmemiş Alan} \quad (4.4)$$

Normal gerilme ifadesi;

$$\sigma = Uygulanan normal gerilme \quad (4.5)$$

Alan düzeltilmesi yapılmadığı için normal gerilme, uygulanan normal gerilmeye eşittir. Açıklanan düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamalar için A-14 numunesinin 200 kPa gerilme altında 1. çevrimde, örnek olması amacıyla 3 mm yatay yerdeğiştirmeye kadar gerçekleştirilen hesaplar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : A-14 numunesinin düzeltilmiş ve düzeltilmemiş alana göre yapılan hesaplamaları

Yatay Dep. ΔL (mm)	Kuvvet (kPa)	Düzeltilmiş			Düzeltilmemiş		
		Düzeltilmiş Alan (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kPa)	Normal Gerilme σ (kPa)	Düzeltilmemiş Alan (cm ²)	Kayma Gerilmesi τ (kPa)	Normal Gerilme σ (kPa)
0	0.0	36.00	0.00	200.00	36	0.00	200
0.25	131.0	35.85	36.55	200.84	36	36.40	200
0.5	225.8	35.70	63.26	201.68	36	62.73	200
0.75	277.4	35.55	78.03	202.53	36	77.06	200
1	294.8	35.40	83.29	203.39	36	82.09	200
1.25	295.5	35.25	83.84	204.26	36	83.80	200
1.5	296.2	35.10	84.39	205.13	36	84.00	200
1.75	291.3	34.95	83.36	206.01	36	82.35	200
2	287.2	34.80	82.52	206.90	36	79.77	200
2.25	284.4	34.65	82.07	207.79	36	78.99	200
2.5	283.7	34.50	82.23	208.70	36	78.80	200
2.75	280.9	34.35	81.77	209.61	36	78.03	200
3	277.4	34.20	81.11	210.53	36	77.06	200

Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi alan düzeltilmesi yapıldığında elde edilen kayma gerilmesi değerleri, alan düzeltilmesiz elde edilen değerlerden daha büyüktür. Bunun nedeni düzeltme yapıldığında alan değerlerinin yatay deplasmanla azalmasıdır. Ayrıca normal gerilmenin de alan düzeltilmiş hesaplamalarda yatay deplasmanla arttığı görülebilir. Çünkü (4.3) bağıntısından anlaşılabileceği üzere normal gerilme hesabı düzeltilmiş alana bağlıdır. Kalıcı ve pik mukavemet zarfları her normal

gerilme altındaki çevrimler sonucu elde edilen kayma gerilmelerine göre belirlenir. Kalıcı kayma mukavemeti zarfı her bir normal gerilme için en son yapılan çevrim sonucu elde edilen en düşük, pik kayma mukavemeti ise ilk çevrim sonucu elde edilen en büyük kayma gerilmesi değeridir. Çizelge 4.3’de pik kayma mukavemeti, Çizelge 4.4’de ise kalıcı kayma mukavemeti için A-14 numunesi üzerinden örnekler verilmiştir. A-14 numunesinde tekrarlı kesme kutusu deneyi belirli bir normal gerilme altında 3 çevrim olacak şekilde yapılmış ve kalıcı değer ona göre seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında 5’er çevrim olarak yapılan deneylerde ise 5. çevrimde elde edilen kalıcı değerler alınmıştır.

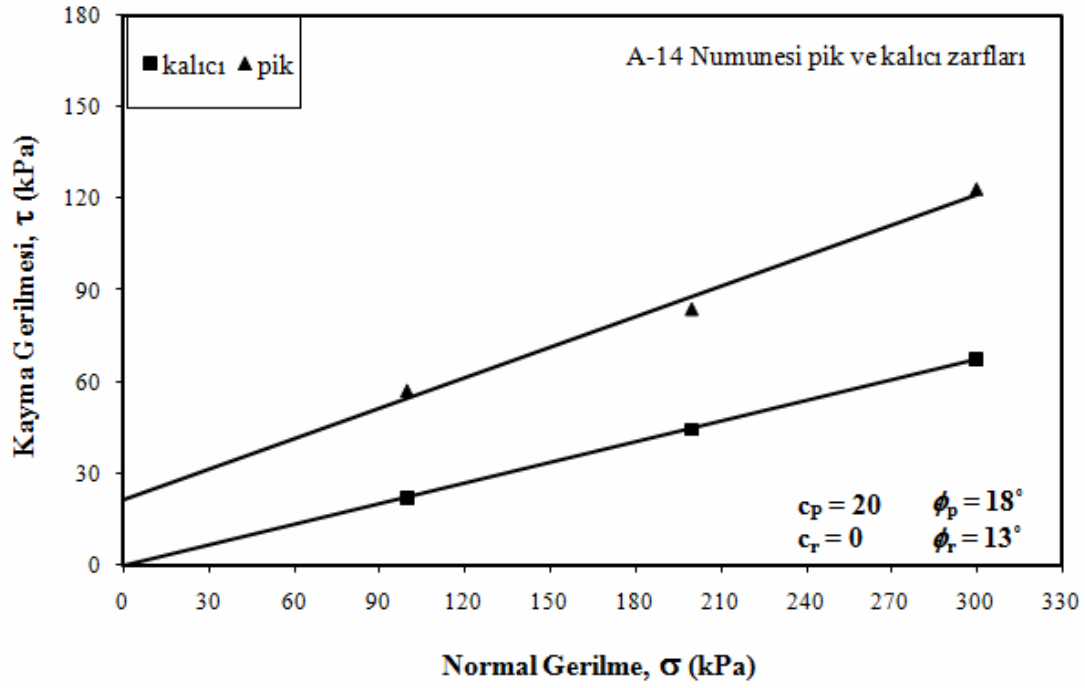
Çizelge 4.3 : A-14 numunesinde her normal gerilme için pik kayma mukavemeti

	1. çevrim	
	Normal(kPa)	Kayma (kPa)
Pik	100	57
	200	84
	300	123

Çizelge 4.4 : A-14 numunesinde her normal gerilme için kalıcı kayma mukavemeti

	3. çevrim	
	Normal(kPa)	Kayma (kPa)
Kalıcı	100	22.26
	200	44.82
	300	67.80

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de görüldüğü üzere A-14 deney numunesinde normal gerilme arttıkça pik ve kalıcı kayma mukavemeti değerlerinin arttığı görülebilmektedir. Normal gerilmelere karşılık gelen bu kayma gerilmeleri arasından yaklaşık bir doğru geçirilerek zarf elde edilir. Doğrunun yatayla yaptığı açı kalıcı kayma mukavemetini, düşey eksen kestiği nokta ise kohezyonu verir. Kalıcı kayma mukavemetinde genelde kohezyon bulunmamaktadır. Zarflara örnek vermek amacıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’deki değerler göz önünde bulundurularak Şekil 4.22’deki pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları elde edilir.



Şekil 4.22 : A-14 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemet zarfı

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi biri pik, diğeri kalıcı olmak üzere iki mukavemet zarfı elde edilir. Şekilden görüldüğü üzere pik kayma mukavemeti düşey eksenini kesmiş ve bir kohezyon değeri oluşturmuş ve pik mukavemet açısı 18° ’dir. Kalıcı mukavemette ise kohezyon bulunmamaktadır ve kalıcı kayma mukavemeti açısı 13° olarak elde edilmiştir. Ayrıca normal gerilmelere karşılık gelen kayma gerilmelerinin belirli bir doğru üzerinde olması deneysel çalışmadan düzgün sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. Diğer deneysel çalışmalarda da buna benzer sonuçlar elde edilmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR ve SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Önceki bölümde endeks özellikleri belirtilen zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinin sonuçları bu bölümde verilmektedir. Örselenmemiş kil numuneler üzerinde 0.035 mm/dak kesme hızında 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa olmak üzere 3 ayrı düşey gerilme altında tekrarlı kesme kutusu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, deneylerden önce her normal gerilme altında konsolidasyonunu tamamlanıncaya kadar bekletilmiştir. Ayrıca tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kayma mukavemeti parametrelerini karşılaştırmak amacıyla bir numune üzerinde halka kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Halka kesme deneyi 100 kPa ve 200 kPa düşey gerilme altında sistemin izin vermiş olduğu en düşük kesme hızı 20 mm/dak ile yapılmıştır. Halka kesme deneyi için numuneler konsolidasyonunu tamamlayıncaya kadar bekletilmiştir.

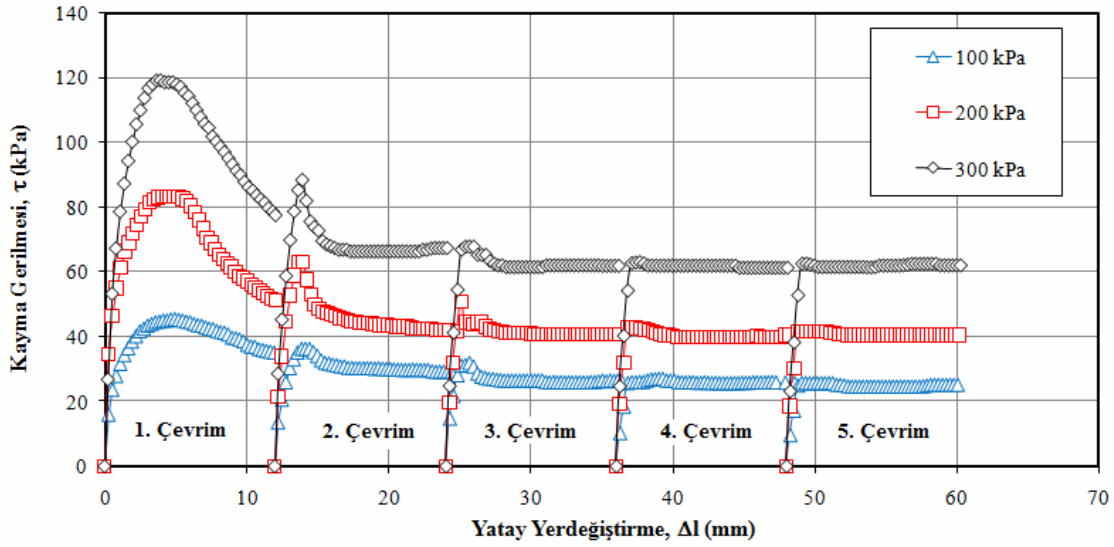
Tekrarlı kesme kutusu kesme işlemine yaklaşık sabit bir kayma gerilmesi değeri belirleninceye kadar devam edilmiştir. Kohezyonlu zemin üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinde, 3. çevrim sonucu elde edilen kayma gerilmeleri kalıcı kayma mukavemet değeri olarak alınmıştır. Elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılırları ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu ilişkilerin daha iyi anlaşılabilmesi için korelasyonlar geliştirilmiştir.

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinden belirlenen kayma mukavemeti parametreleri göçme zarflarına uygulanan doğrusal yaklaşım sonucu elde edilmiştir. Deney sonuçlarına ait örnekler aşağıda verilmiş ve tüm deney sonuçları tablolarda ifade edilmiştir. Son olarak İyisan ve diğ. (2006)'nin yapmış oldukları tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmış ve birlikte değerlendirilmiştir.

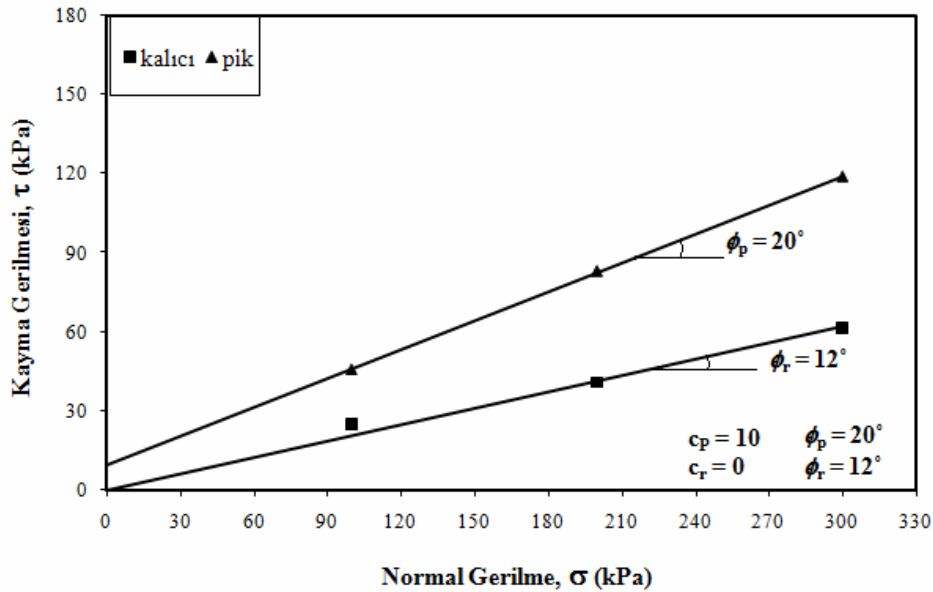
5.1 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçları

Zemin numuneleri üzerinde 0.035 mm/dak kesme hızında yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinden her bir düşey gerilme için her çevrim sonucu belirlenen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirme eğrileri ve zarfları 5'er çevrim olarak

gerçekleştirilen iki deney için elde edilen sonuçlar Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görülebilmektedir.

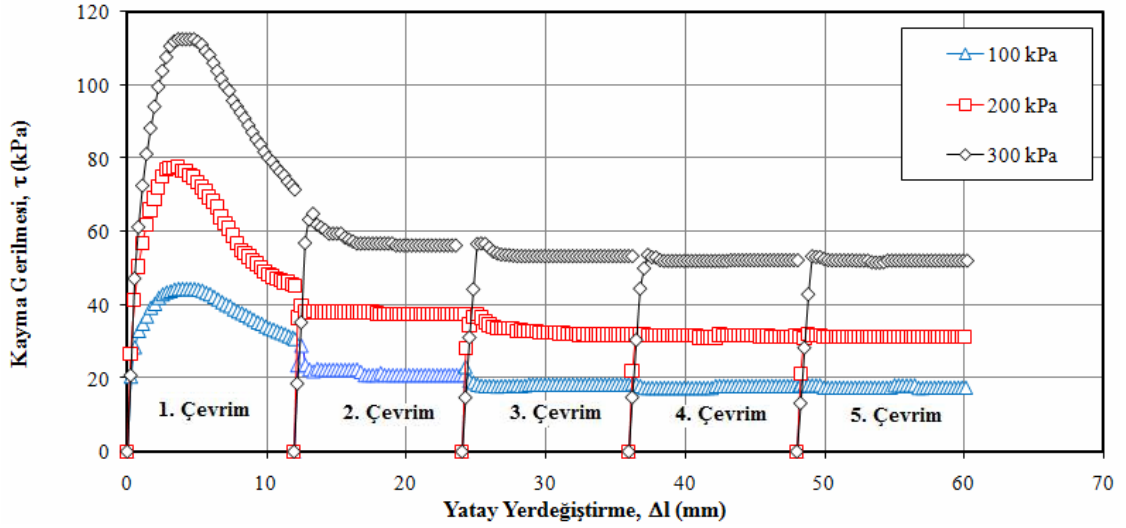


Şekil 5.1 : A-9 numunesinde 5 çevrimli tekrarlı kesme kutusu deneyi

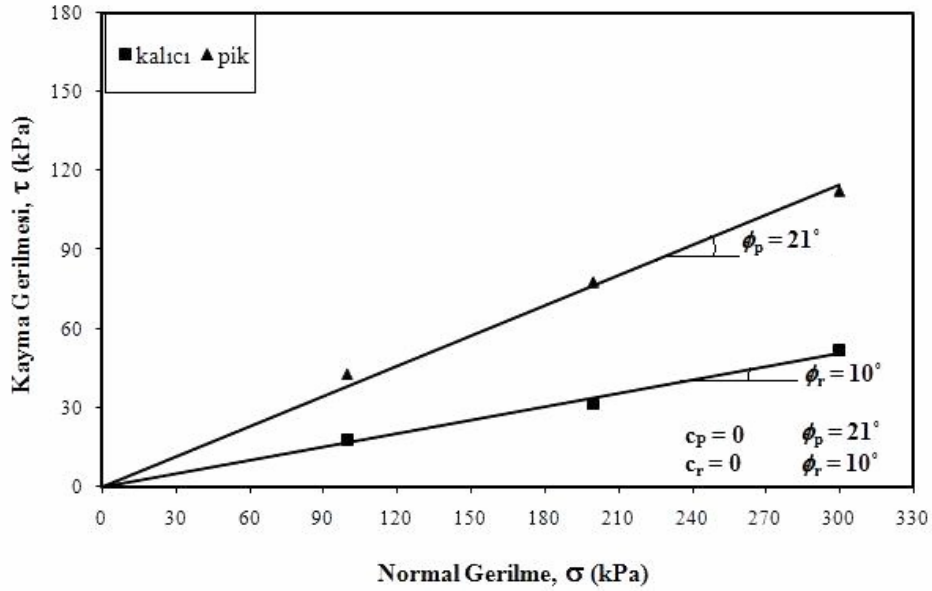


Şekil 5.2 : A-9 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları

Şekil 5.1’de verilmekte olan grafik A-9 numunesinin üzerinde 3 farklı gerilme altında 5’er çevrim olarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi grafiğidir. Bu grafikte görüldüğü gibi 4. ve 5. çevrimlerden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerleri ile 3. çevrimlerden elde edilen değerler yaklaşık aynıdır. Şekil 5.2’de ise bu deney sonucu elde edilen kalıcı ve pik kayma mukavemeti zarfları görülmektedir. Diğer 5 çevrim olarak gerçekleştirilen A-11 numunesi deney sonuçları ise Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de verilmektedir.



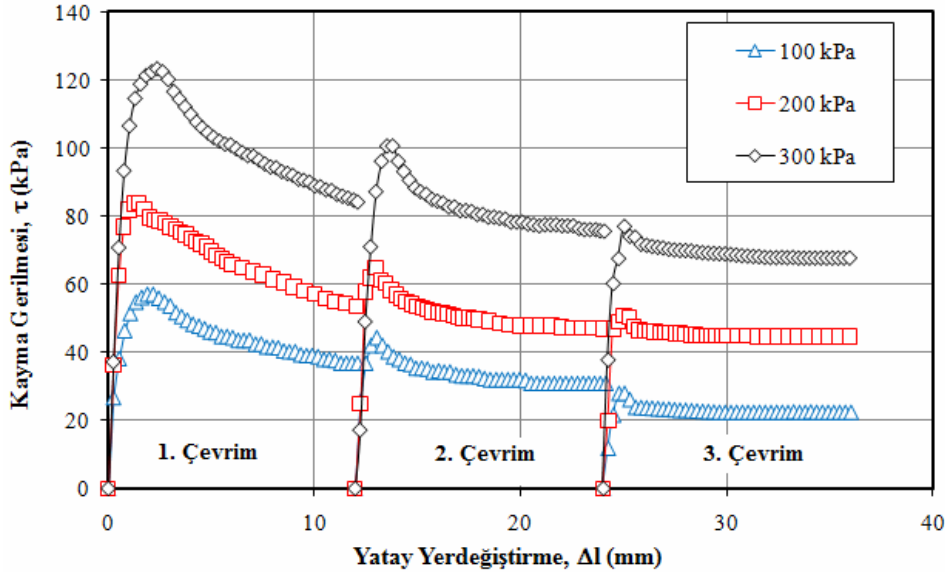
Şekil 5.3 : A-11 numunesinde 5 çevrimli tekrarlı kesme kutusu deneyi



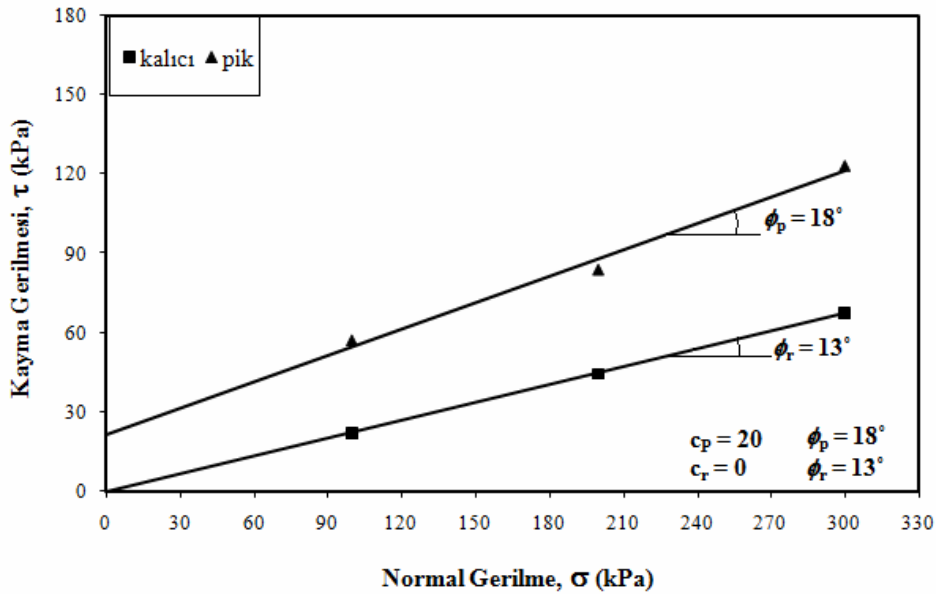
Şekil 5.4 : A-11 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları

A-11 numunesinin 3 farklı gerilme altında 5'er çevrim olacak şekilde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu elde edilen kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiği Şekil 5.3'de verilmiştir. Bu grafikte her normal gerilme için yapılan çevrimler toplu olacak şekilde ifade edilmiştir. A-9 numunesinde olduğu gibi 4. ve 5. çevrimlerden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerleri ile 3. çevrimlerden belirlenen değerler yaklaşık aynı çıkmıştır. Dolayısıyla A-9 ve A-11 numuneleri üzerinde yapılan deneyler yardımıyla zamandan tasarruf etmek için 3. çevrimler sonucu kalıcı kayma mukavemetine ulaşıldığı kabul edilmiştir ve diğer tekrarlı kesme kutusu deneyleri 3'er çevrim olacak şekilde yapılmıştır. A-9 ve A-11 numunelerinin deney sonuçları her bir gerilme için ayrı ayrı olacak şekilde gösterimi

Ek B bölümünde yer almaktadır. Zemin numuneleri üzerinde 3'er çevrim olarak gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrilerine ve göçme zarflarına örnek olarak plastisite indisi %56, likit limiti %78 olan A-14 numunesi için Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5 : A-14 numunesinde 3 çevrimli tekrarlı kesme kutusu deneyi



Şekil 5.6 : A-14 numunesi için pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları

Şekil 5.5'deki kayma gerilmesi – kayma yerdeğiştirmesi grafiğinde görüldüğü üzere A-14 numunesi üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu 3. çevrimlerde kalıcı mukavemete ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre Şekil 5.6'daki pik ve kalıcı kayma mukavemeti zarfları elde edilmiştir. Diğer deney sonuçları eklerde verilmiştir. Bütün

numuneler üzerinde gerçekleşen tekrarlı kesme kutusu deney sonucunda elde edilen pik ve kalıcı mukavemet parametreleri Çizelge 5.1’de belirtilmiştir.

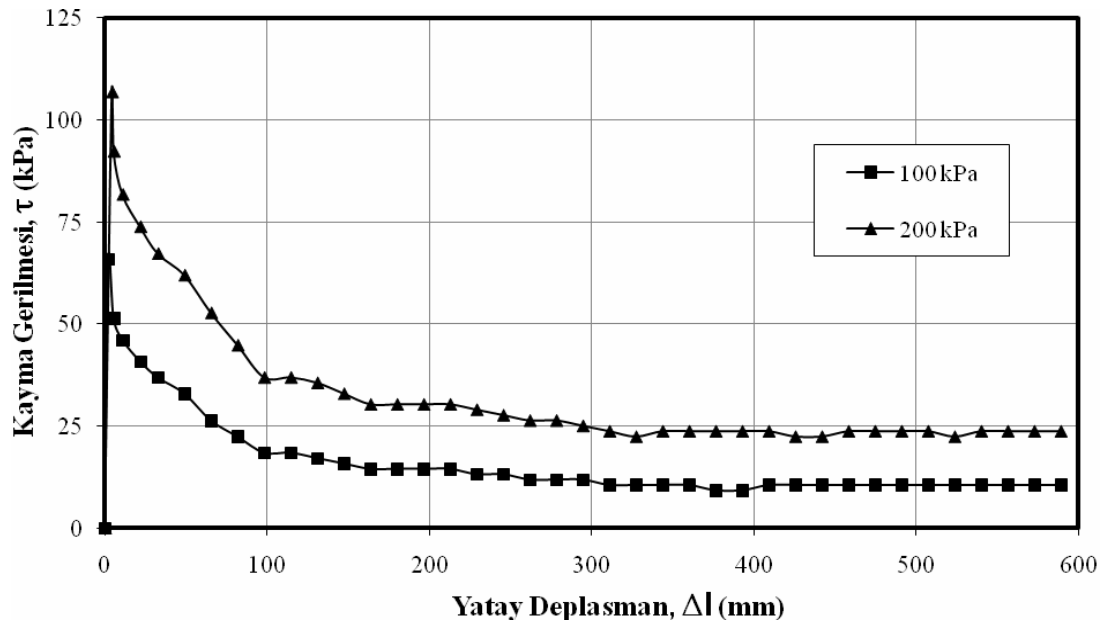
Çizelge 5.1 : A numunelerinin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları

Numune No	c_{rez} (kPa)	ϕ_{rez} (°)	c_{pik} (kPa)	ϕ_{pik} (°)
A1	0	9	36	15
A2	0	17	25	21
A3	15	10	30	22
A4	25	10	35	20
A5	0	16	50	20
A6	0	21	17	26
A7	0	12	0	21
A8	0	17	22	20
A9	0	12	10	20
A10	0	9	0	23
A11	0	10	0	21
A12	0	7	0	24
A13	0	8	0	19
A14	0	13	20	18
A15	0	21	25	26
A16	0	8	0	14
A17	0	16	42	18
A18	0	14	0	21
A19	0	16	0	22
A20	0	12	31	18
A21	0	10	0	16
A22	0	11	0	18
A23	0	8	17	15
A24	0	7	0	13

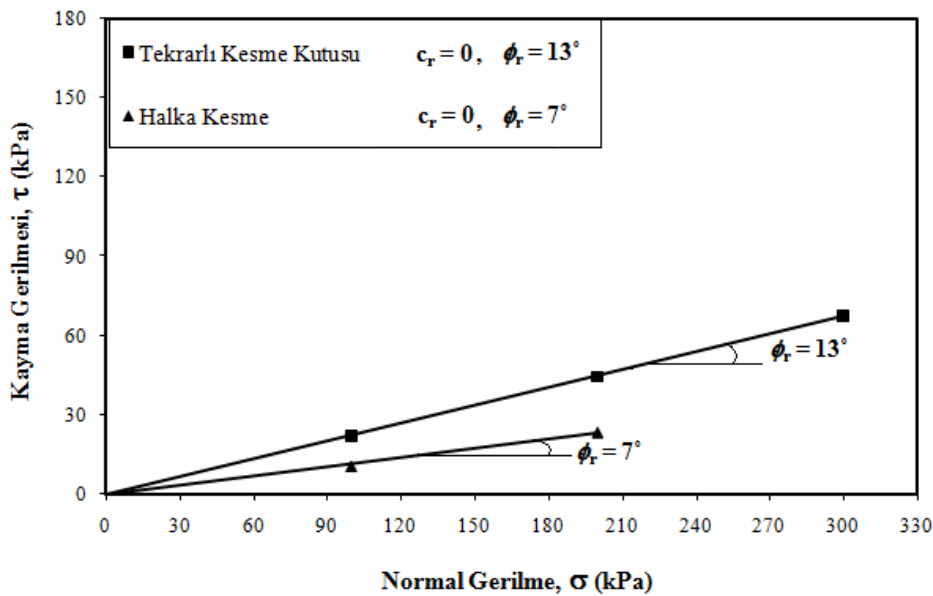
Çizelge 5.1’de zemin numunelerinin kalıcı ve pik kayma mukavemeti açıları ve kohezyonları verilmiştir. Bu çizelgede ifade edildiği gibi numunelerin kalıcı kayma mukavemeti açıları 7°-21° arasında, pik kayma mukavemeti açıları ise 13°-26° arasında değişmektedir. Ayrıca pik kayma mukavemetlerinde genelde kohezyon değeri vardır. Kalıcı değerlerde ise iki numunede kohezyon belirlenmiştir. Bütün numunelerin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları her normal gerilme için ayrı ayrı olacak şekilde Ek B kısmında yer almaktadır.

5.2 Halka Kesme Deney Sonuçları

Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla önceki bölümde ifade edilmiş olan likit limiti %78, plastisite indisi %56 olan A-14 numunesi üzerinde halka kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Sistemin mücadele etmiş olduğu en düşük hız olan 20 mm/dak ile yapılan halka kesme deneyi 100 kPa ve 200 kPa olmak üzere 2 ayrı düşey gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Her bir düşey gerilme için elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrileri ve kalıcı kayma mukavemeti zarfı, Şekil 5.7’de ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : A-14 numunesine ait halka kesme deney sonucu



Şekil 5.8 : A-14 numunesine ait göçme zarfları

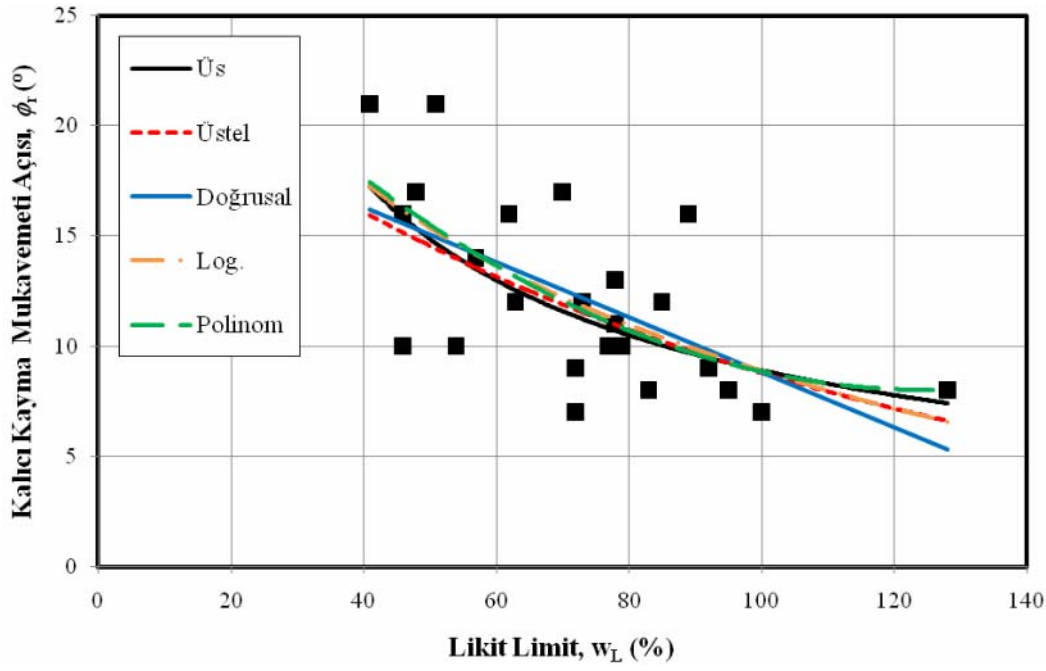
Şekil 5.7’de iki farklı normal gerilme altında gerçekleşen halka kesme deneyi sonucu elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi grafiği görülmektedir. Bu grafikten anlaşılabileceği gibi yaklaşık 600 mm deformasyon yapıldığında kalıcı kayma mukavemeti değerine ulaşıldığı kabul edilmiştir. Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen göçme zarfları Şekil 5.8’de aynı grafikte verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere tekrarlı kesme kutusu sonucu elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının değeri ($\phi_r = 13$), halka kesme deneyinden belirlenen değere ($\phi_r = 7$) göre daha büyüktür. Bunun nedeni deney yönteminin farklı olmasıdır. Aynı zamanda halka kesme deney sisteminin izin vermiş olduğu en düşük kesme hızının (20mm/dak) oldukça fazla olması da sonucu etkileyebilir. Halka kesme deneyi sonucunda kalıcı duruma ulaşıldığında kayma mukavemeti sadece kayma mukavemet açısına bağlı kalmaktadır. Kohezyon terimi görülmemektedir.

5.3 Tekrarlı Kesme Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının zeminlerin endeks özellikleri ile değişimleri incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda, ilişkilerin daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla korelasyonlar geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan numuneler “A” numuneleri, daha önceki çalışma olan İyisan ve diğ. (2006)’nin kullandıkları numuneler ise “B” numuneleri olarak isimlendirilmiştir.

5.3.1 A numuneleri ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler

Zeminlerin likit limit değerinin, dane boyutu azalırken yani özgül yüzey artarken artış göstermesi beklenir. Bundan dolayı kil minerolojisi ile likit limit arasında belirli bir ilişki bulunması gerekmektedir. Çünkü her ikisinde de dane büyüklüğü faktörü mevcuttur (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986). Şekil 5.9’da bu çalışma kapsamında bulunan 24 adet numunenin kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi görülmektedir. Bütün ilişkiler için üs, üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom eğrileri çizilmiş, denklemleri belirlenmiştir. Bu denklemler içerisinde en uygun olan üs eğri denklemleri göz önüne alınmıştır. Her şekil için denklemler ve bu denklemlerin korelasyon katsayıları tablolar halinde verilmiştir.



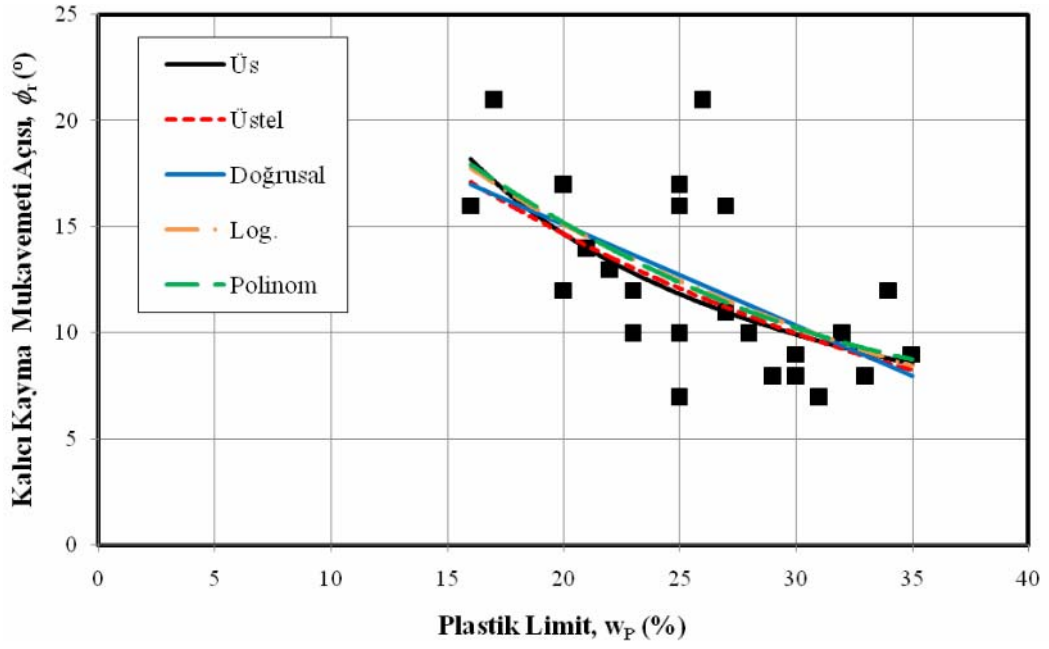
Şekil 5.9 : A numunelerinde ϕ_t 'nin w_L ile değişimi

Elde edilen ϕ_t eğri denklemi basit olmasından, bütün denklemler göz önüne alındığında daha kolay çözüm elde edilebilmesinden ve korelasyon katsayısının yüksek olmasından dolayı kullanışlı bir gösterimdir. Yapılan analizlerin hepsinde ϕ_t eğri denklemi kullanılmıştır. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi 24 adet numunenin kalıcı kayma mukavemet açısı ile likit limit arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu ilişkinin korelasyon katsayısı %41'dir. Çizelge 5.2'de bütün bu ilişkiler, denklemler ve korelasyon katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_t = 274w_L^{-0.74}$	0.41
Üstel	$\phi_t = 24.1e^{-0.01w_L}$	0.39
Doğrusal	$\phi_t = -0.13w_L + 21.30$	0.38
Logaritmik	$\phi_t = -9.38\ln(w_L) + 52.08$	0.41
Polinom	$\phi_t = 0.0013w_L^2 - 0.33w_L + 29$	0.42

Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi bağıntılar benzer korelasyon katsayılarına sahiptir. İlişkilerin daha doğru anlaşılabilmesi için ϕ_t bağıntısı göz önüne alınmıştır. Buna rağmen diğer bağıntılar da hem grafiklerde hem de çizelgelerde verilmiştir.



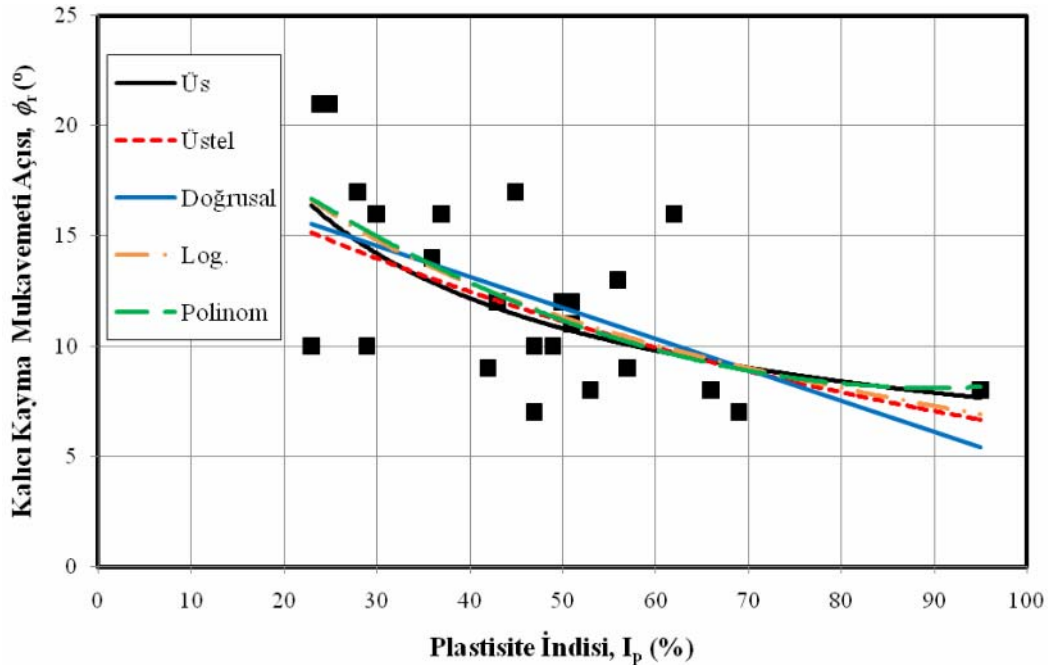
Şekil 5.10 : A numunelerinde ϕ_r 'nin w_p ile değişimi

Şekil 5.10'da, yapılan kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemet açısı ile plastik limit arasındaki ilişki gösterilmiştir. Üs denklem göz önüne alındığında %37 gibi bir korelasyon katsayısına sahiptir. Diğer deklemlerde yaklaşık aynı katsayıyı vermektedir. İfade edilen tüm ilişkiler Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastik limit arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 263w_p^{-0.96}$	0.37
Üstel	$\phi_r = 31.67e^{-0.04w_p}$	0.37
Doğrusal	$\phi_r = -0.48w_p + 24.62$	0.35
Logaritmik	$\phi_r = -11.9\ln(w_p) + 50.85$	0.36
Polinom	$\phi_r = 0.013w_p^2 - 1.17w_p + 33.16$	0.36

Şekil 5.10'da verilmiş olan ilişkilerin bağıntıları Çizelge 5.3'de ifade edilmiştir. Bu bağıntılar içerisinde Çizelge 5.2'de de olduğu gibi en yüksek korelasyon üs denkleme aittir. Kalıcı kayma mukavemet açılarının plastisite indisleri ile değişimi Şekil 5.11'de verilmiştir. Beklendiği üzere kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisinin artmasıyla azalma gösterse de aralarındaki ilişkiler orta düzeydedir.



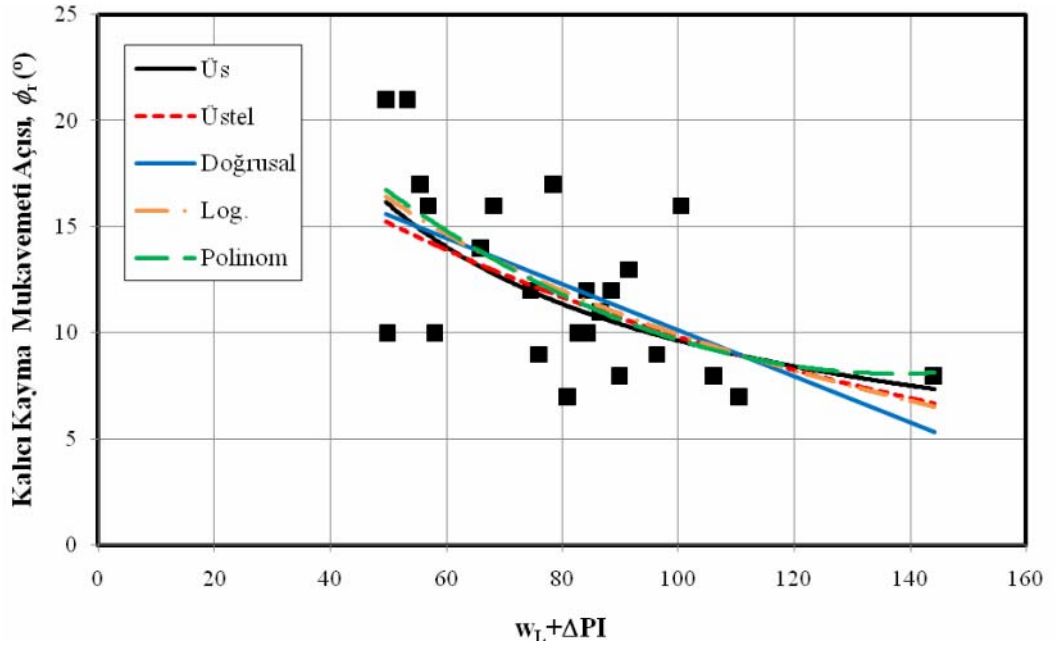
Şekil 5.11 : A numunelerinde ϕ_t 'nin I_p ile değişimi

Şekil 5.11'da görüldüğü gibi plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki %35 olan bir korelasyon katsayısına sahiptir. Diğer bağıntılar da Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_t = 88.6I_p^{-0.54}$	0.35
Üstel	$\phi_t = 19.69e^{-0.01I_p}$	0.33
Doğrusal	$\phi_t = -0.14I_p + 18.8$	0.32
Logaritmik	$\phi_t = -6.85\ln(I_p) + 38.1$	0.36
Polinom	$\phi_t = 0.002I_p^2 - 0.34I_p + 23.58$	0.36

Çizelge 5.4'de ifade edildiği gibi kısa olan ve yüksek korelasyon katsayısına sahip olan ilişki üs denklemdir. Bu yüzden likit limitin ve plastik limitin kalıcı kayma mukavemetiyle arasında olduğu gibi bu ilişkide de üs denklem göz önüne alınmasının yanında diğer bağıntılara da yer verilmiştir. Başka bir inceleme de kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limitin plastisite kartında yer alan A hattına olan uzaklıkla toplamı arasında yapılmış ve Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 : A numunelerinde ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi

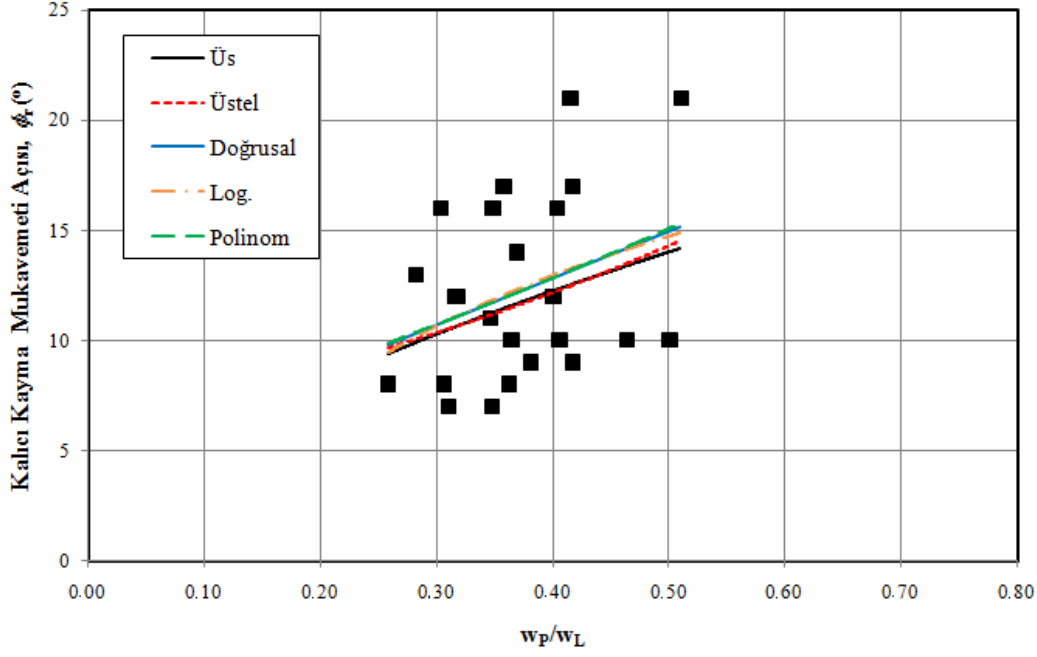
ΔPI , numunelerin likit limit ile plastisite indisi arasındaki ilişkiden oluşan Casagrande kartında A hattına olan uzaklığın simgesidir. Wesley (2003) de kalıcı kayma mukavemeti ile ΔPI arasında bir çalışma gerçekleştirmiştir. ΔPI 'yı belirlerken (5.1)'deki formül kullanılmaktadır. Şekil 5.12'de görüldüğü üzere %37 gibi bir korelasyon katsayısına sahiptir.

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

Çizelge 5.5 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile $w_L + \Delta PI$ arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 288.7(w_L + \Delta PI)^{-0.74}$	0.37
Üstel	$\phi_r = 23.58e^{-0.01(w_L + \Delta PI)}$	0.35
Doğrusal	$\phi_r = -0.11(w_L + \Delta PI) + 21$	0.34
Logaritmik	$\phi_r = -9.32\ln(w_L + \Delta PI) + 52.85$	0.37
Polinom	$\phi_r = 0.001(w_L + \Delta PI)^2 - 0.31(w_L + \Delta PI) + 29.26$	0.38

İfade edilen bağıntılarda Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi en yüksek korelasyon katsayısı polinoma aittir. Ancak polinom denkleminin derecesinin 2 olması ve ilişkiyi açıklama bakımından üs denkleme göre uzun ve karmaşık olması nedeniyle önceki ilişkilerde olduğu gibi üs denklem göz önüne alınmıştır.



Şekil 5.13 : A numunelerinde ϕ_r 'nin w_p/w_L oranı ile değişimi

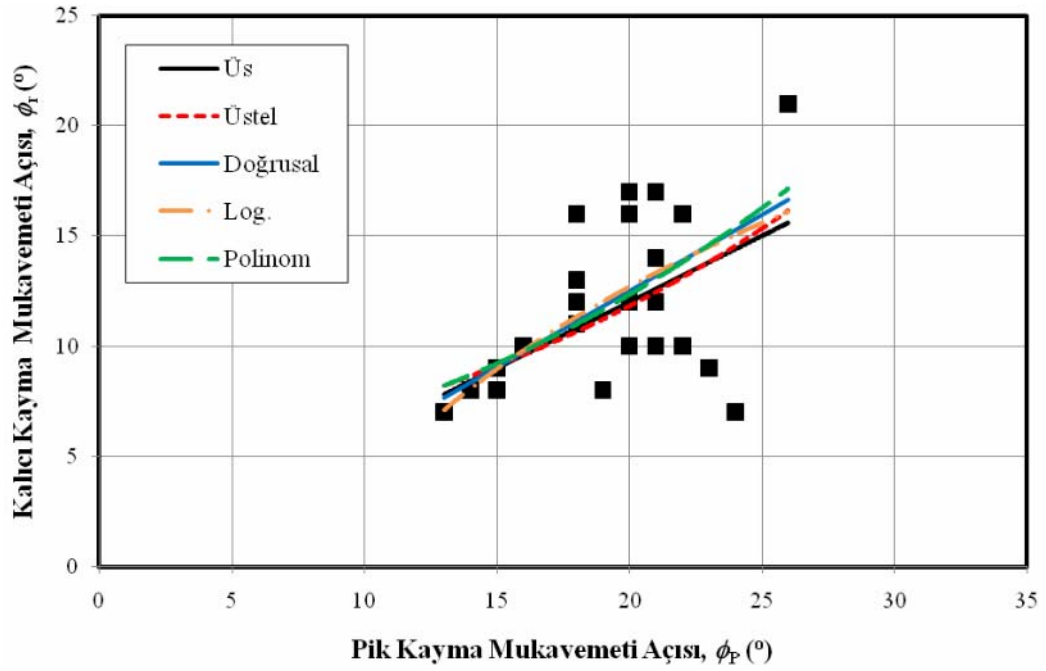
Elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit / likit limit (w_p/w_L) oranı arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Şekil 5.13'te belirtilen ilişkideki korelasyon katsayısı %1'dir. Denklemler ve korelasyon katsayıları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile w_p/w_L oranı arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 21.28(w_p / w_L)^{0.6}$	0.10
Üstel	$\phi_r = 6.43e^{1.6(w_p/w_L)}$	0.10
Doğrusal	$\phi_r = 21.25(w_p/w_L)+4.38$	0.11
Logaritmik	$\phi_r = 7.9\ln(w_p/w_L)+20.21$	0.11
Polinom	$\phi_r = 6.7(w_p/w_L)^2+16.1(w_p/w_L)+5.34$	0.11

Kalıcı kayma mukavemeti ile w_p/w_L oranı arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu ilişkiler birçok bağıntı halinde Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bağıntıların geneline bakıldığında korelasyon katsayısı %10-%11 gibidir.

Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda kalıcı kayma mukavemet açısı yanında ayrıca pik kayma mukavemet açıları da belirlenmiştir. Şekil 5.14'te pik kayma mukavemeti ile kalıcı kayma mukavemet açıları arasındaki ilişki verilmiştir.



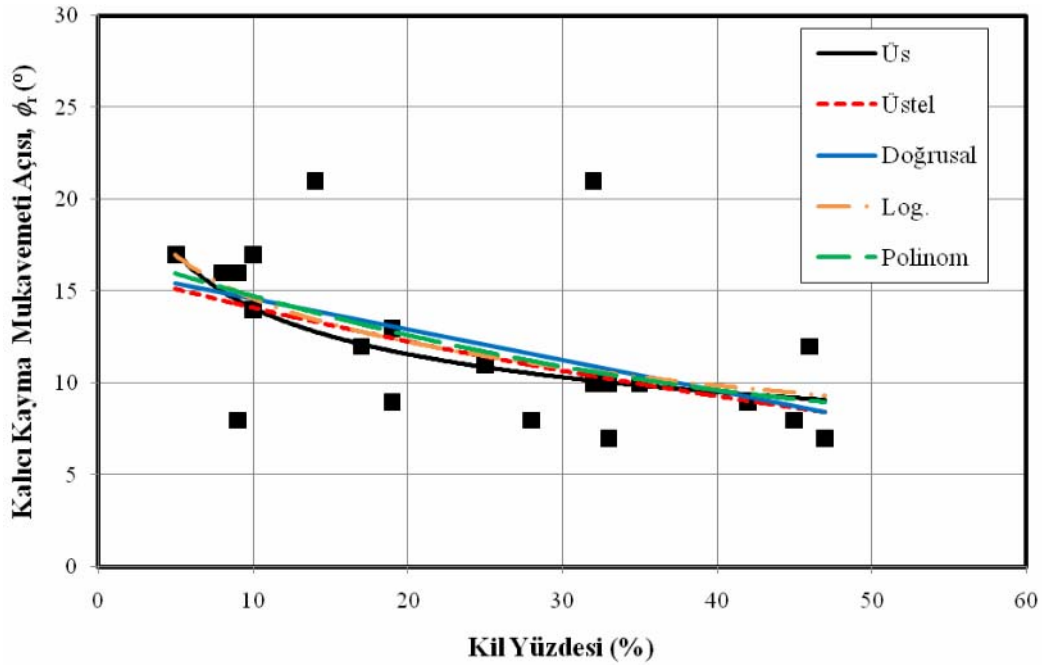
Şekil 5.14 : A numunelerinde ϕ_r 'nin ϕ_p ile değişimi

Şekil 5.14'te görülen pik ile kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki ilişki %30 olan bir korelasyon katsayısına sahiptir. Ayrıca numunelerin yayılımı dağınık bir şekildedir. Pik ile kalıcı kayma mukavemet açıları arasındaki ilişkinin çeşitli bağıntılarla ifadesi ve bu bağıntıların korelasyon katsayıları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile ϕ_p arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 0.61 \phi_p^{0.99}$	0.30
Üstel	$\phi_r = 4.2e^{0.52 \phi_p}$	0.30
Doğrusal	$\phi_r = 0.69 \phi_p - 1.25$	0.33
Logaritmik	$\phi_r = 12.89 \ln(\phi_p) - 25.92$	0.32
Polinom	$\phi_r = 0.02 \phi_p^2 + 0.04 \phi_p + 4.85$	0.33

Çizelge 5.7'de verilen bağıntılarda en yüksek korelasyon katsayısının doğrusal denkleme ait olduğu görülmektedir. Bunun nedeni artışın doğrusallığa yakın olmasıdır. Ancak üs denklemin korelasyon katsayısı da doğrusal denkleme oldukça yakındır. Önceki ilişkilerde olduğu gibi üs denklem göz önüne alınmıştır.



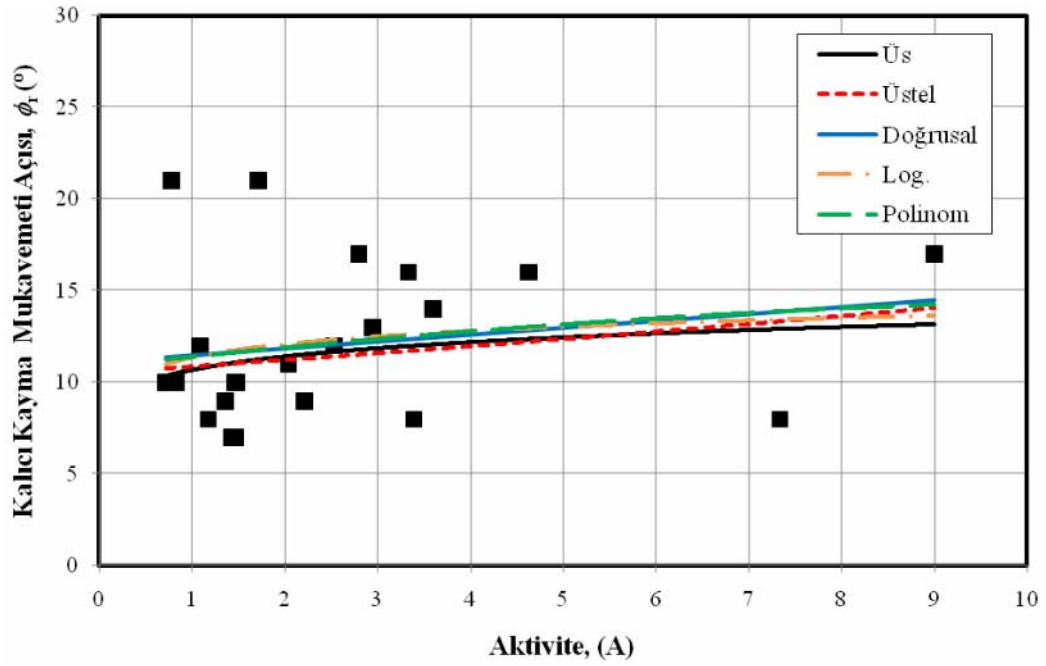
Şekil 5.15 : A numunelerinde ϕ_t 'nin kil yüzdesi ile değişimi

Yapılmış olan hidrometre ve elek analizleri sonucunda elde edilen kil yüzdesiyle kalıcı kayma mukavemeti açısını değişimi Şekil 5.15'te verilmiştir. Bu şekile göre kil yüzdesi artarken kalıcı mukavemet açısı azalmaktadır. Ancak bazı numuneler aykırılık göstermekte ve korelasyon katsayısını azaltmaktadır. Bu ilişki için belirtilen bağıntılar Çizelge 5.8'de verilmiştir.

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

Tip	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_t = 27.16(KY)^{-0.29}$	0.32
Üstel	$\phi_t = 16.23e^{-0.01(KY)}$	0.32
Doğrusal	$\phi_t = -0.17(KY) + 16.28$	0.29
Logaritmik	$\phi_t = -3.43\ln(KY) + 22.50$	0.29
Polinom	$\phi_t = 0.002(KY)^2 - 0.28(KY) + 17.29$	0.29

Kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısıyla olan ilişkisi incelenmiş ve çeşitli bağıntılar elde edilmiştir. Çizelge 5.8'de üs ve üstel bağıntıların korelasyon katsayılarının diğer bağıntılara oranla daha büyük olduğu görülebilmektedir. Başka bir inceleme kalıcı kayma mukavemet açısı ile aktivite arasında gerçekleştirilmiştir. Aktivite, plastisite indisinin kil yüzdesine olan oranıdır. Şekil 5.16'da kalıcı kayma mukavemet açısının aktivite ile olan değişimi verilmiştir.



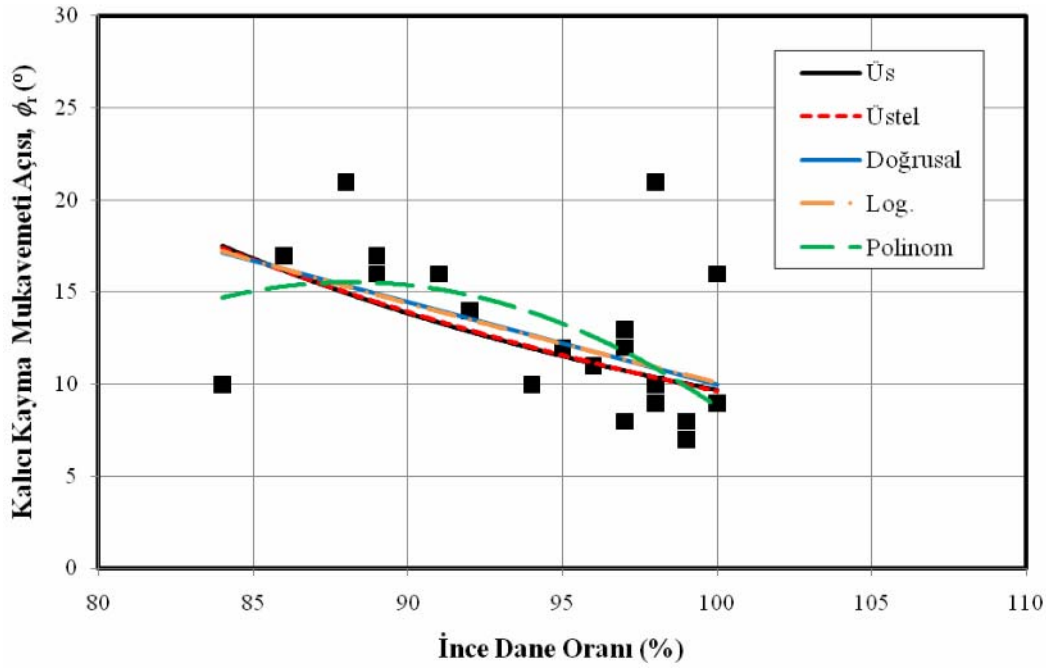
Şekil 5.16 : A numunelerinde ϕ_t 'nin aktivite ile değişimi

Kalıcı kayma mukavemetinin aktiviteyle nasıl değiştiği Şekil 5.16'da belirtildiği üzere incelenmiştir. Çeşitli bağıntılar da elde edilmiştir. Zemin numuneleri belirli bir düzen içerisinde değildir. Bir çok numune bu ilişkide aykırılık göstermiştir. Bu nedenden dolayı korelasyon katsayı da oldukça düşüktür. Belirlenen bağıntılar ve bu bağıntıların korelasyon katsayıları Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9 : Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile aktivite arasındaki ilişkiler

Tip	Bağıntı	R ²
Üs	$\phi_t = 10.68(A)^{0.09}$	0.04
Üstel	$\phi_t = 10.52e^{0.03(A)}$	0.04
Doğrusal	$\phi_t = 0.37(A) + 11.12$	0.03
Logaritmik	$\phi_t = 1.04\ln(A) + 11.34$	0.03
Polinom	$\phi_t = -0.02(A)^2 + 0.56(A) + 10.86$	0.03

Çizelge 5.9'da görüldüğü üzere bağıntıların korelasyon katsayıları birbirlerine çok yakın olmalarına rağmen değerleri oldukça düşüktür. Bunun nedeni bazı numunelerin ilişkiye aykırılık göstermesidir. Yapılan son inceleme ise kil ve silt yüzdelere bağlı olan ince dane oranı ile kalıcı kayma mukavemeti arasında yapılmıştır. Bu ilişkiyi Şekil 5.17'de görmek mümkündür.



Şekil 5.17 : A numunelerinde ϕ_r 'nin ince dane oranı ile değişimi

Şekil 5.17'de ince dane oranı ile kalıcı kayma mukavemet açıları arasındaki ilişki incelenmiştir. Aktivite ile olan ilişkide olduğu gibi burada da bazı numuneler aykırılık göstermiştir. Şekil 5.17'de görüldüğü üzere numuneler farklı yayımlar göstermiştir. Bu da ilişkinin korelasyon katsayısını düşürmüştür. Elde edilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları Çizelge 5.10'da verilmiştir.

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

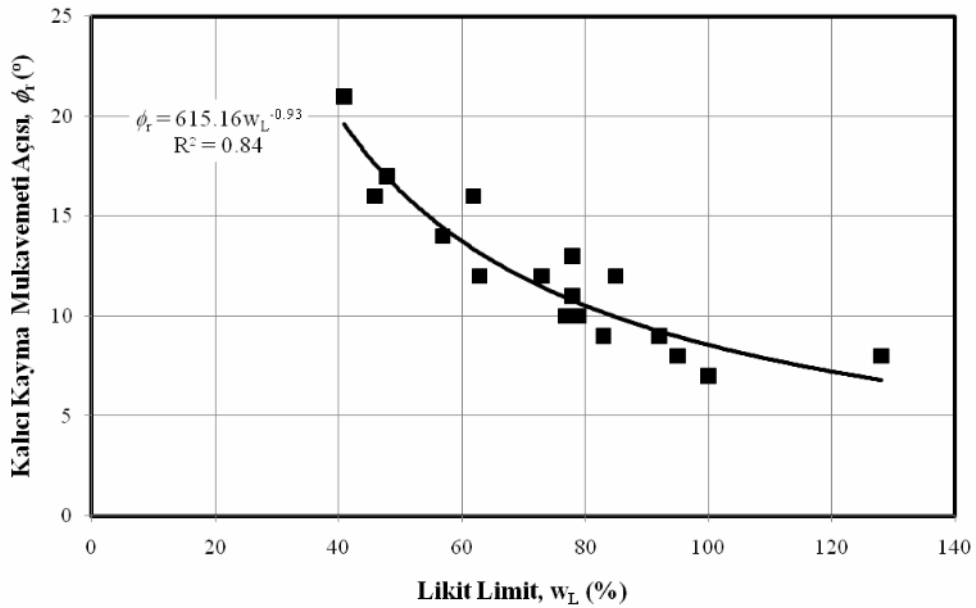
Tip	Bağıntı	R^2
Üs	$\phi_r = 6E+07(\text{İDO})^{-3.39}$	0.27
Üstel	$\phi_r = 388.42e^{-0.04(\text{İDO})}$	0.28
Doğrusal	$\phi_r = -0.44(\text{İDO})+54.44$	0.26
Logaritmik	$\phi_r = -40.76\ln(\text{İDO})+197.8$	0.25
Polinom	$\phi_r = -0.05(\text{İDO})^2+8.44(\text{İDO})-356.78$	0.30

Çizelge 5.10'da elde edilen polinom bağıntısının en yüksek korelasyonu vermesine karşın ikinci derece polinom olması ve karmaşık olması açısından kullanılması uygun değildir. Bu ilişkiyi iyi açıklayabilmesi, ve basit gösterimi amacıyla üs denklem göz önüne alınmıştır. Korelasyon katsayısı da diğer bağıntılara göre yüksek sayılabilir.

İncelenmiş olan bütün ilişkilere bakıldığında düzgün ve anlamlı bir korelasyonun kurulamadığı görülmektedir. Bu nedenle belirlenmiş olan korelasyonlarda, ilişkilerin

daha iyi tanımlanabilmesi için geliştirme yapılmış, numune sayısının azaltılması yoluna gidilmiştir. Numune sayısı azaltılırken, kalıcı kayma mukavemetinde kohezyona sahip olan zeminlere öncelik verilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonrasında geriye kalan 17 adet numunede kalıcı kayma mukavemeti açıları ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler tekrardan gözden geçirilmiştir. Bu incelemelerde ilişkiyi kolay tanımlayabilmek, basit ve doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla sadece üs eğri denklemleri kullanılmıştır. Üstel, doğrusal, logaritmik ve polinom denklemleri göz önüne alınmamıştır.

Şekil 5.18’de 17 adet numunenin kalıcı kayma mukavemet açısının likit limit ile değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere kalıcı kayma mukavemet açısı artan likit limit ile azalmaktadır. Likit limiti yüksek numuneler, düşük kalıcı kayma mukavemet açısına sahiptir. Bu şekilde numunelerin belirli bir düzende olduğu görülmektedir.

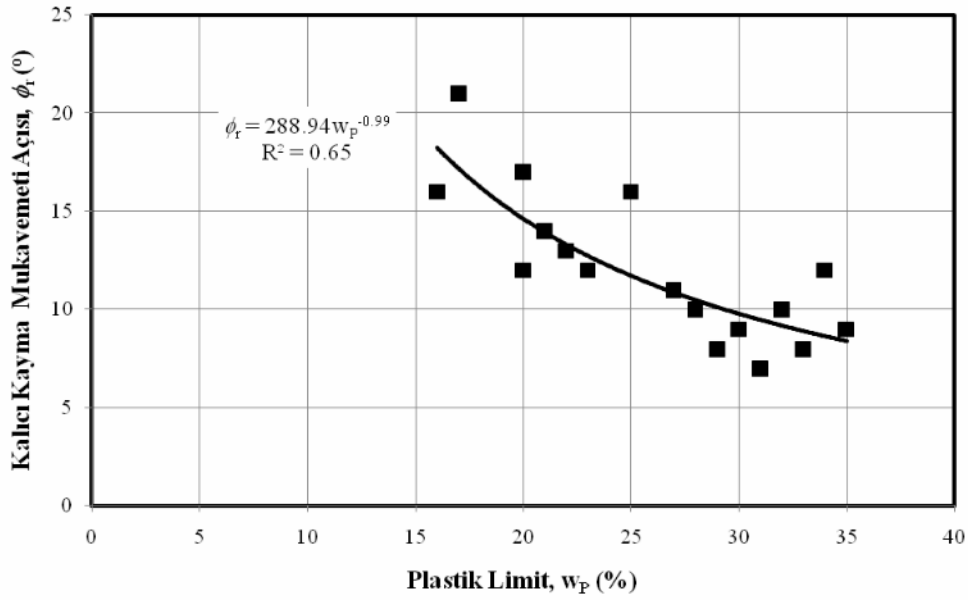


Şekil 5.18 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin w_L ile değişimi

Şekil 5.18’de verildiği gibi kalıcı kayma mukavemet açısı (ϕ_r) ile likit limit (w_L) arasında %84 gibi yüksek korelasyon katsayısına sahip bir ilişki elde edilmiştir. Bu ilişkinin denklemi (5.2)’de belirtilmiştir.

$$\phi_r = 615.16 w_L^{-0.93} \quad (5.2)$$

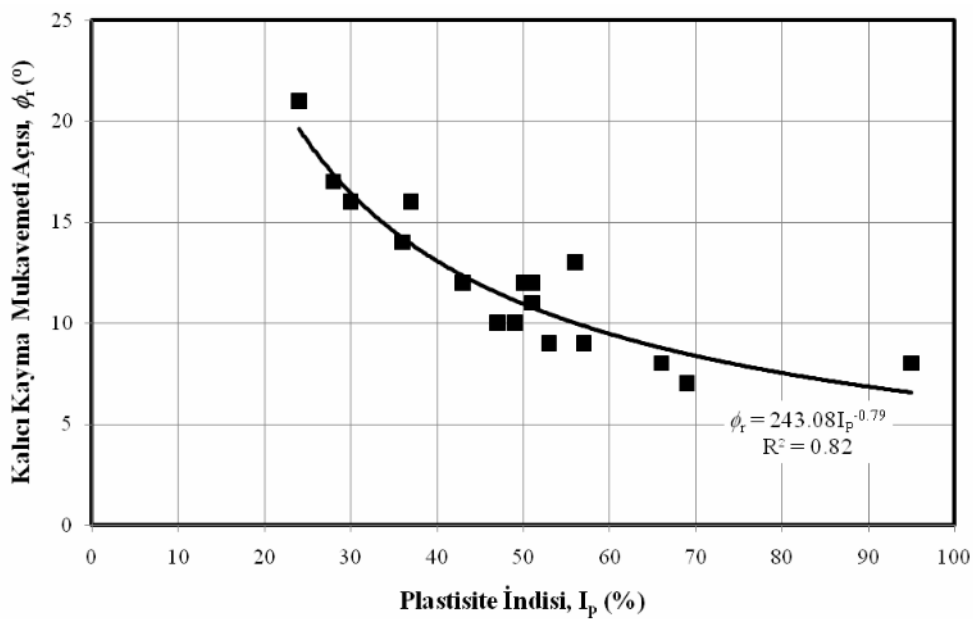
Plastik limit ile kalıcı kayma mukavemetinin değişimi incelenmiştir. Bu ilişki Şekil 5.19’da grafik olarak verilmiştir. Ayrıca bu ilişkiyi daha anlaşılır olması için bir bağıntı geliştirilmiştir.



Şekil 5.19 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin w_p ile değişimi

Plastik limit (w_p) ile kalıcı kayma mukavemetinin değişimi Şekil 5.19'da verilmektedir. Şekil 5.18'deki ilişkiye benzer bir ilişki burada da görülmektedir. Artan plastik limitle kalıcı kayma mukavemet açısı azalma eğilimi göstermektedir. Kısacası zeminlerde plastik kıvam arttıkça kalıcı kayma mukavemet açıları (ϕ_r) düşer. Ancak bu ilişkinin korelasyon katsayısı %65'dir. Numunelerin oldukça bir düzen içinde olduğu görülmektedir. İfade edilen ilişkinin denklemi ise (5.3)'de belirtilmiştir.

$$\phi_r = 288.94 w_p^{-0.99} \quad (5.3)$$

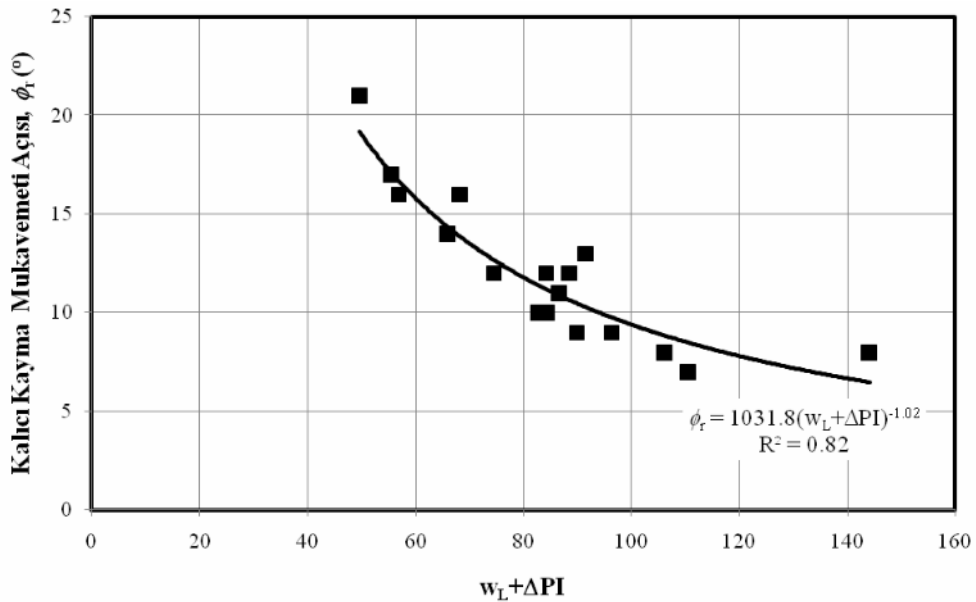


Şekil 5.20 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin I_p ile değişimi

Likit limit (w_L) ile plastik limit (w_P) arasındaki fark olan plastisite indisinin (I_p) artmasıyla elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları düşmektedir. Bu ilişki Şekil 5.20’de görülmekte ve %82 gibi yüksek sayılabilecek bir korelasyon katsayısına sahiptir. Elde edilen ilişkinin denklem olarak ifadesi (5.4)’de verilmektedir.

$$\phi_r = 243.08 I_p^{-0.79} \quad (5.4)$$

Numunelerin, plastisite kartında bulunan A hattına olan uzaklığın (ΔPI) likit limitle toplamının ($w_L + \Delta PI$) artmasıyla kalıcı kayma mukavemeti açısını düşürmektedir. Şekil 5.21’de açıkça görülebilmektedir. Numunelerin hepsi uyum sağlamış ve düzgün bir ilişki elde edilmiştir.

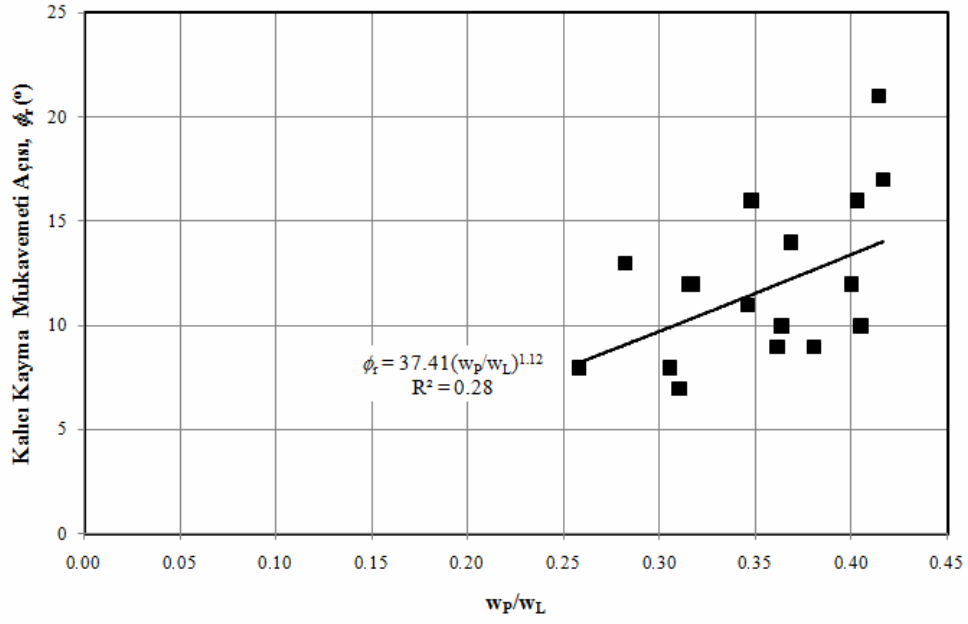


Şekil 5.21 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi

$$\phi_r = 1031.8(w_L + \Delta PI)^{-1.02} \quad (5.5)$$

Likit limitin, A hattına olan uzaklıkla toplamı ve kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki denklem olarak (5.5)'de verilmiştir. Ayrıca korelasyon katsayısı değeri %82'dir. Bu ilişki, önceki ilişkilere benzer biçimde yüksek korelasyon katsayısına sahiptir.

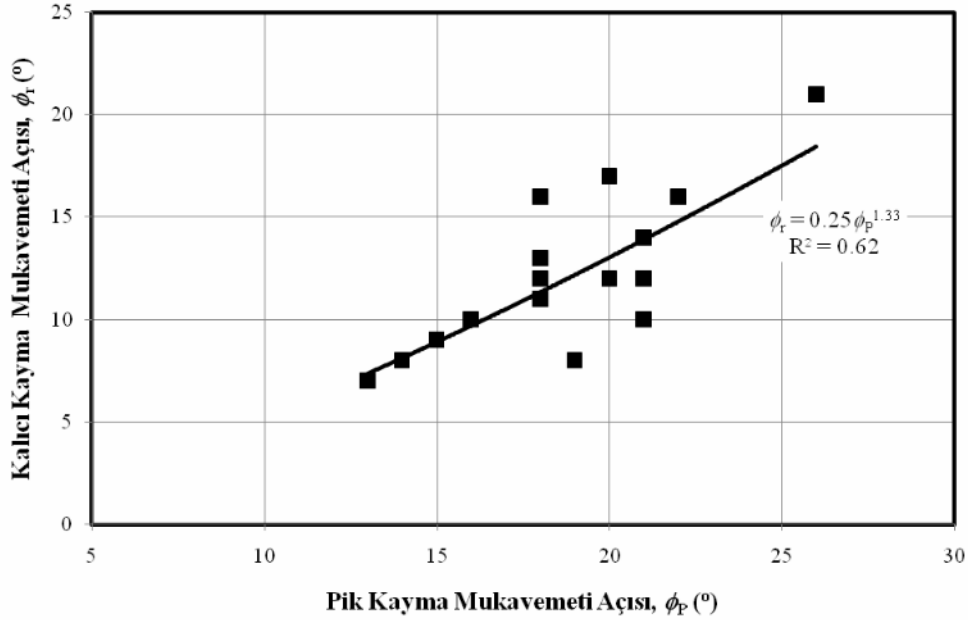
Bir başka inceleme kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasında gerçekleştirilmiştir. Bu ilişkinin grafik olarak açıklaması Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin w_p/w_L oranı ile değişimi

Şekil 5.22'de de görüldüğü gibi bu ilişki düşük korelasyon katsayısına sahiptir. Korelasyon kat sayısı %28'dir. Bunun anlamı, 17 zemin numunesi için plastik limit/likit limit oranı ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasında düzgün bir ilişkinin olmamasıdır. Denklemi (5.6)'te görülmektedir.

$$\phi_r = 37.407(w_p / w_L)^{1.12} \quad (5.6)$$



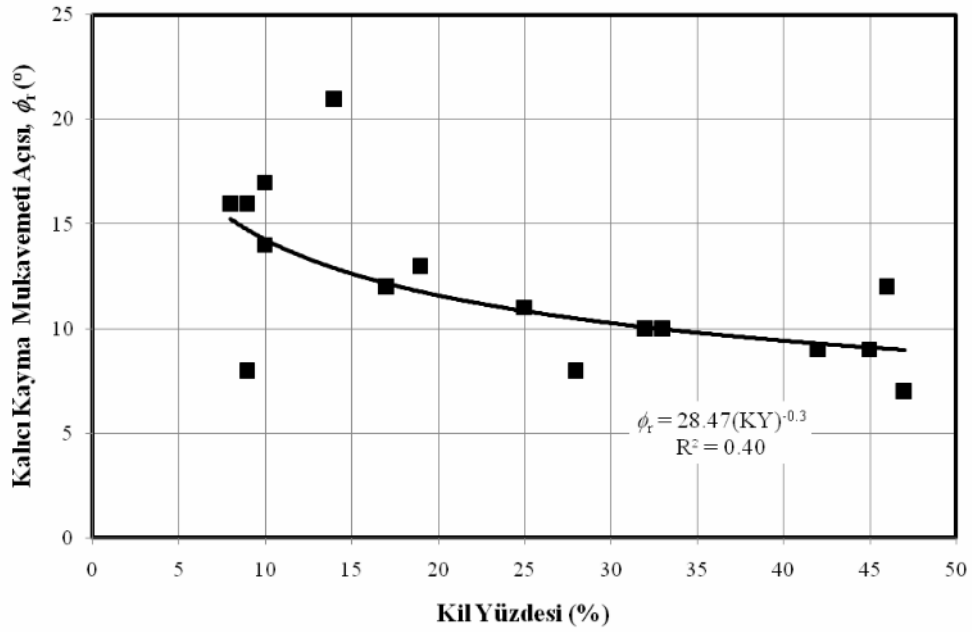
Şekil 5.23 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin ϕ_p ile değişimi

Şekil 5.23'de tekrarlı kesme kutusu deneyi sırasında elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında bir ilişki

gösterilmiştir. %62 korelasyon katsayısına sahip olan bu ilişki, önceki ilişkilerin tersine pik kayma mukavemet açıları arttıkça kalıcı kayma mukavemeti de artış göstermektedir. Pik kayma mukavemet açısı ne kadar yüksek olursa kalıcı kayma mukavemet açısı da o kadar büyük olur. Denklem (5.7)'de ifade edilmiştir.

$$\phi_r = 0.25\phi_p^{1.33} \quad (5.7)$$

Gerçekleştirilen elek ve hidrometre analizleri sonucu elde edilen kil yüzdeleri ile kalıcı kayma mukavemeti incelenmiş ve Şekil 5.24'teki ilişki belirtilmiştir.

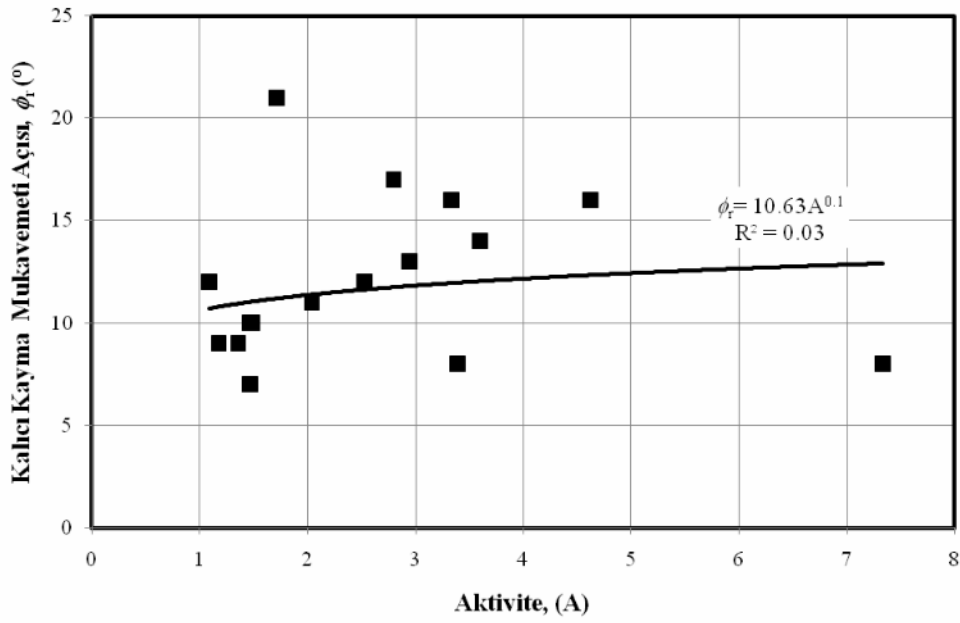


Şekil 5.24 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin kil yüzdesi ile değişimi

Yapılmış olan bu çalışma sonucunda %40 gibi düşük bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Artan kil yüzdesi (KY) kalıcı kayma mukavemeti açısını (ϕ_r) düşürse de bu sonuca göre numunelerden bazıları uygunluk göstermemektedir. Denklem (5.8)'de verilmiştir.

$$\phi_r = 28.47(KY)^{-0.3} \quad (5.8)$$

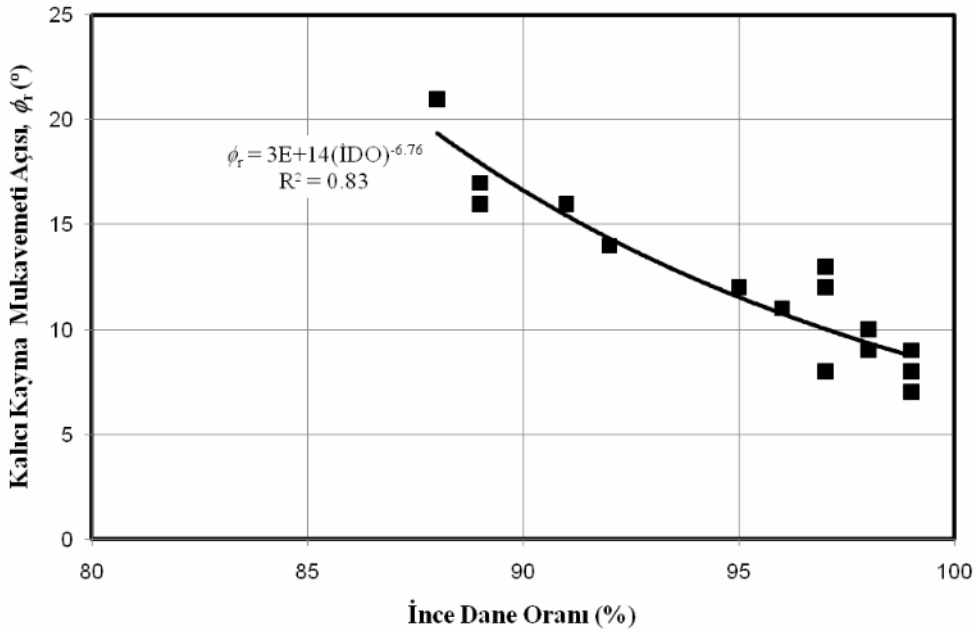
Başka bir araştırma ise kalıcı kayma mukavemeti açısı ile aktivite (A) arasında gerçekleştirilmiştir. Bu inceleme sonucu Şekil 5.25'teki ilişki elde edilmiştir.



Şekil 5.25 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin aktivite ile değişimi

Plastisite indisinin kil yüzdesine oranı olarak ifade edilen aktivite değerleri ile kalıcı kayma mukavemet açısı arasındaki ilişki yapılan çalışmalarla incelenmiştir. Bu ilişki Şekil 5.25'te gösterilmiştir. Bu ilişki %2 gibi çok düşük bir korelasyon katsayısına sahiptir. Kısacası belirgin bir ilişkinin olmadığı görülebilmektedir. Numuneler burada belirli bir düzen içerisinde değildir. İlişkinin denklem olarak (5.9)'da ifade edilmiştir.

$$\phi_r = 10.63(A)^{0.1} \quad (5.9)$$



Şekil 5.26 : Kalan numunelerde ϕ_r 'nin ince dane oranı ile değişimi

Şekil 5.26’da ifade edilen ilişki kalıcı kayma mukavemeti ile ince dane oranı arasındadır. Çok küçük bir aralıkta değişmekte olan ince dane oranı azalırken kalıcı kayma mukavemeti açısını düşürmektedir. Ortaya çıkan ilişki %83 gibi yüksek bir korelasyon katsayısına sahiptir. Denklem olarak ifadesi (5.10)’da verilmektedir.

$$\phi_t = 3E+14(\text{IDO})^{-6.76} \quad (5.10)$$

Ayrıca yapılan regresyon analizleri sonucunda zemin numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti açılarıyla plastisite indisi, pik kayma mukavemeti açıları ve likit limitleri arasında ilişkiler belirlenmiştir. Bu ilişkilerin denklem olarak ifadeleri (5.11), (5.12) ve (5.13)’de görülmektedir.

$$\phi_r = 1.25I_p^{-0.59}\phi_p^{0.63} \quad (5.11)$$

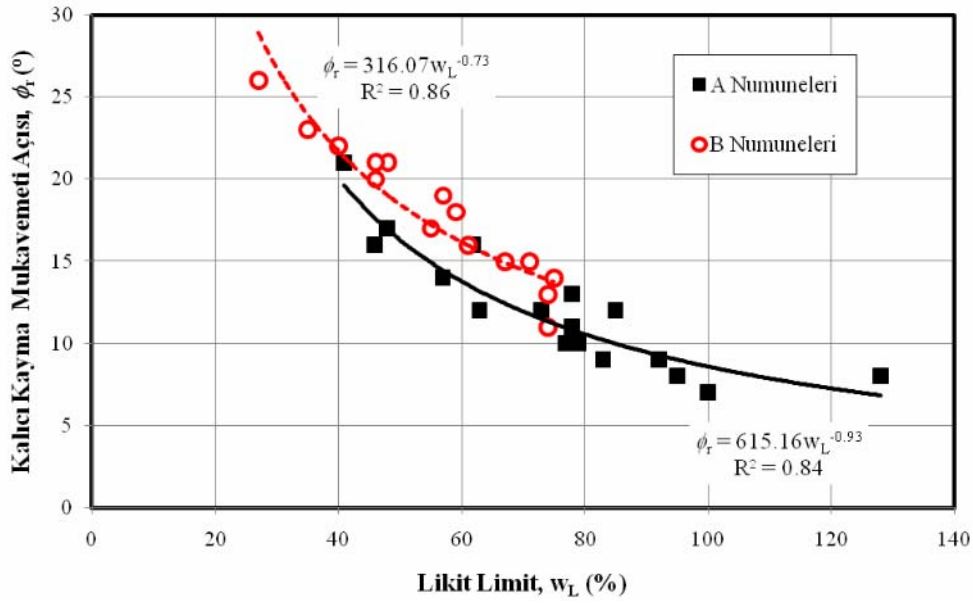
$$\phi_r = 2.73w_L^{-0.77}I_p^{-0.14} \quad (5.12)$$

$$\phi_r = 1.61w_L^{-0.97}I_p^{0.25}\phi_p^{0.67} \quad (5.13)$$

Gerçekleştirilen incelemeler sonucunda kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit, plastik limit, plastisite indisi, likit limit ile plastisite kartında A hattına olan uzaklıkla toplamı, pik kayma mukavemeti açısı ve ince dane oranı arasında oldukça yüksek korelasyon katsayılarına sahip olan ilişkiler elde edilmiştir. Dolayısıyla A ve B numunelerinin birlikte incelenmesi sırasında ince dane oranı haricinde sadece bu ilişkiler göz önüne alınmıştır.

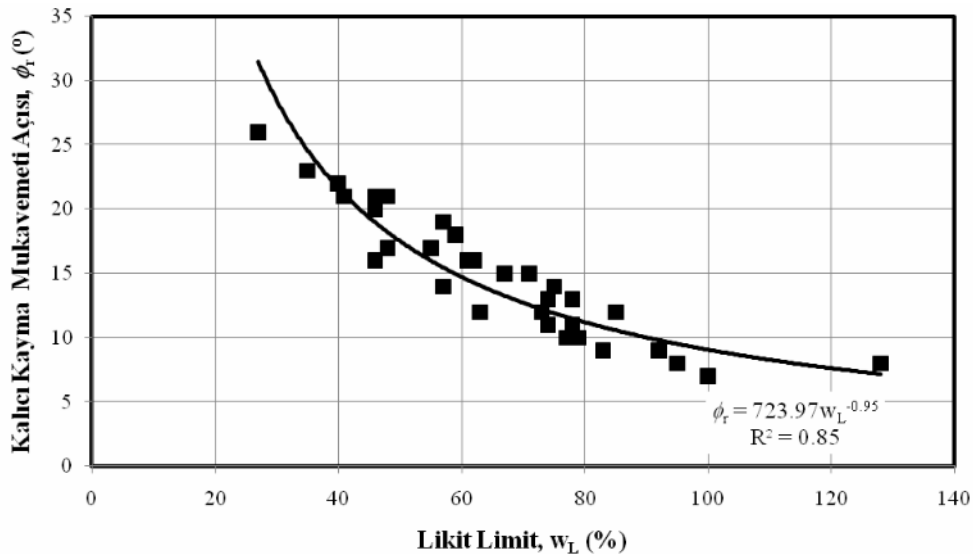
5.3.2 A ve B numunelerinin karşılaştırılması

İyisan ve diğ. (2006)’nin yapmış oldukları tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılan B numuneleriyle, bu çalışmada uygun olan numuneler karşılaştırılmış, birlikte incelenmiş ve korelasyon katsayısı yüksek ilişkiler elde edilmiştir. Bu ilişkiler öncelikle aynı şekil üzerinde ayrı ayrı gösterilmiş, daha sonra birleştirilerek tek bir ifade halinde incelenmiştir. B numunelerinin endeks özellikleri, İyisan ve diğ. (2006)’nin Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresinde yayınladıkları “Sıkıştırılmış zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi” adlı makalede ayrıntılı olarak bulunmaktadır.



Şekil 5.27 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin w_L ile değişimi

Şekil 5.27'de görüldüğü gibi A ve B numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimi ayrı ayrı olacak şekilde incelenmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere A numunelerinin kalıcı kayma mukavemet açıları likit limitin artmasıyla azalmakta ve bu değişim B numunelerinde görülen değişime paralel şekilde gerçekleşmektedir. Böylece A ve B numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile olan ilişkilerinde benzerlik olduğu söylenebilir. B numunelerinin korelasyon katsayısı %86, A numunelerinin ise %84'dür. Eğer A ve B numune grupları birleştirilerek tek bir grup haline getirilirse numune sayısı 32 olan başka bir numune grubu elde edilir. İki grup birleştirildiğinde kalıcı kayma mukavemeti açısıyla likit limit arasındaki ilişki Şekil 5.28'de olduğu gibi verilmiştir.

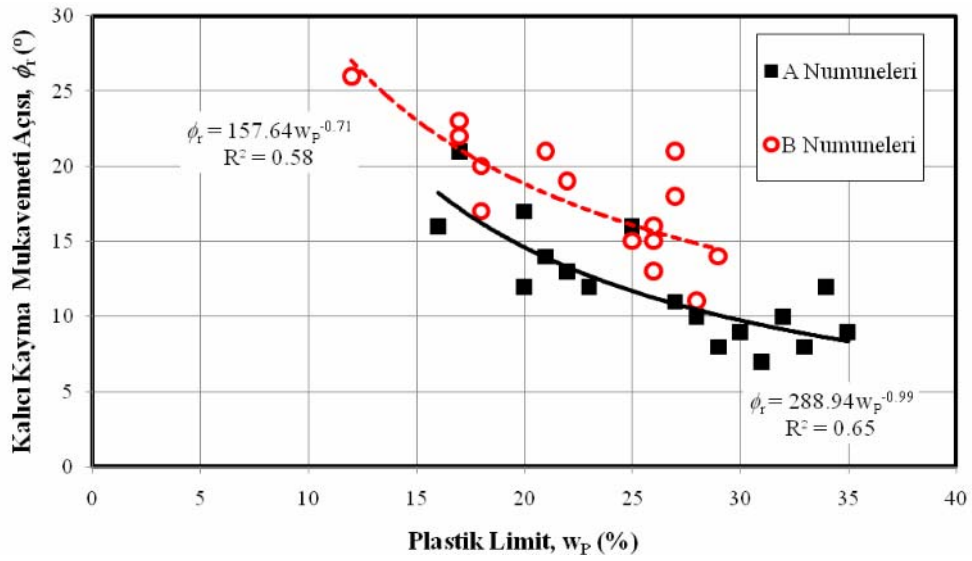


Şekil 5.28 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin w_L ile değişimi

Şekil 5.28’de görüldüğü gibi 32 adet numunenin kalıcı kayma mukavemet açısı, likit limit arttıkça azalmaktadır. Ayrıca ilişkinin korelasyon katsayısının yüksek olması A ve B numune gruplarının kalıcı kayma mukavemeti açılarıyla likit limitler arasındaki ilişkinin ne kadar benzer olduğunu ifade etmektedir. %85 korelasyon katsayısına sahip olan ilişkinin denklemi (5.14)’de verilmektedir.

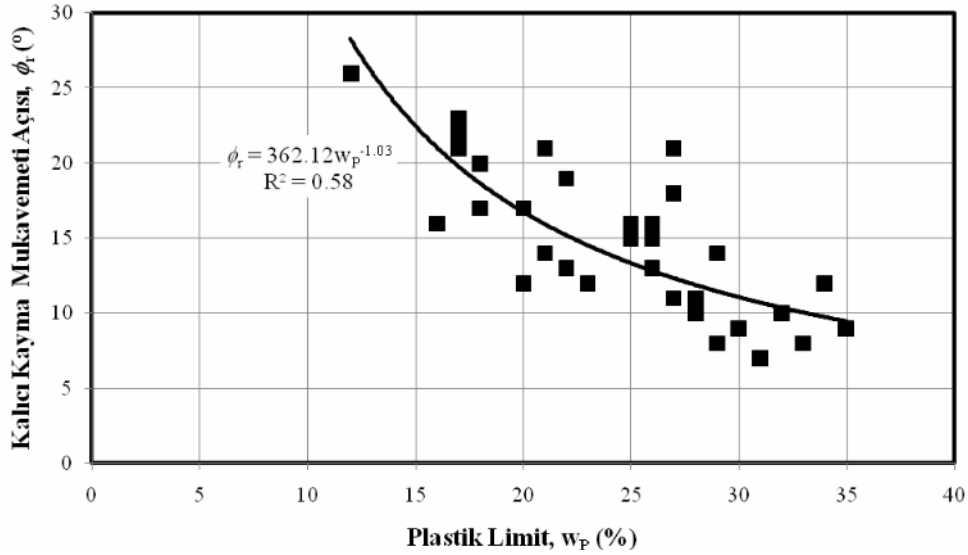
$$\phi_r = 723.97(w_L)^{-0.95} \quad (5.14)$$

A ve B numunelerinin kalıcı kayma mukavemet açıları ile plastik limitleri arasındaki ilişki ayrı ayrı olacak şekilde Şekil 5.29’da verilmektedir.



Şekil 5.29 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin w_p ile değişimi

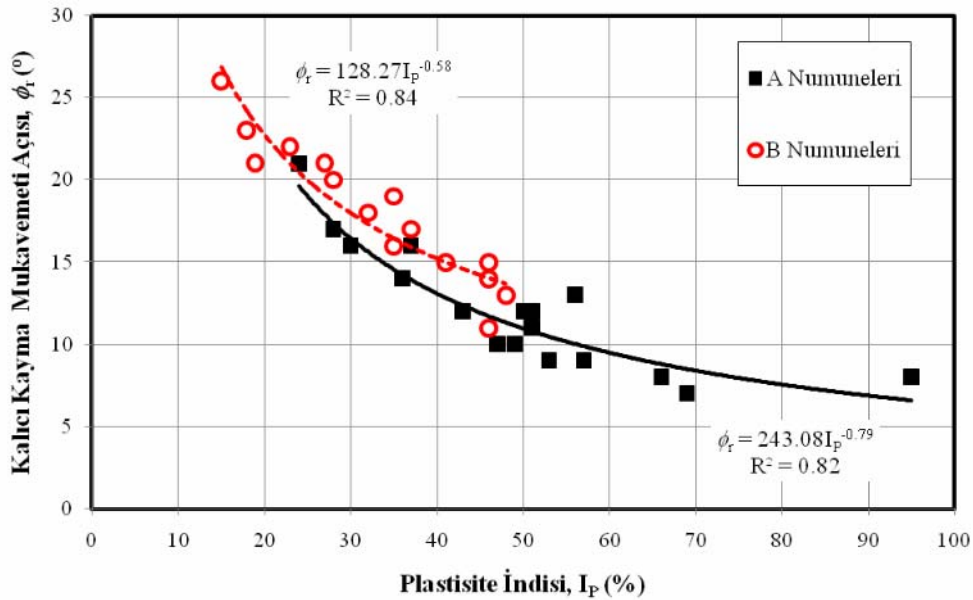
A numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit arasındaki ilişki, B numuneleri ile karşılaştırıldığında aralarında benzerlik gösterdiği görülebilmektedir. Şekil 5.29’da görüldüğü gibi artan plastik limit hem A numunelerinin hem de B numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti açılarını düşürmektedir. A numuneleri %65, B numuneleri ise %58 korelasyon katsayılarına sahiptir. Plastik limitin kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisini daha iyi incelemek açısından A ve B numunelerinin birleştirilmiş ve Şekil 5.30’daki ilişki oluşturulmuştur. Birleştirmeye 32 adet numuneye sahip bir numune grubunun kalıcı kayma mukavemeti ile plastik limiti arasındaki ilişki incelenmiş olur.



Şekil 5.30 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin w_P ile değişimi

İki numune grubu birleştirilip plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi incelendiğinde plastik limit arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısı azalma göstermektedir. Bu ilişki %58 korelasyon katsayısına sahiptir. Denklem olarak ifadesi (5.15)'de verilmektedir.

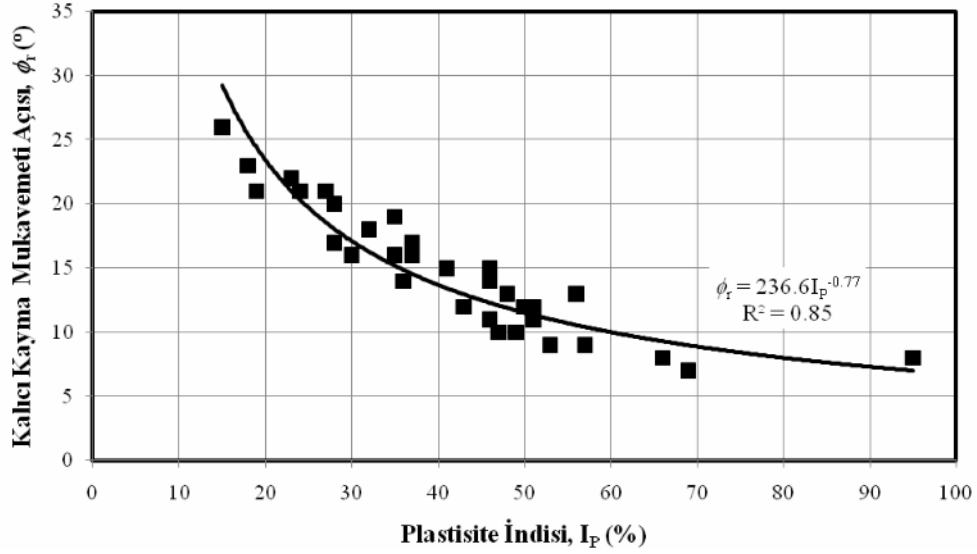
$$\phi_r = 362.12(w_P)^{-1.03} \quad (5.15)$$



Şekil 5.31 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin I_P ile değişimi

Şekil 5.31'de görüldüğü gibi A ve B numunelerinin kalıcı kayma mukavemet açıları, likit limit ve plastik limitte olduğu gibi plastisite indisleri de arttıkça azalmaktadır. A numuneleri, B numunelerine paralel ve yakın bir ilişki içerisinde ve korelasyon katsayıları sırayla %82 ve %84'dür. İki numune grubu birlikte düşünüldüğünde

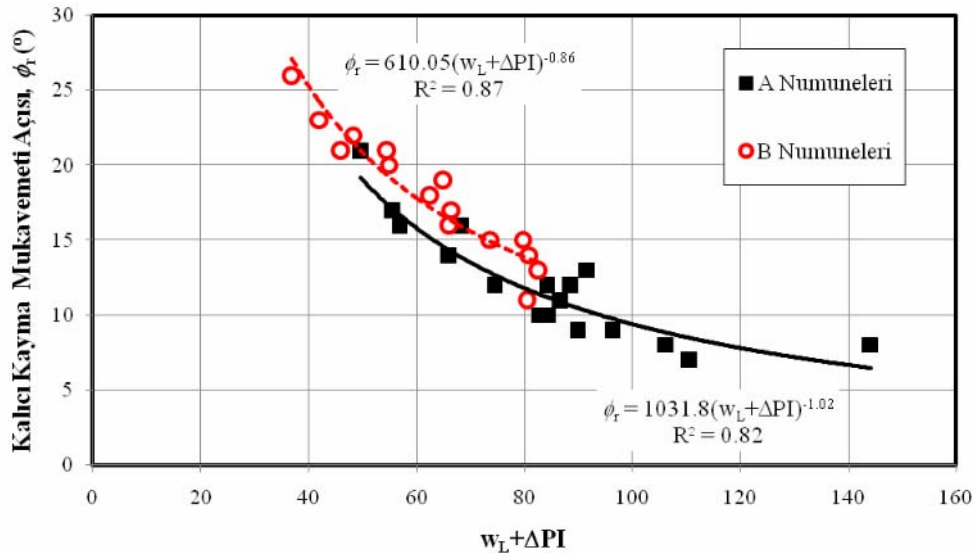
plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi Şekil 5.32’de görülebilmektedir.



Şekil 5.32 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r 'nin I_p ile değişimi

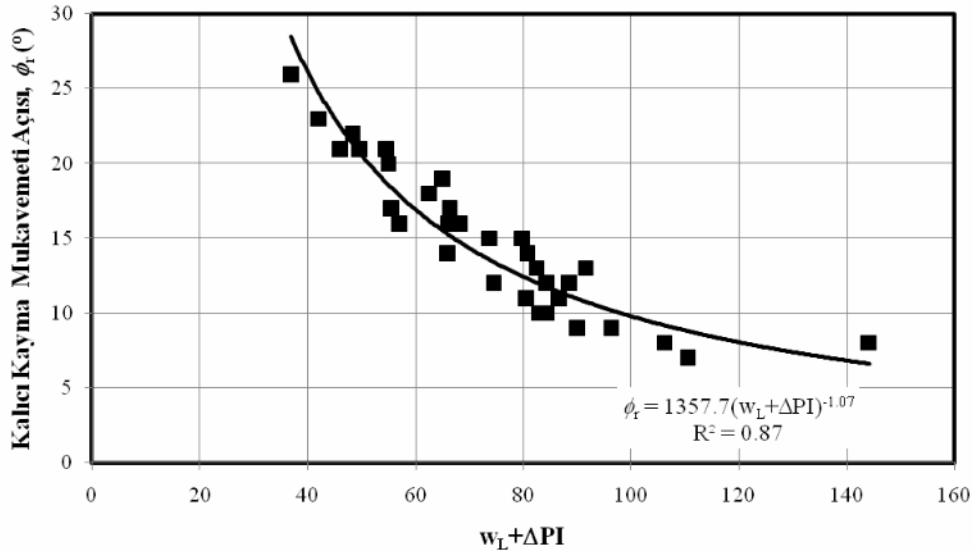
Şekil 5.32’de görülebildiği gibi iki numune grubu birleştirilip 32 adet numuneden oluşan tek bir numune grubu haline getirildiğinde %85 gibi yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olan bir ilişki elde edilmektedir. Plastisite indisi arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısının da azaldığı Şekil 5.32’den görülebilmektedir. Denklem olarak (5.16)’de ifade edilmektedir.

$$\phi_r = 236.6(I_p)^{-0.77} \quad (5.16)$$



Şekil 5.33 A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi

Şekil 5.33’de gösterilen ilişki A ve B numunelerinin kalıcı kayma mukavemeti açıları ile likit limitin, A hattına olan uzaklıkla (ΔPI) toplamı arasındadır. Bu şekilde görüldüğü gibi $w_L + \Delta PI$ arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açıları azalmaktadır. İki numune grubunun kalıcı kayma mukavemeti açıları ile $w_L + \Delta PI$ arasındaki ilişki benzerlik göstermekte ve yaklaşık aynı korelasyon katsayılarına (A numuneleri için %83, B numuneleri için %87) sahiptirler. Sonuç olarak iki numune grubu birleştirilip tekrardan incelendiğinde Şekil 5.34’teki ilişki elde edilmiştir.

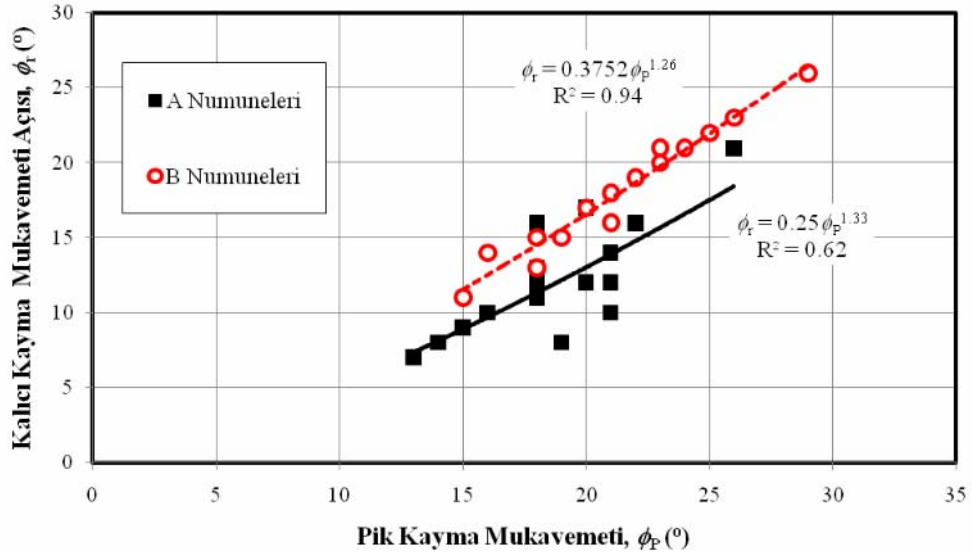


Şekil 5.34 : A ve B numuneleri birleştirildiğinde ϕ_r ’nin $w_L + \Delta PI$ ile değişimi

A ve B numuneleri diğer ilişkilerde olduğu gibi kalıcı kayma mukavemeti açılarının $w_L + \Delta PI$ ile değişimi için de belirli bir düzen içerisinde. Şekil 5.34’te 32 adet numunenin oldukça uyum içerisinde olduğu da görülebilmektedir. %87 korelasyon katsayısına sahip olan ilişkinin denklemi (5.17)’da verilmiştir.

$$\phi_r = 1357.7(w_L + \Delta PI)^{-1.07} \quad (5.17)$$

Kalıcı kayma mukavemeti açısıyla pik kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki incelenmiş, A ve B numunelerinin sonuçları ayrı ayrı olacak şekilde grafikte belirtilmiştir. Bu ilişkiler Şekil 5.35’de görülmektedir.



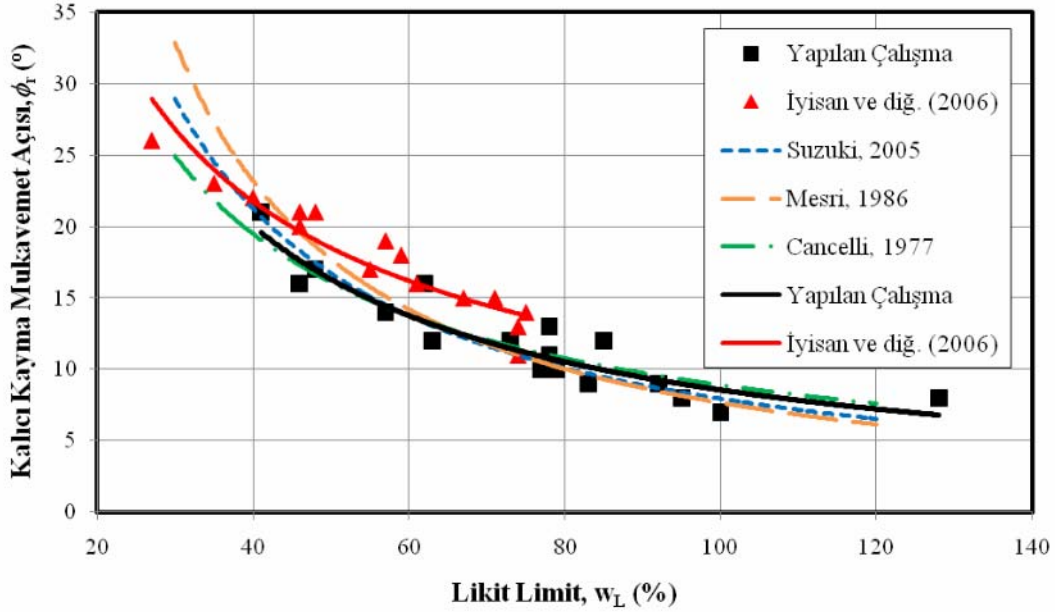
Şekil 5.35 : A ve B numunelerinde ayrı ayrı ϕ_r 'nin ϕ_p ile değişimi

Şekil 5.35'te görüldüğü gibi B numunelerinin pik ile kalıcı kayma mukavemet açıları arasında uyumlu ve korelasyon katsayısı (%94) oldukça yüksek bir ilişkiye sahiptir. Ancak A numunelerine bakıldığında pik ile kalıcı kayma mukavemet açıları arasında belirli bir uyum olmasına rağmen korelasyon katsayısı (%62) diğer numune grubuna oranla daha düşük bir ilişki söz konusudur. Ancak, A numuneleri ile B numuneleri arasında numune hazırlama yöntemi farklı olduğu için pik ile kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki ilişki incelenirken bu iki grup numuneyi birleştirmek doğru olmamaktadır. Bunun nedeni, numune hazırlama yönteminin kalıcı kayma mukavemeti üzerinde herhangi bir etkisinin olmamasına rağmen pik kayma mukavemeti açısına etkisi olduğu bilinmektedir. Bu yüzden A ve B numunelerinin pik ve kalıcı mukavemeti açıları arasındaki ilişkiyi incelerken ayrı ayrı ele almak daha doğrudur. Şekil 5.35'te B numunelerinin, A numuneleri üzerinde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni iki numune grubu arasındaki numune hazırlama yönteminin farklı olmasıdır. Önceki bölümde ifade edildiği üzere kil yüzdesi, aktivite, ince dane oranı ve plastik limitin likit limite oranı (w_p/w_L) ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişkilerin düşük katsayısına sahip oldukları için A ve B numunelerinin birleştirilme durumunda göz önüne alınmamıştır.

5.3.3 Geçmişteki çalışmalarla karşılaştırma yapılması

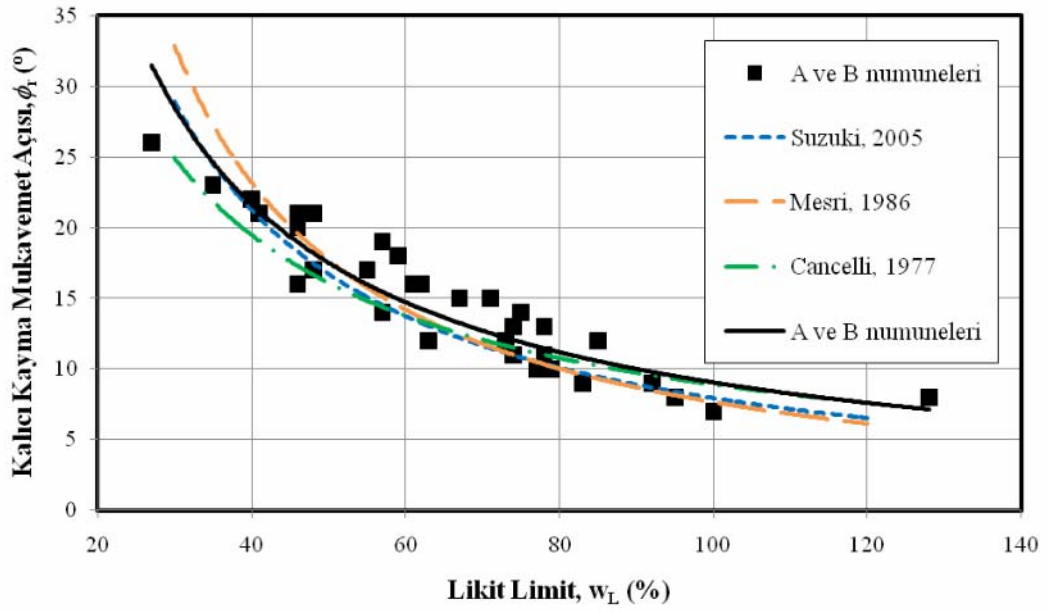
Çalışma kapsamında elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile likit limit arasındaki ilişkiler geçmişteki Suzuki (2005), Mesri(1986) ve Concelli (1977)'nin yaptıkları çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca İyisan ve diğ. (2006)'nin yaptıkları

tekrarlı kesme kutusu sonuçlarıyla da karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 5.35'te ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.36 : Yapılan çalışmanın geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması

Şekil 5.36'da görüldüğü gibi numune hazırlama yöntemleri ve deney yöntemleri farklı olmasına rağmen bu çalışma sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları Suzuki (2005), Mesri (1986) ve Cancelli (1977) tarafından önerilen değerle benzerlik göstermektedir. Tekrarlı kesme kutusu sonuçlarına göre diğer çalışmalarda da görülebildiği gibi likit limitin artması kalıcı kayma mukavemeti açısını düşürmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma sonucu elde edilen ilişki yaklaşık olarak Cancelli (1977) ve Suzuki (2005) ile üst üste çıkmıştır. Likit limit değeri %65'den küçük olan numuneler için Mesri (1986)'nin altında, likit limit değeri %65'den büyük olan numuneler için ise üzerindedir. Bütün bu karşılaştırmalar göz önünde bulundurulduğunda Şekil 5.36'da görülen farklılıkların deney yöntemlerinden kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca İyisan ve diğ. (2006)'nin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları yapılan çalışmanın üzerinde yer almaktadır. Bunun nedeni, numune hazırlama yönteminin farklı olmasıdır. İyisan ve diğ. (2006)'nin B numuneleri üzerinde yaptıkları tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile A numuneleri üzerinde yapılan bu çalışmanın sonuçları birleştirilip bir bütün haline getirildiğinde ise Şekil 5.37'deki karşılaştırma grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.37 : A ve B numunelerinin birleştirilerek geçmişteki çalışmalarla karşılaştırılması

A ve B numuneleri birleştirilerek geçmişteki çalışmalar ile karşılaştırma yapıldığında kalıcı kayma mukavemeti açıları ile likit limit arasındaki ilişki Cancelli (1977)'in ve Suzuki (2005)'in üzerinde olduğu Şekil 5.37'de görülmektedir. Likit limit değeri %55'den küçük olan numuneler için Mesri (1986)'nin altında, likit limit değeri %55'den büyük olan numuneler için üzerinde olmaktadır. Bu farklılıklar deney yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Aynı deney yöntemiyle yapılan çalışmalarda oluşan farklılıklar ise deney numunesinin hazırlama yönteminin farklı olmasıdır. Sonuç olarak, A ve B numunelerinin birleştirilmesiyle oluşturulan numune grubunda kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit arasındaki ilişkinin, Şekil 5.37'ye bakıldığında geçmişteki çalışmalarla benzerlik gösterdiği söylenebilir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma ile aşırı konsolide kil zeminlerin tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi ve kalıcı kayma mukavemeti açıları ile zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Özellikle kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit (w_L), plastik limit (w_P), plastisite indisi (I_P), plastisite kartında bulunan A hattına uzaklıkla (ΔPI) likit limitin toplamı ($w_L + \Delta PI$) ve pik kayma mukavemeti (ϕ_P) ile değişimi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda likit limiti %41 ile %128 arasında, plastisite indisi %23 ile %95 arasında bulunan zemin numunesi üzerinde 0.035 mm/dak hızda tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapmak için tek bir numune üzerinde halka kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile endeks özellikleri arasında ilişkiler incelenmiştir. İlişkilerin doğru ve anlamlı olabilmesi için korelasyonlar geliştirilmiştir. Bu çalışma ile İyisan ve diğ. (2006)'nin çalışmasına katkı sağlanmıştır. Geçmişte yapılan 15 adet tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarıyla karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar birlikte incelenmiştir. İfade edilen bütün bu çalışmalar sonucu aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit, plastik limit, plastisite indisi, A hattına uzaklıkla likit limitin toplamı, pik kayma mukavemeti açısı ve ince dane oranı arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler belirlenmiştir. Ancak kil yüzdesi ve aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişkilerin korelasyon katsayıları düşük olduğu görülmüştür.
- Likit limitin, plastik limitin, plastisite indisinin, A hattına uzaklıkla likit limitin toplamının ve ince dane oranının artmasıyla kalıcı kayma mukavemeti açısının düştüğü gözlemlenmiştir. Buna karşılık, artan pik kayma mukavemeti açısı ile kalıcı kayma mukavemetinin arttığı görülmüştür.

- Bu çalışma ile önceki çalışmanın sonuçları birlikte incelendiğinde belirli bir uyum olduğu görülmüştür. İki numune grubu birleştirilip kalıcı kayma mukavemeti açısı ile endeks özellikleri arasındaki ilişkiler tekrardan irdelenmiştir. Sonucunda, yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler elde edilmiştir. Önceki sonuçlara benzer şekilde, artan likit limit, plastik limit, plastisite indisi, A hattına uzaklıkla likit limitin toplamı ile kalıcı kayma mukavemetinin azaldığı görülmüştür.
- İki numune grubu birleştirilerek pik kayma mukavemeti açısının kalıcı kayma mukavemeti açısına etkisi incelenememiştir. Bunun nedeni, deney numunelerinin hazırlama yöntemlerinin farklı olmasıdır. Hazırlama yöntemi kalıcı kayma mukavemetine büyük etkisi olmamasına karşın pik kayma mukavemetini etkilemektedir.
- Halka kesme deneyi sonucu elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı, tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucu belirlenen kalıcı kayma mukavemeti açısından küçüktür. Bunun nedeni, deney yöntemlerinin farklı olmasıdır. Ayrıca halka kesme deney sisteminin izin verdiği en düşük kesme hızının ($V=20\text{mm/dak}$) yüksek olması da kalıcı kayma mukavemeti açısını etkilemiştir.

Sonuç olarak, zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açıları belirlenmiş ve likit limit, plastik limit, plastisite indisi, $w_L+\Delta PI$, w_P/w_L , ϕ_P , kil yüzdesi, aktivite ve ince dane oranı ile ilişkileri incelenmiştir. w_L , I_P ve $w_L+\Delta PI$ ile olan ilişkiler yüksek korelasyon katsayısına sahiptir. Kohezyonlu zeminlerde, kalıcı kayma mukavemet açısı ile endeks özellikleri arasında düzgün ve korelasyon katsayısı yüksek ilişkiler elde etmek için daha fazla tekrarlı kesme kutusu deneyine ihtiyaç vardır. Ayrıca, tekrarlı kesme kutusu deneylerinde likit limiti %100-%120, plastisite indisi %75-%95 arasında olan numuneler bulunmamaktadır. Eğer bu değerlere sahip zemin numuneleri kullanılırsa kalıcı kayma mukavemeti açılarıyla endeks özellikleri arasındaki ilişkilerin daha doğru olması sağlanabilir. Halka kesme deneyi tek bir numune üzerinde gerçekleşmesine karşın deney sisteminin hızının heyelanlarda oluşan kayma hızlarında daha yüksek değerde olmasından dolayı kesme hızının düşürülmesi gerekir. Böylece daha doğru sonuçlar vermesi sağlanır.

KAYNAKLAR

- ASTM, D 6467**, 2000. "Standard test method for torsional ring shear test to determine drained residual shear strength of cohesive soils", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Bardet, J.P.**, 1997. "Experimental Soil Mechanics", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andersen, A., Brown, J.D.**, 1971. "A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength", *Geotechnique*, Vol.21, No.4, 273-328.
- Bromhead, E.N., and Curtis, R.D.**, 1983. "A comparison of alternative methods of measuring the residual strength of London Clay", *Ground Engineering*, 16(4), 39-41.
- Craig, R.F.**, 1987. "Soil Mechanics", Fourth Edition, English Language Book Society / Van Nostrand Reinhold, London.
- Das, B.M.**, 2002. "Principles of Geotechnical Engineering", Student Edition, Brooks/Cole, Thomson Learning, USA.
- Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M. and Nakamura, S.**, 2002. "Strength recovery from residual state in reactivated landslides", *Geotechnique*, Vol.52, No.9, 683-686.
- Hawkins, A.B. and Privett, K.D.**, November 1985. "Measurement and use of residual shear strength of Cohesive Soils", *Ground Engineering*, page 22-29.
- Head, K.H.**, 2006. "Manual of soil laboratory testing", Vol.2, Shear Strength Tests, Second Edition, Pentech Press, London.
- İyisan, R., Çevikbilen G., Koltuk S., Yılmaz E.**, Eylül 2006. "Sıkıştırılmış zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi" Zemin mekaniği ve temel mühendisliği onbirinci ulusal kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- İyisan, R., Çevikbilen G., Koltuk S., Yılmaz E.**, October 2006. "Measurement of residual shear strength by ring shear test" Seventh international congress on advances in civil engineering, Yıldız Technical University, İstanbul.
- Koltuk, S.**, 2005. "Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi". Yüksek lisans tezi, İTÜ Merkez Kütüphanesi
- Lemos, L.J.L.**, 1985. "Shear behaviour of pre-existing shear zones under fast loading-insights on the landslide motion", <http://www.unina2.it/flows2003/flows2003/articoli/lemos.pdf>

- Lupini, J.F., Skinner, A.E., and Vaughan, P.R.** 1981. "The drained residual strength of cohesive soils", *Geotechnique*, Vol.31, No.2, 181-213.
- Mesri, G. and Cepeda-Diaz, A.F.,** 1986. "Residual shear strength of clays and shales", *Geotechnique*, Vol.36, No.2, 269-274.
- Mesri, G. and Shahien, M.,** January 2003. "Residual shear strength mobilized in first time slope failures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Mitchell, J.K.,** 1993. "Fundamentals of Soil Behaviour", Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Önalp, A.,** 2007. "Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekanik", Birsen Yayınevi Ltd. Şti., Cağaloğlu, İstanbul.
- Özaydın, K.,** 2000. "Zemin Mekanik", Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul.
- Skempton, A.W.,** 1964. "Long-term stability of clay slopes", *Geotechnique*, Vol. 14, No.2, 75-101, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Skempton, A.W.,** 1970. "First time slides in overconsolidated clays", *Geotechnique*, Vol.20, No.3, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Skempton, A.W.,** 1985. "Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory", *Geotechnique*, Vol.35, No.1, 3-18, İTÜ Merkez Kütüphanesi.
- Smith, G.N. and Smith, Ian G.N.,** 1998. "Elements of Soil Mechanics", Seventh Edition, Blackwell Science.
- Stark, T.D. and Hisham, T.E.,** 1994. "Drained residual strength of cohesive soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.5.
- Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J. and Hasinaga, K.,** 2005. "Physical and chemical index properties of residual shear strength of various soils"<http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/561/01.pdf>
- Tiwari, B. and Marui, H.,** 2005. "Comparison 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.
- Townsend, F.C., Gilbert, P.A.,** 1973. "Tests to measure residual strength of some clay shales", *Geotechnique*, Vol.23, 267-271.
- Wesley, L.D.,** 1977. "Shear strength properties of halloysite and allophone clays in Java, Indonesia", *Geotechnique*, Vol.27, 125-136.
- Wesley, L.D.,** 2003. "Residual strength of clays and correlations using Atterberg Limits", *Geotechnique*, Vol.53, No.7, 669-672.
- Yılmaz, E.,** 2006. "Zeminlerin endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi", Yüksek lisans tezi, İTÜ Merkez Kütüphanesi.

EK A

A.1 Elek ve Hidrometre Analizleri

EK A

A.1 Elek ve Hidrometre Analizleri

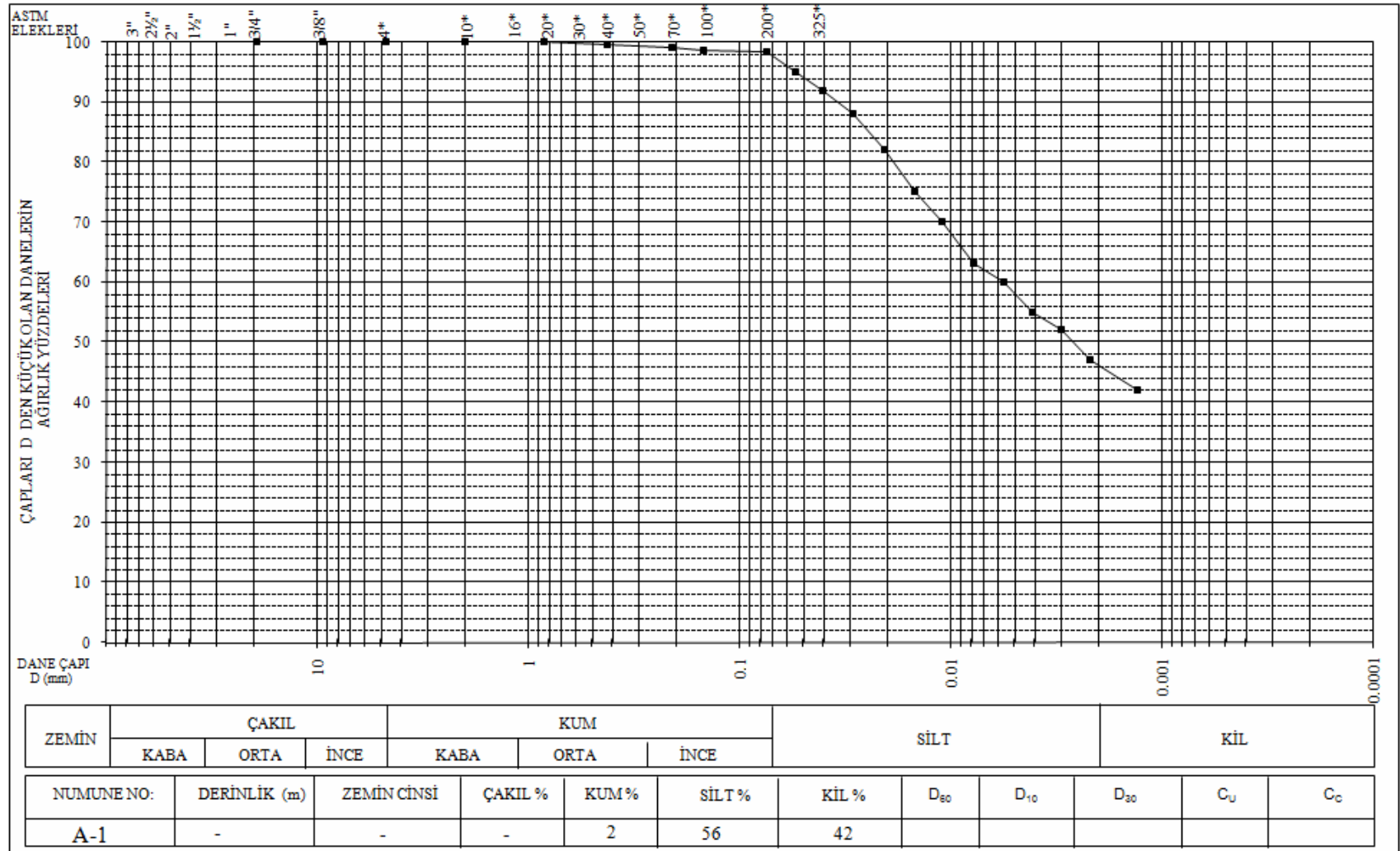
A.1.1 A-1 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.1 : 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	2.6	463.7	99
70	0.212	1.8	461.9	99
100	0.150	2	459.9	99
200	0.075	1.1	458.8	98

Çizelge A.2 : 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	98
0.5	49	50.0	47.65	8.56	0.055	95.3	95
1	47.5	48.5	46.15	8.80	0.040	92.3	92
2	45.5	46.5	44.15	9.13	0.029	88.3	88
4	42.5	43.5	41.15	9.61	0.021	82.3	82
8	39	40.0	37.65	10.18	0.015	75.3	75
15	36.5	37.5	35.15	10.59	0.011	70.3	70
30	33	34.0	31.65	11.16	0.008	63.3	63
60	31.5	32.5	30.15	11.40	0.006	60.3	60
120	29	30.0	27.65	11.81	0.004	55.3	55
240	27.5	28.5	26.15	12.05	0.003	52.3	52
480	25	26.0	23.65	12.46	0.002	47.3	47
1440	22.5	23.5	21.15	12.86	0.001	42.3	42



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

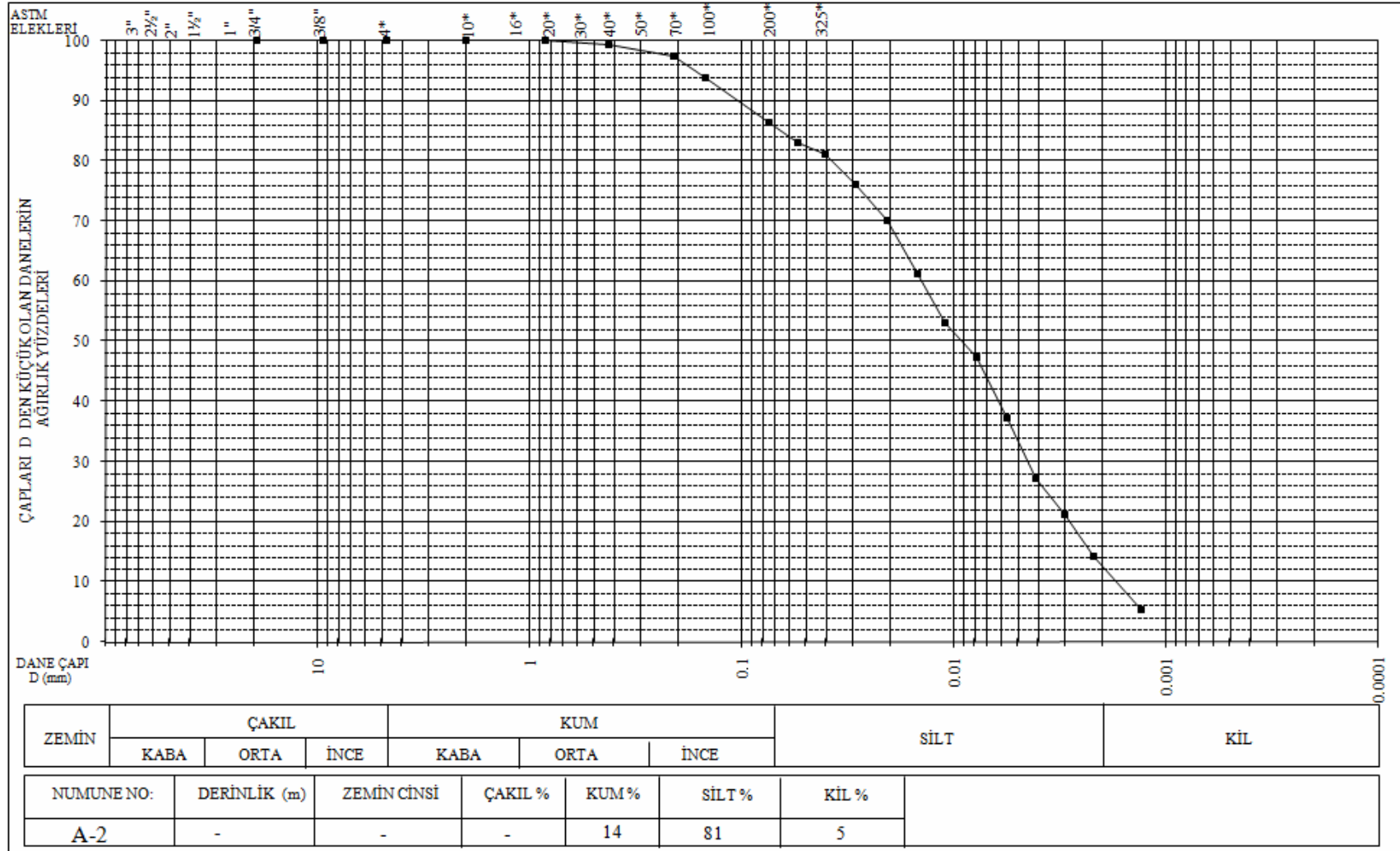
A.1.2 A-2 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.3 : 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	3.6	462.7	99
70	0.212	9	453.7	97
100	0.150	16	437.7	94
200	0.075	35	402.7	86

Çizelge A.4 : 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	44.5	45.5	43.15	9.29	0.075	86.3	86
0.5	43	44.0	41.65	9.53	0.059	83.3	83
1	42	43.0	40.65	9.69	0.042	81.3	81
2	39.5	40.5	38.15	10.10	0.030	76.3	76
4	36.5	37.5	35.15	10.59	0.022	70.3	70
8	32	33.0	30.65	11.32	0.016	61.3	61
15	28	29.0	26.65	11.97	0.012	53.3	53
30	25	26.0	23.65	12.46	0.009	47.3	47
60	20	21.0	18.65	13.27	0.006	37.3	37
120	15	16.0	13.65	14.08	0.005	27.3	27
240	12	13.0	10.65	14.57	0.003	21.3	21
480	8.5	9.5	7.15	15.14	0.002	14.3	14
1440	4	5.0	2.65	15.87	0.001	5.3	5



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

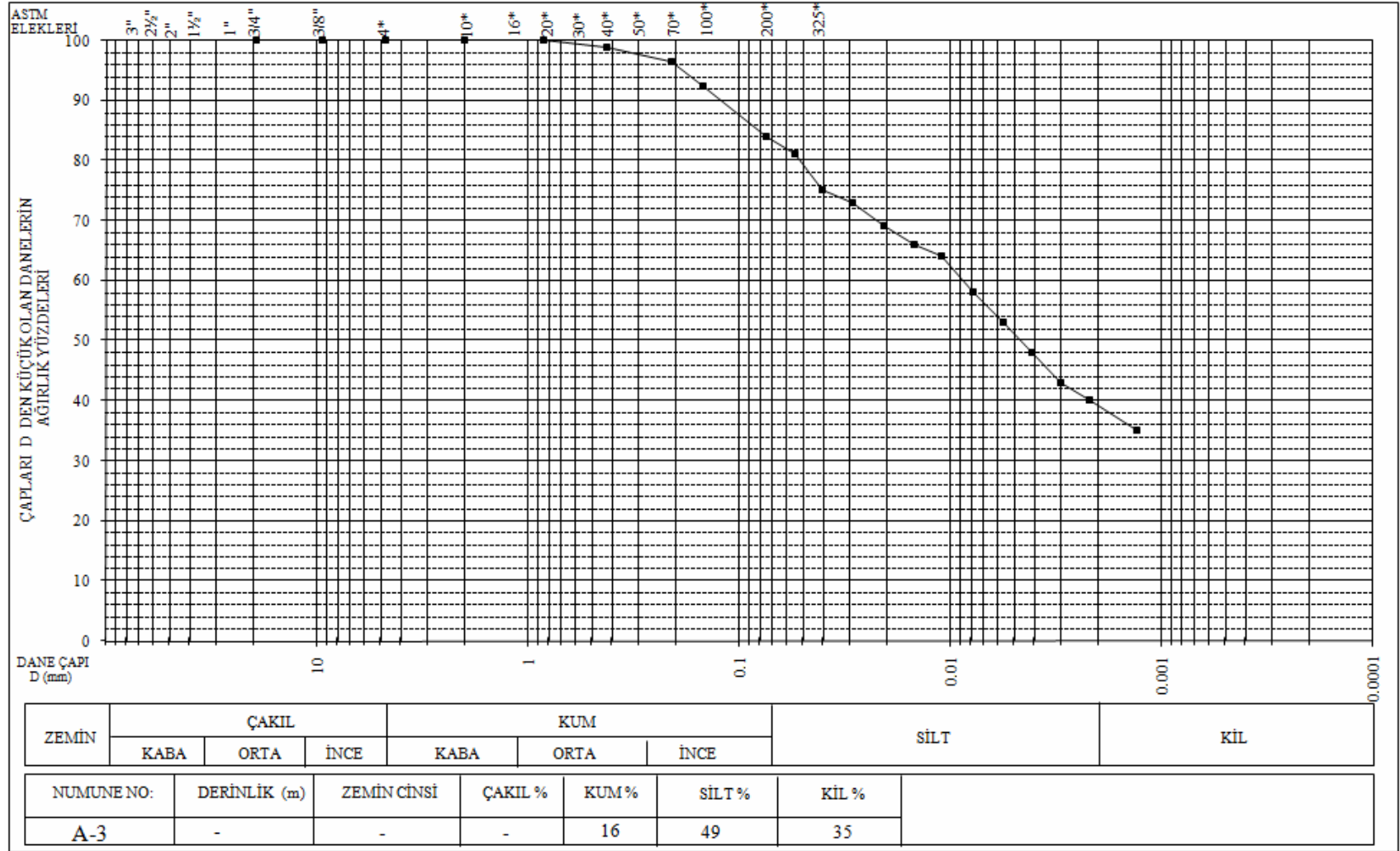
A.1.3 A-3 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.5 : 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	5.7	460.6	99
70	0.212	11	449.6	96
100	0.150	19	430.6	92
200	0.075	39	391.6	84

Çizelge A.6 : 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	43.5	44.5	42.15	9.45	0.075	84.3	84
0.5	42	43.0	40.65	9.69	0.059	81.3	81
1	39	40.0	37.65	10.18	0.043	75.3	75
2	38	39.0	36.65	10.34	0.030	73.3	73
4	36	37.0	34.65	10.67	0.022	69.3	69
8	34.5	35.5	33.15	10.91	0.016	66.3	66
15	33.5	34.5	32.15	11.08	0.012	64.3	64
30	30.5	31.5	29.15	11.56	0.008	58.3	58
60	28	29.0	26.65	11.97	0.006	53.3	53
120	25.5	26.5	24.15	12.38	0.004	48.3	48
240	23	24.0	21.65	12.78	0.003	43.3	43
480	21.5	22.5	20.15	13.03	0.002	40.3	40
1440	19	20.0	17.65	13.43	0.001	35.3	35



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

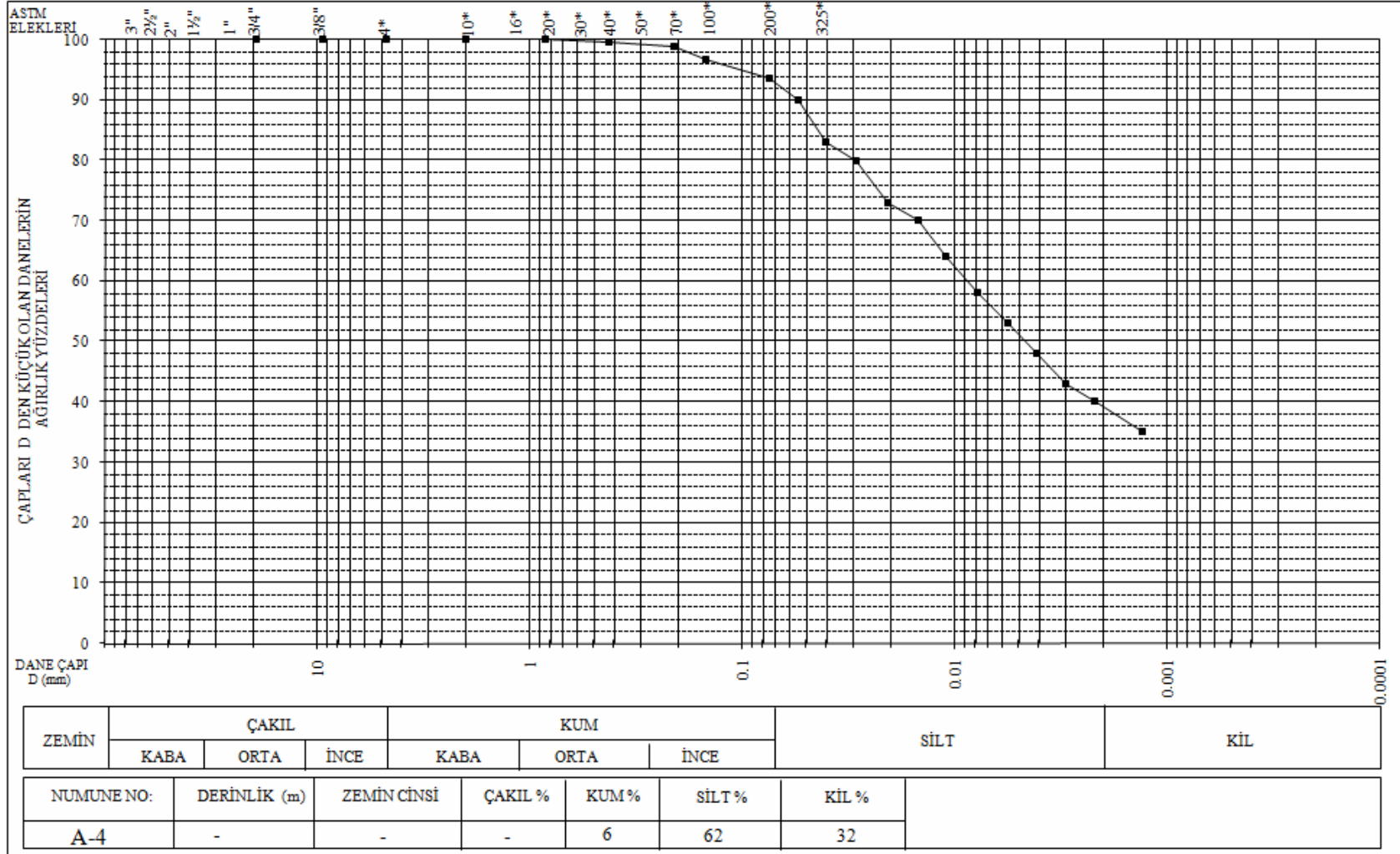
A.1.4 A-4 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.7 : 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	2.3	464	100
70	0.212	3.4	460.6	99
100	0.150	9.9	450.7	97
200	0.075	14	436.7	94

Çizelge A.8 : 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	48.5	49.5	47.15	8.64	0.075	94.3	94
0.5	46.5	47.5	45.15	8.96	0.057	90.3	90
1	43	44.0	41.65	9.53	0.041	83.3	83
2	41.5	42.5	40.15	9.78	0.030	80.3	80
4	38	39.0	36.65	10.34	0.022	73.3	73
8	36.5	37.5	35.15	10.59	0.015	70.3	70
15	33.5	34.5	32.15	11.08	0.012	64.3	64
30	30.5	31.5	29.15	11.56	0.008	58.3	58
60	28	29.0	26.65	11.97	0.006	53.3	53
120	25.5	26.5	24.15	12.38	0.004	48.3	48
240	23	24.0	21.65	12.78	0.003	43.3	43
480	21.5	22.5	20.15	13.03	0.002	40.3	40
1440	19	20.0	17.65	13.43	0.001	35.3	35



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

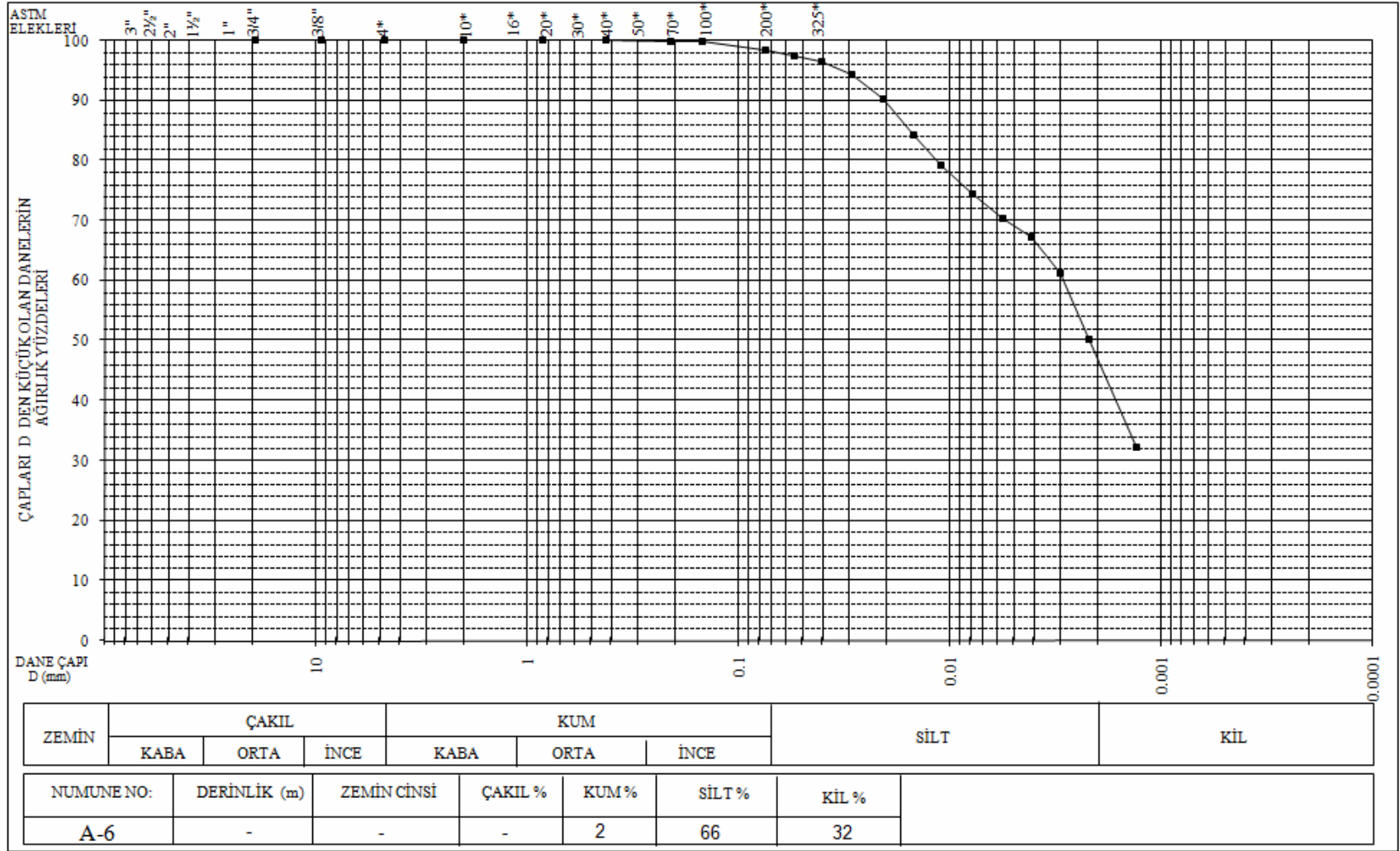
A.1.5 A-6 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.9 : 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.10 : 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.5 : A-6 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

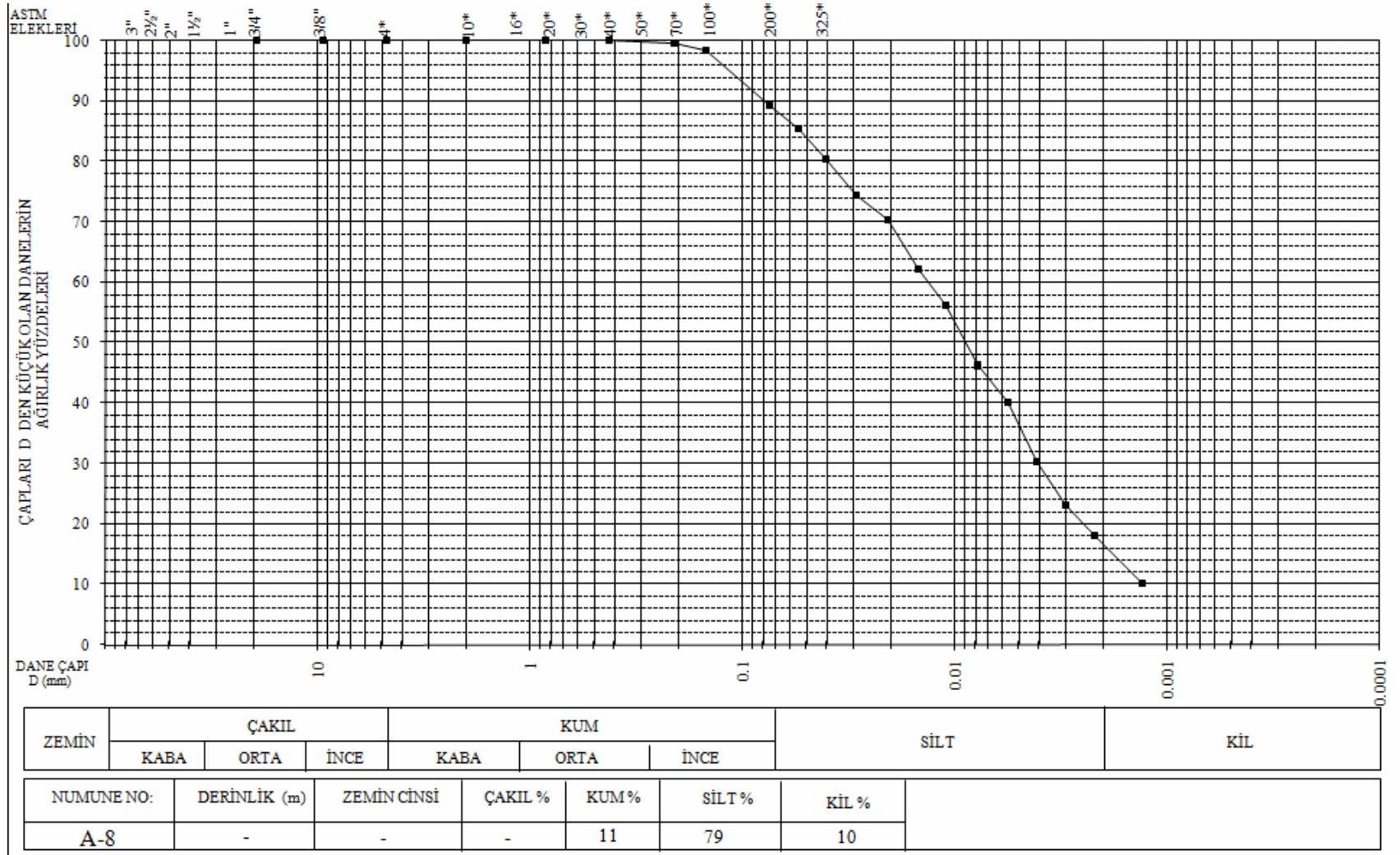
A.1.6 A-8 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.11 : 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	89

Çizelge A.12 : 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.6 : A-8 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

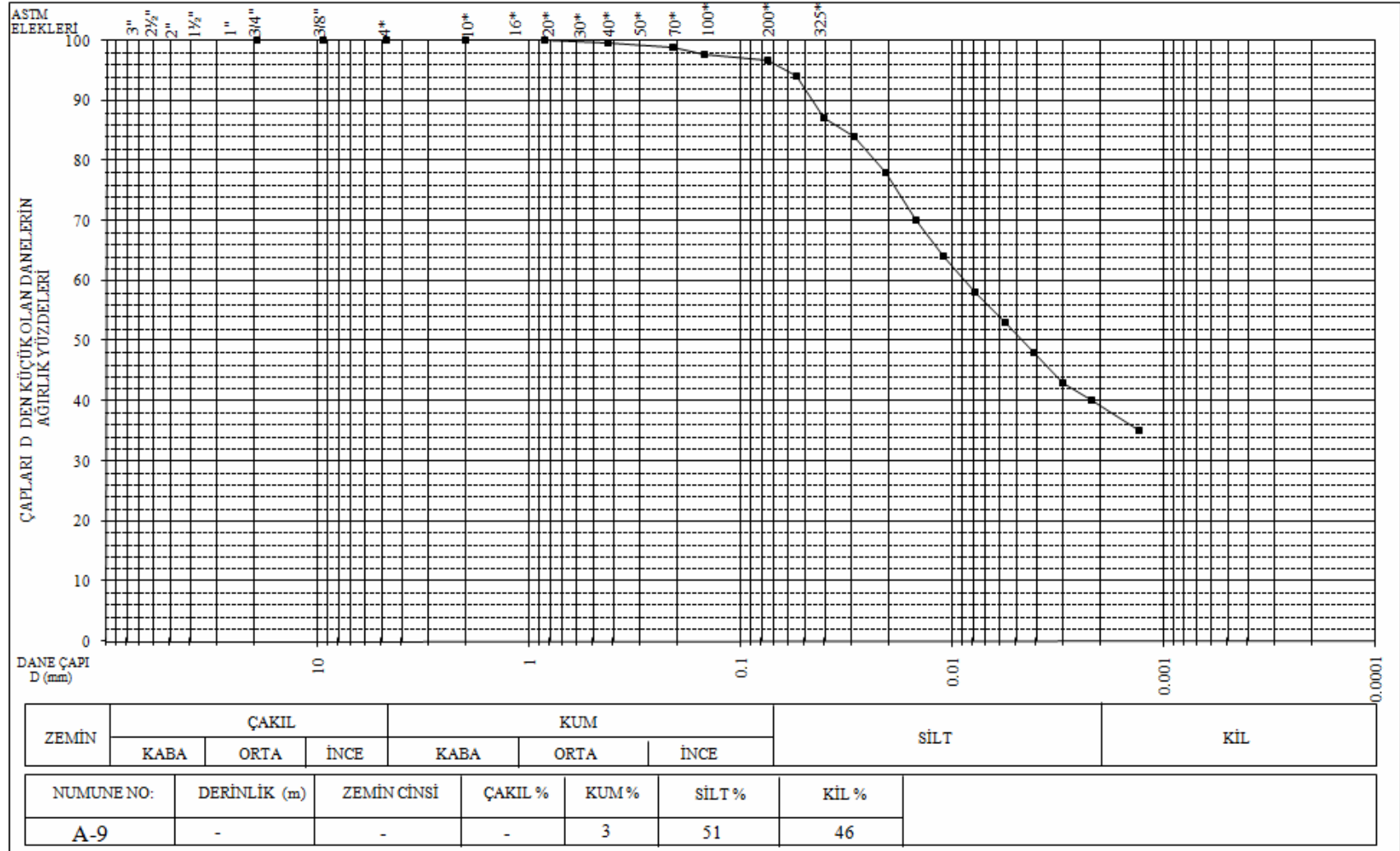
A.1.7 A-9 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.13 : 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	1.9	464.4	100
70	0.212	3.3	461.1	99
100	0.150	5.5	455.6	98
200	0.075	4.4	451.2	97

Çizelge A.14 : 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	51.0	48.65	8.39	0.075	97.3	97
0.5	48.5	49.5	47.15	8.64	0.056	94.3	94
1	45	46.0	43.65	9.21	0.041	87.3	87
2	43.5	44.5	42.15	9.45	0.029	84.3	84
4	40.5	41.5	39.15	9.94	0.021	78.3	78
8	36.5	37.5	35.15	10.59	0.015	70.3	70
15	33.5	34.5	32.15	11.08	0.012	64.3	64
30	30.5	31.5	29.15	11.56	0.008	58.3	58
60	28	29.0	26.65	11.97	0.006	53.3	53
120	25.5	26.5	24.15	12.38	0.004	48.3	48
240	23	24.0	21.65	12.78	0.003	43.3	43
480	21.5	22.5	20.15	13.03	0.002	40.3	40
1440	19	20.0	17.65	13.43	0.001	35.3	35



Şekil A.7 : A-9 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

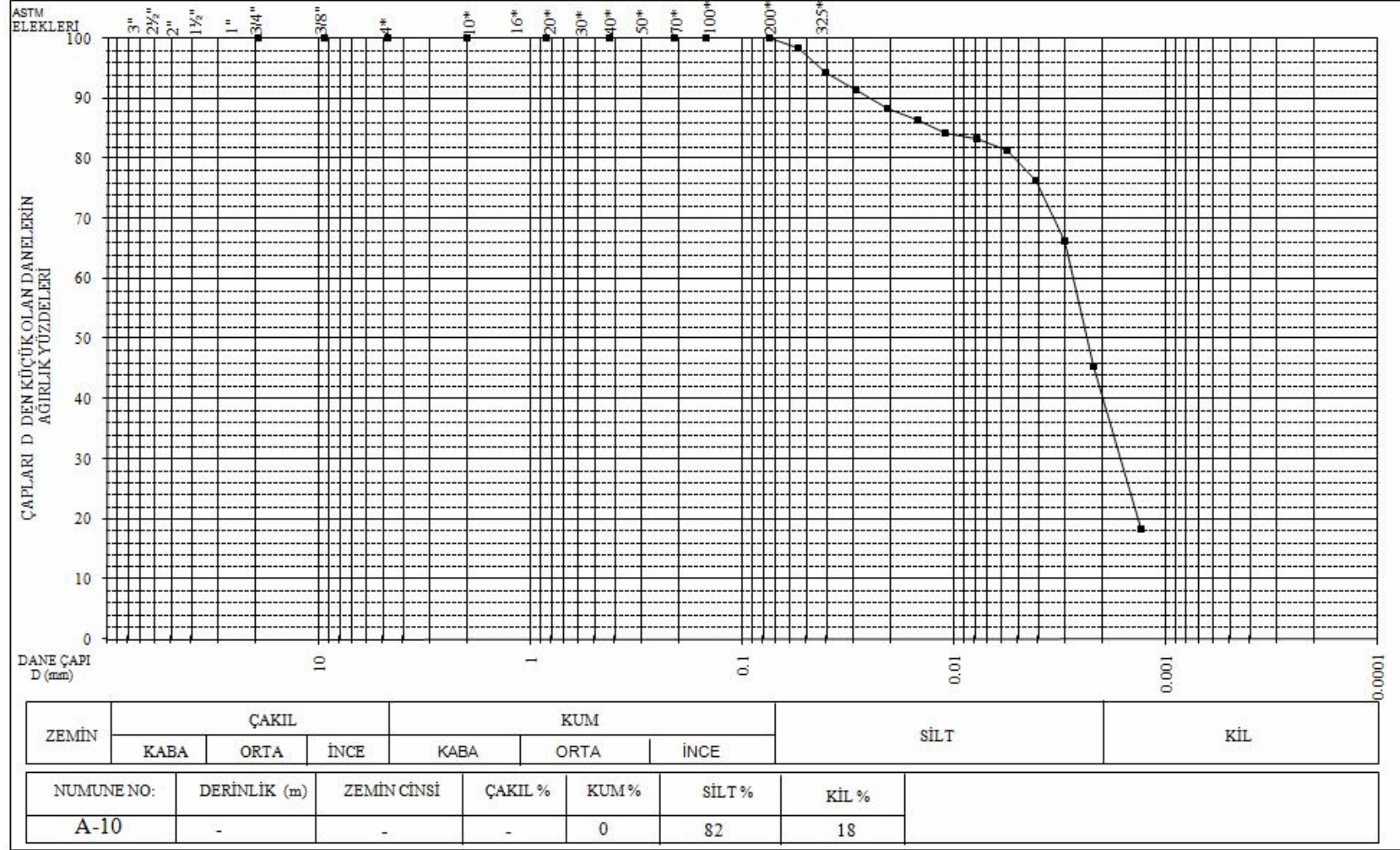
A.1.8 A-10 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.15 : 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.16 : 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.8 : A-10 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

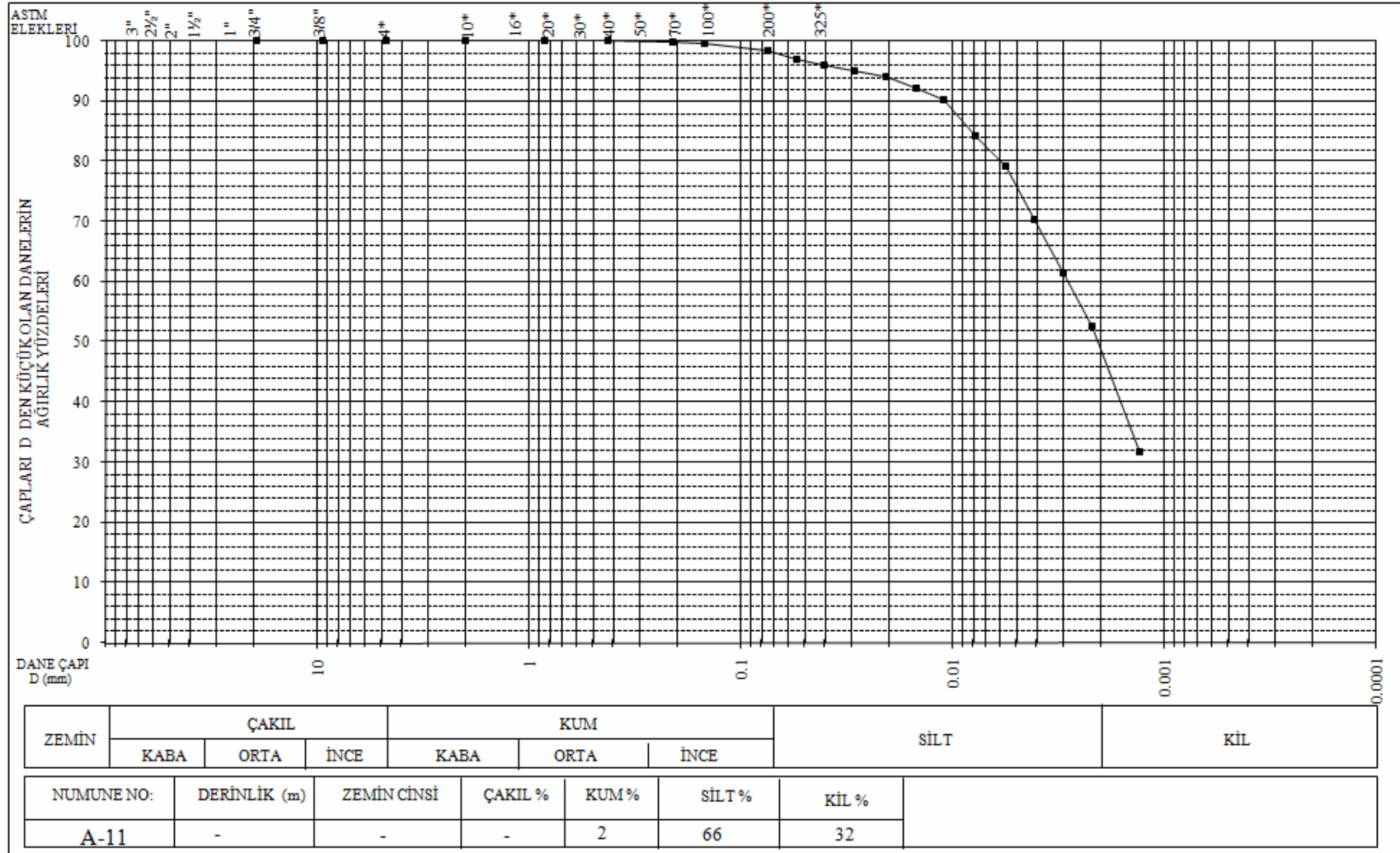
A.1.9 A-11 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.17 : Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü 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.18 : 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.9 : A-11 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

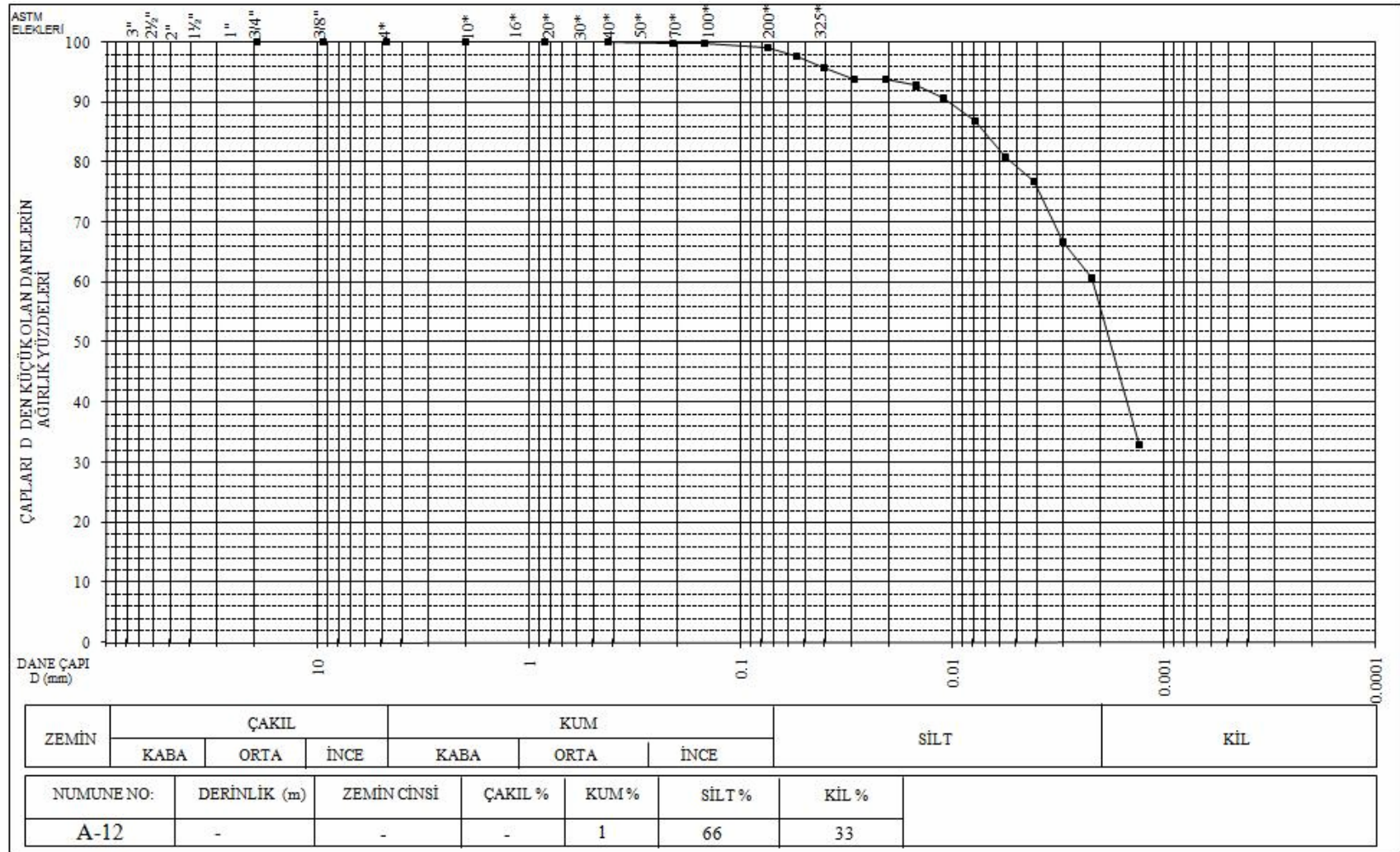
A.1.10 A-12 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.19 : Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü 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.20 : 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.10 : A-12 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

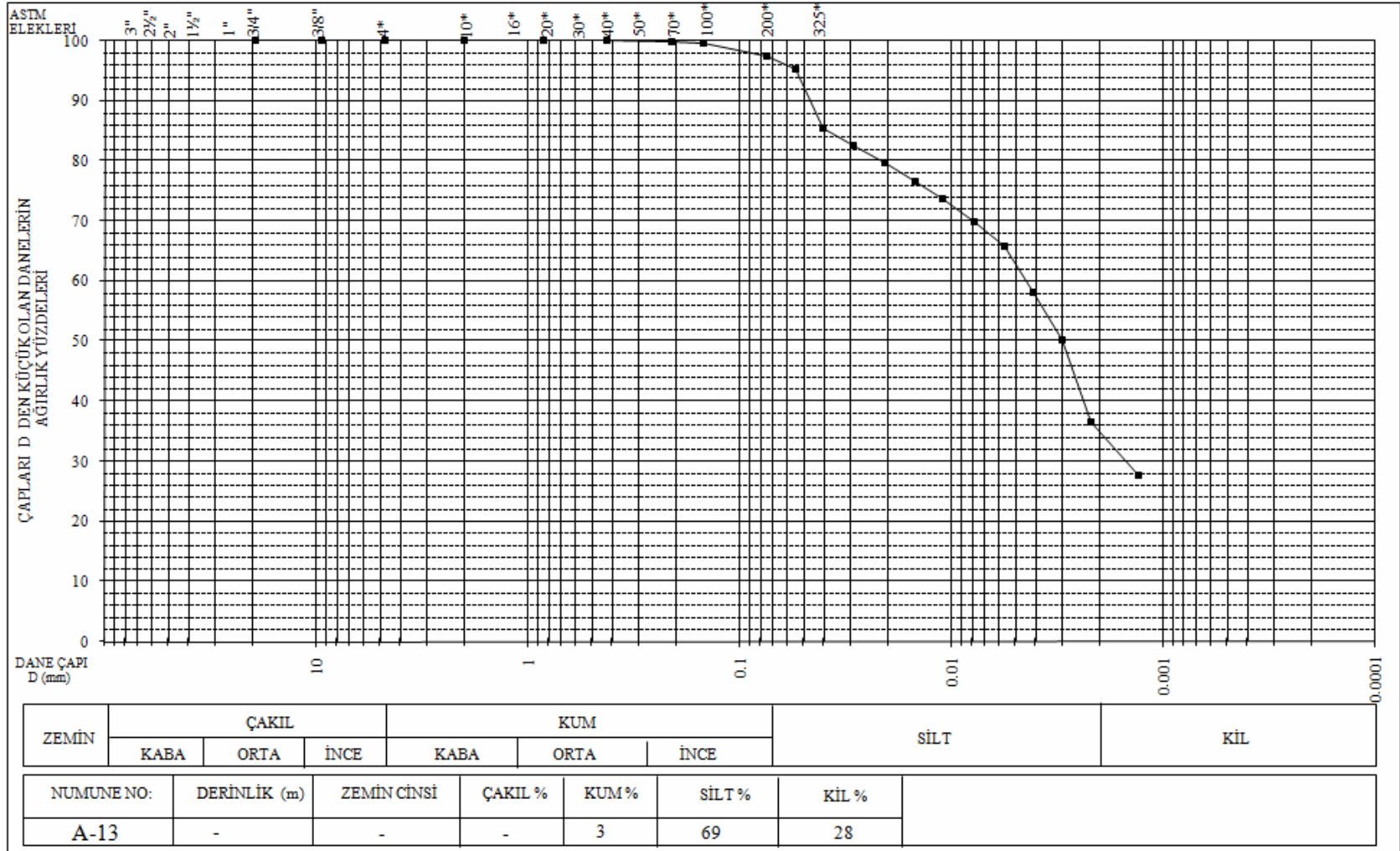
A.1.11 A-13 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.21 : 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.22 : Hidrometre analizi

t (dakika)	Hid. Okuması R_{h1} (mm)	$R_h = R_{h1} + C_m$	R_h'	H_e	D (mm)	Alınan Numuneye Göre Yüzde	Ana Numuneye Göre Yüzde
0.25	51	52	49.65	8.23	0.075	99.3	97
0.5	50	51	48.65	8.39	0.055	97.3	95
1	45	46	43.65	9.21	0.041	87.3	85
2	43.5	44.5	42.15	9.45	0.029	84.3	82
4	42	43	40.65	9.69	0.021	81.3	80
8	40.5	41.5	39.15	9.94	0.015	78.3	77
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.11 : A-13 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

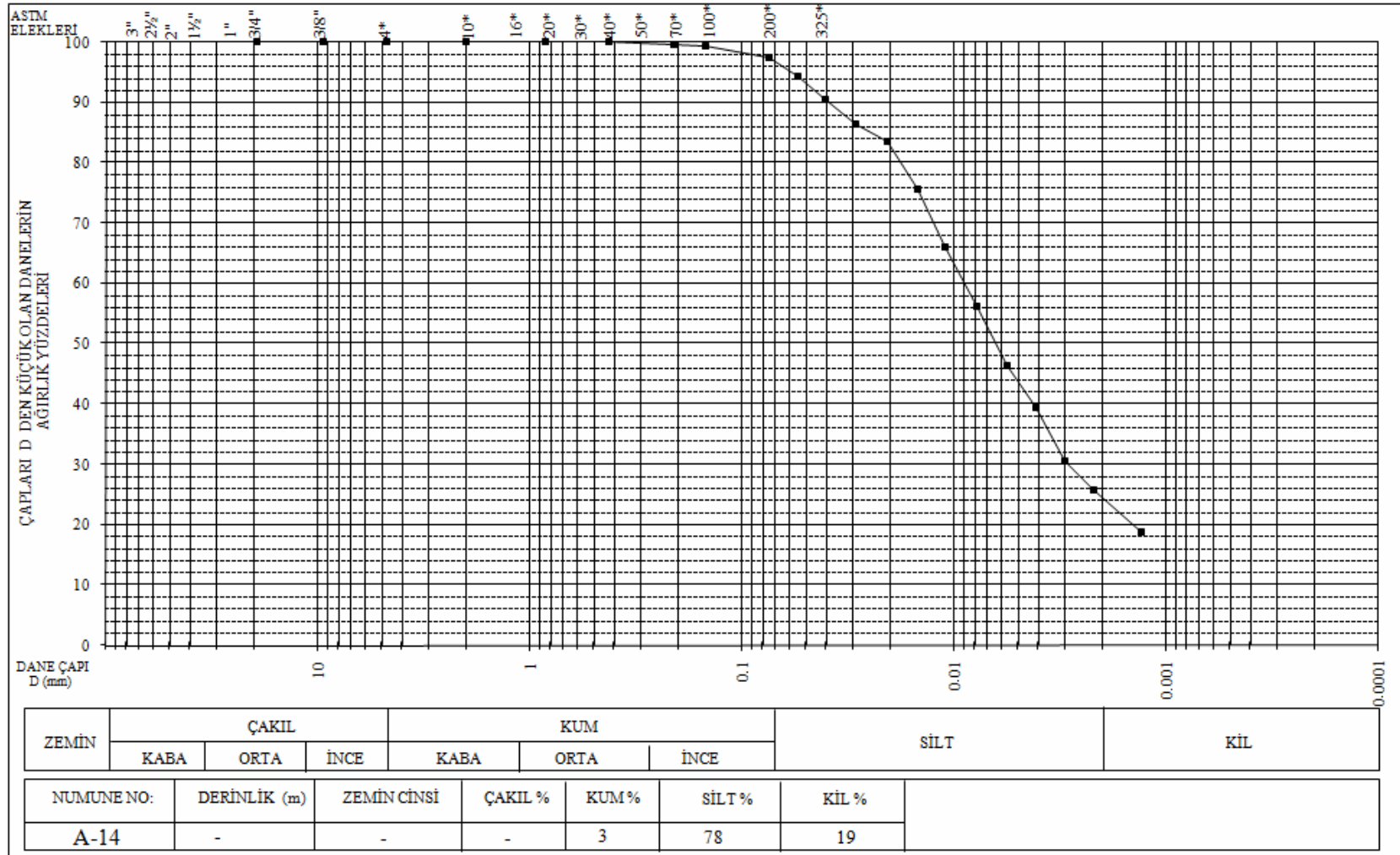
A.1.12 A-14 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.23 : Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü 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.24 : 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.12 : A-14 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

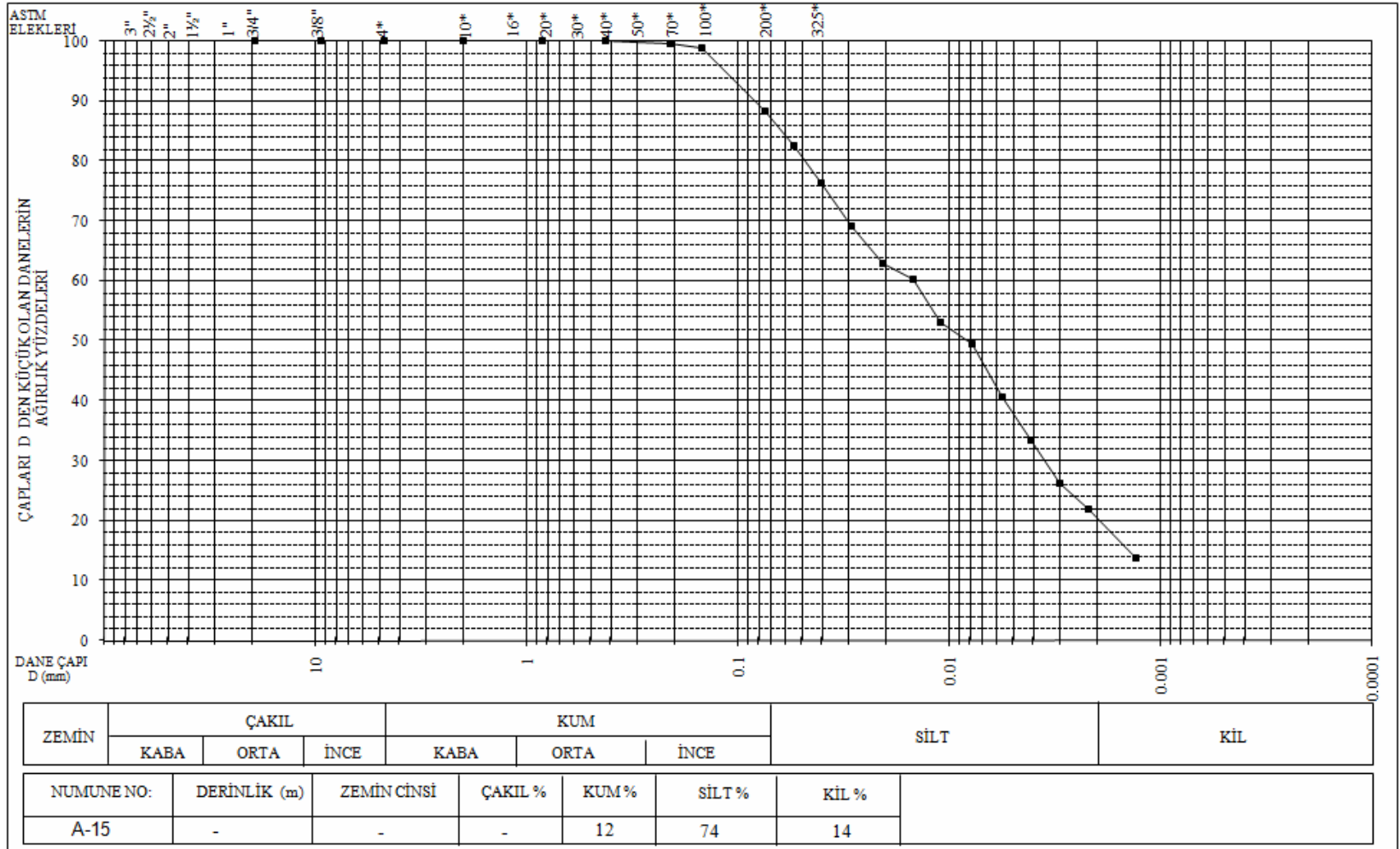
A.1.13 A-15 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.25 : Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü 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.26 : 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	0.0023	24.3	22
1440	9	10	7.65	15.06	0.001	15.3	14



Şekil A.13 : A-15 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

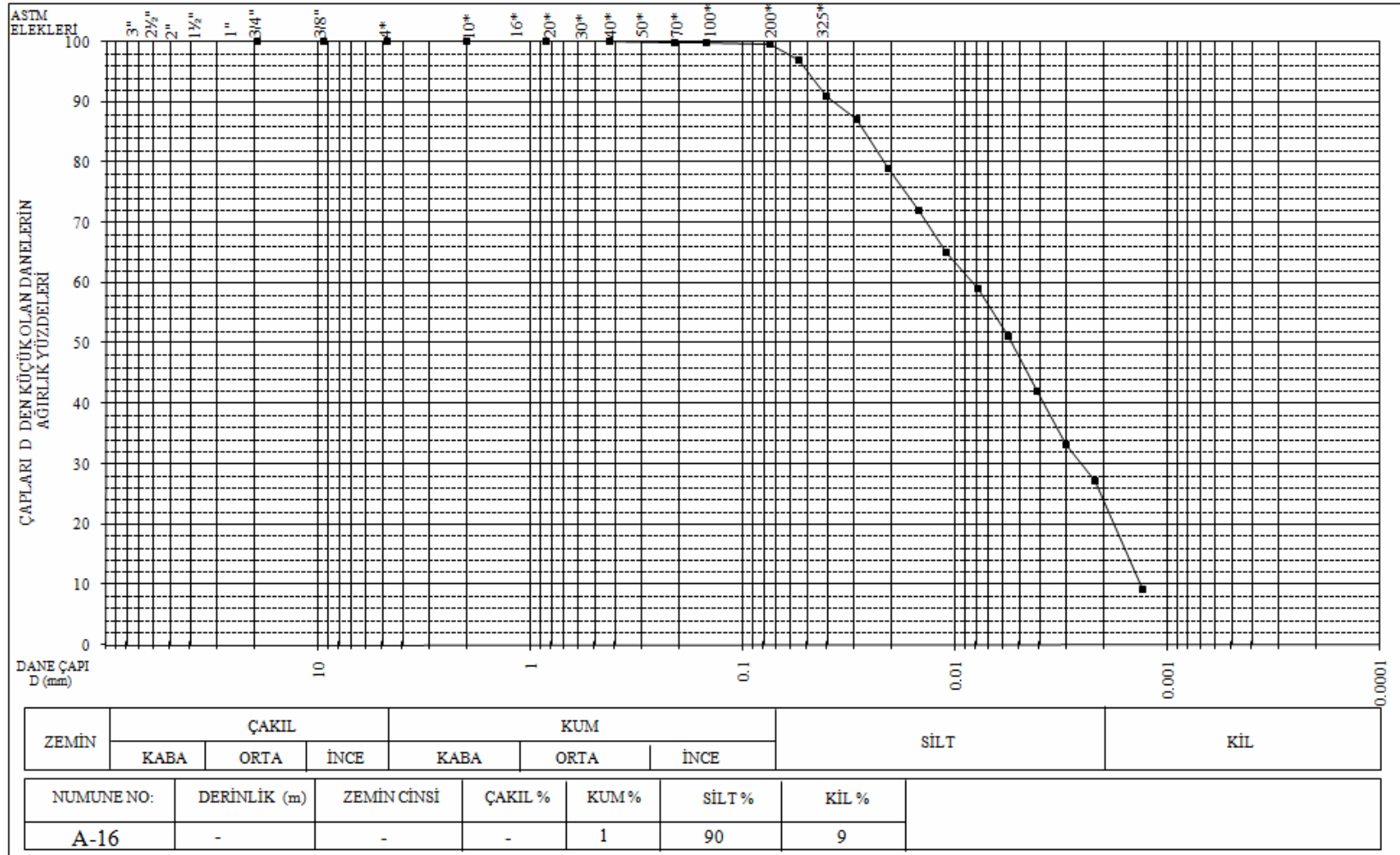
A.1.14 A-16 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.27 : 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.28 : 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



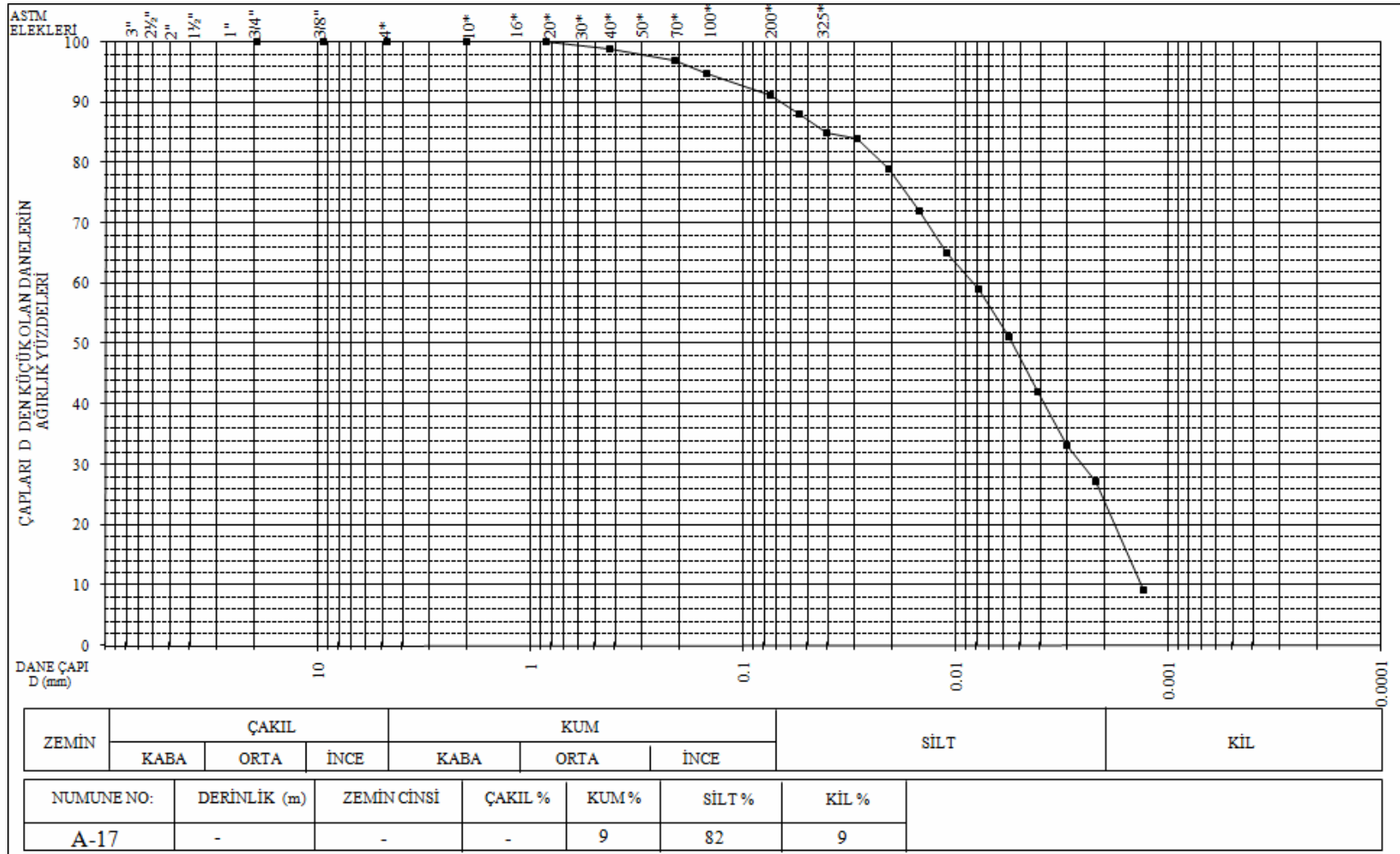
Şekil A.14 : A-16 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

A.1.15 A-17 numunesinin elek ve hidrometre analizi**Çizelge A.29 : Elek analizi**

Açıklık (mm)	Elek Üstü Kalan (gr)	Elekten Geçen (gr)	Elekten Geçen (%)
19.50	0	466.3	100
9.53	0	466.3	100
4.75	0	466.3	100
2.00	0	466.3	100
0.85	0	466.3	100
0.425	6	460.3	99
0.212	8.8	451.5	97
0.150	9.6	441.9	95
0.075	17	424.9	91

Çizelge A.30 : 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	47	48.0	45.65	8.88	0.075	91.3	91
0.5	45.5	46.5	44.15	9.13	0.057	88.3	88
1	44	45.0	42.65	9.37	0.041	85.3	85
2	43.5	44.5	42.15	9.45	0.029	84.3	84
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.15 : A-17 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

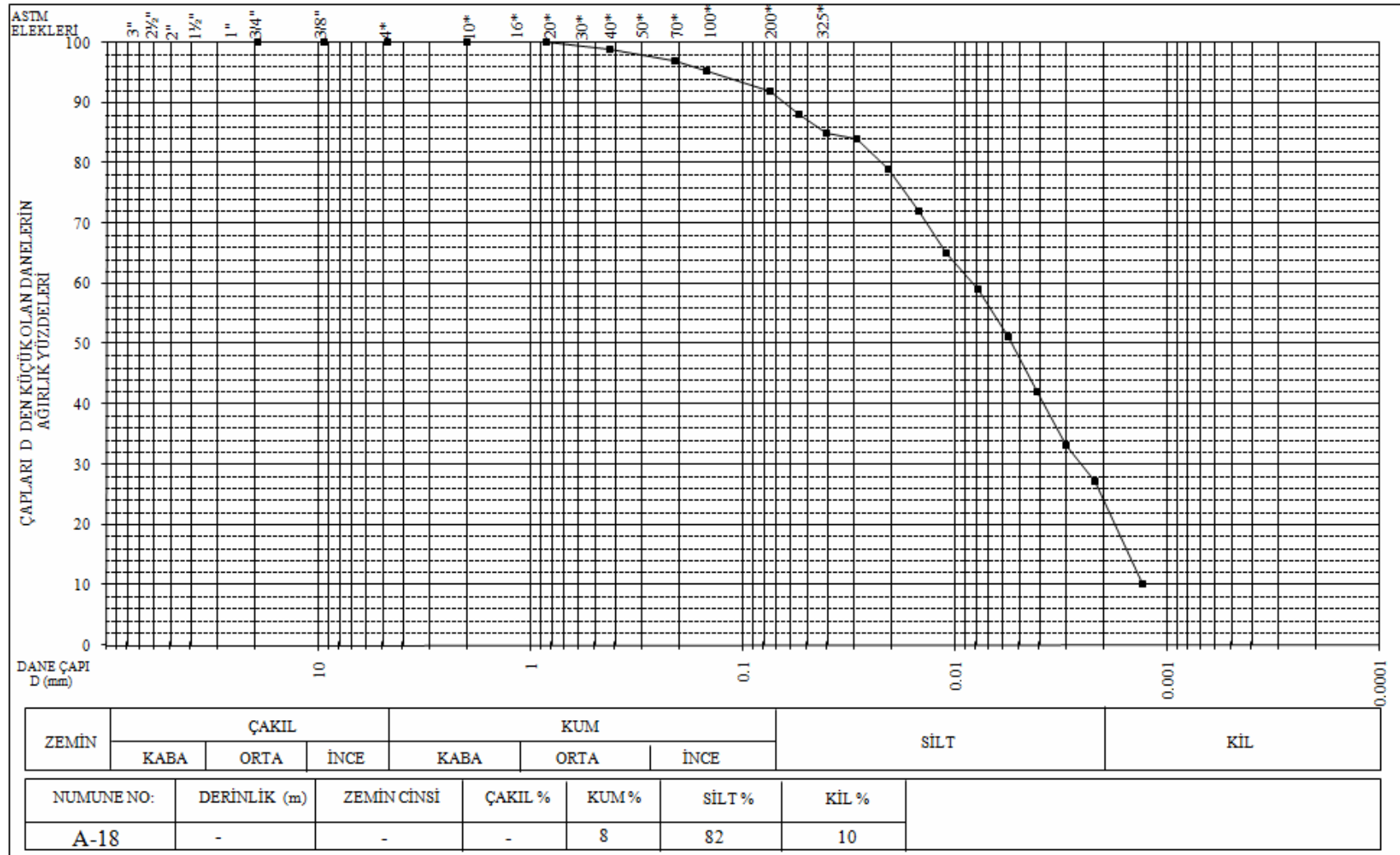
A.1.16 A-18 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.31 : 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	5.8	460.5	99
70	0.212	8.6	451.9	97
100	0.150	8	443.9	95
200	0.075	16	427.9	92

Çizelge A.32 : 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	47.5	48.5	46.15	8.80	0.075	92.3	92
0.5	45.5	46.5	44.15	9.13	0.057	88.3	88
1	44	45.0	42.65	9.37	0.041	85.3	85
2	43.5	44.5	42.15	9.45	0.029	84.3	84
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	6.5	7.5	5.15	15.46	0.001	10.3	10



Şekil A.16 : A-18 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

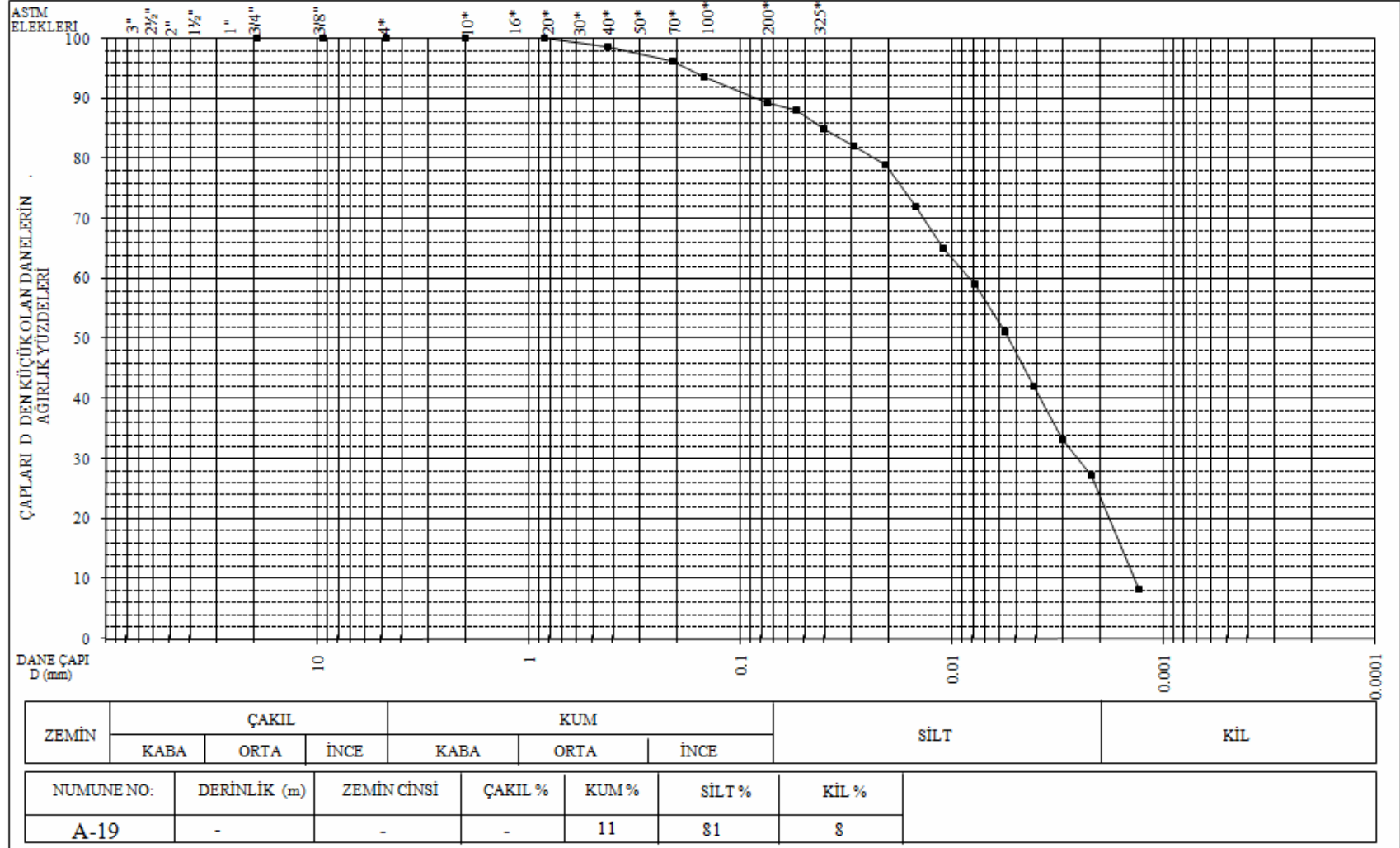
A.1.17 A-19 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.33 : 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	7.2	459.1	98
70	0.212	10.3	448.8	96
100	0.150	13.2	435.6	93
200	0.075	19.3	416.3	89

Çizelge A.34 : 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	47.0	44.65	9.04	0.075	89.3	89
0.5	45.5	46.5	44.15	9.13	0.057	88.3	88
1	44	45.0	42.65	9.37	0.041	85.3	85
2	42.5	43.5	41.15	9.61	0.029	82.3	82
4	41	42.0	39.65	9.86	0.021	79.3	79
8	37.5	38.5	36.15	10.43	0.015	72.3	72
15	34	35.0	32.65	10.99	0.011	65.3	65
30	31	32.0	29.65	11.48	0.008	59.3	59
60	27	28.0	25.65	12.13	0.006	51.3	51
120	22.5	23.5	21.15	12.86	0.004	42.3	42
240	18	19.0	16.65	13.59	0.003	33.3	33
480	15	16.0	13.65	14.08	0.002	27.3	27
1440	5.5	6.5	4.15	15.63	0.001	8.3	8



Şekil A.17 : A-19 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

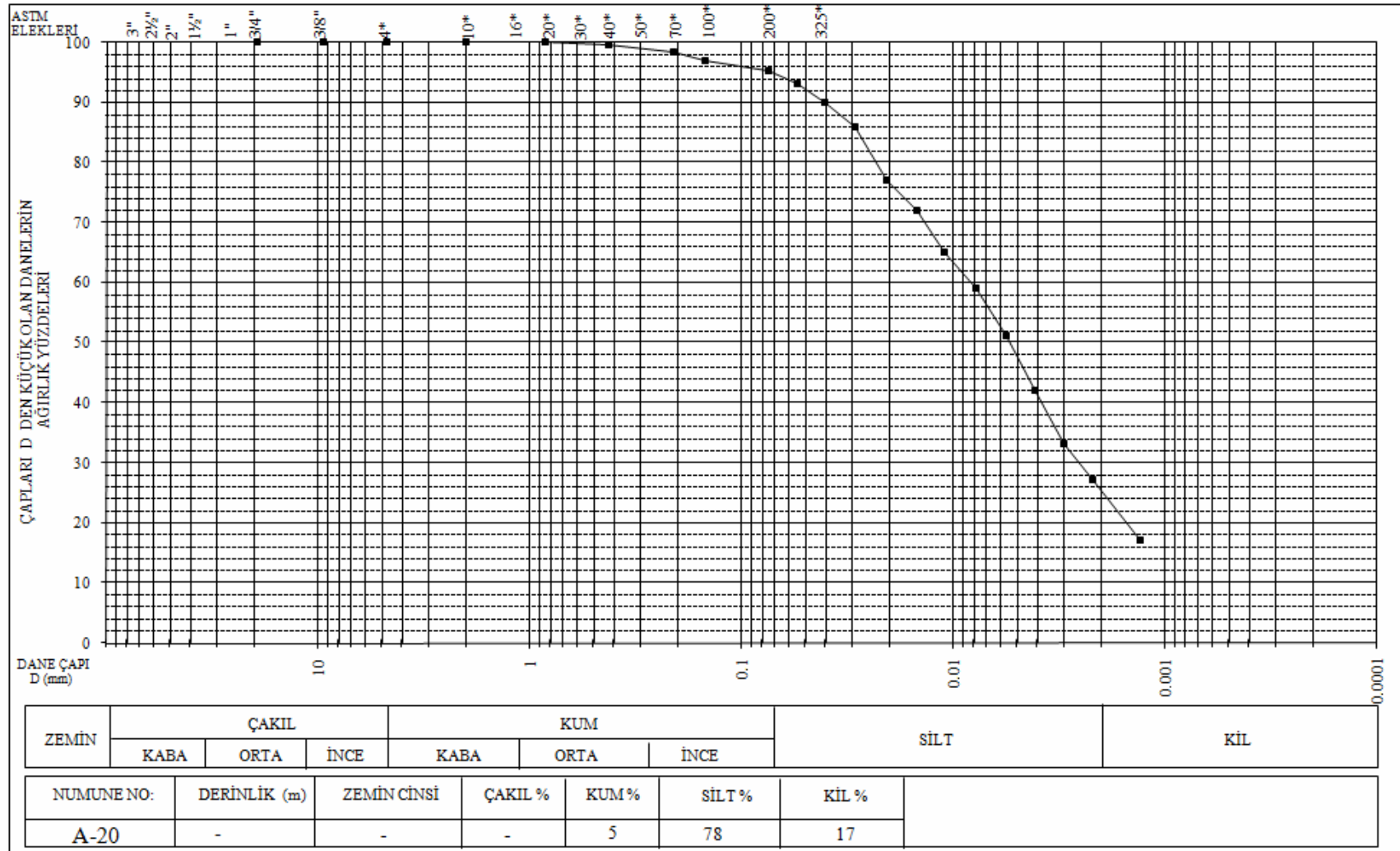
A.1.18 A-20 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.35 : 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	2.7	463.6	99
70	0.212	5.2	458.4	98
100	0.150	6.1	452.3	97
200	0.075	7.8	444.5	95

Çizelge A.36 : 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	49	50.0	47.65	8.56	0.075	95.3	95
0.5	48	49.0	46.65	8.72	0.056	93.3	93
1	46.5	47.5	45.15	8.96	0.040	90.3	90
2	44.5	45.5	43.15	9.29	0.029	86.3	86
4	40	41.0	38.65	10.02	0.021	77.3	77
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	10	11.0	8.65	14.89	0.001	17.3	17



Şekil A.18: A-20 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

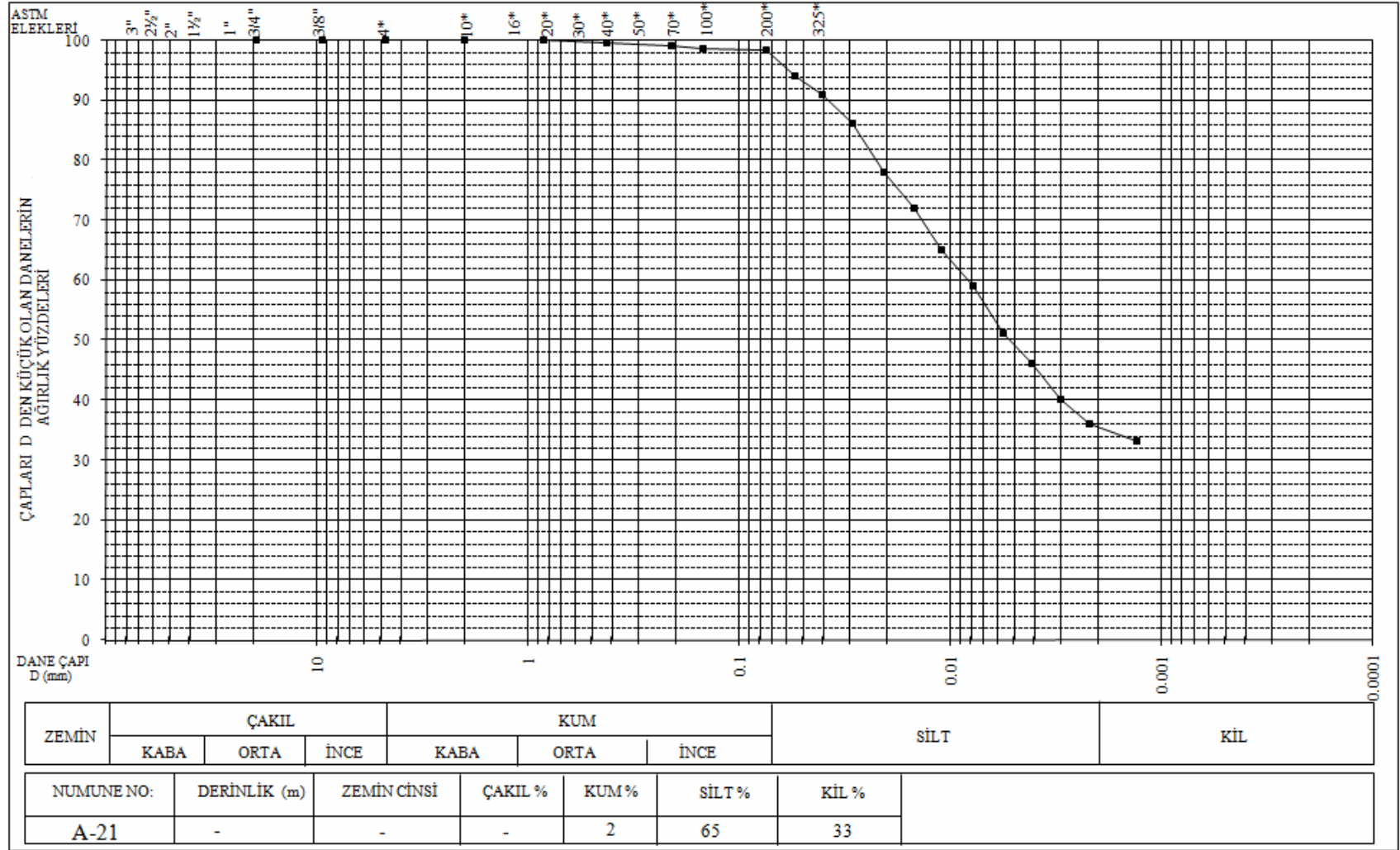
A.1.19 A-21 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.37 : 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	2.7	463.6	99
70	0.212	1.7	461.9	99
100	0.150	2.1	459.8	99
200	0.075	1.3	458.5	98

Çizelge A.38 : 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	98
0.5	48.5	49.5	47.15	8.64	0.056	94.3	94
1	47	48.0	45.65	8.88	0.040	91.3	91
2	44.5	45.5	43.15	9.29	0.029	86.3	86
4	40.5	41.5	39.15	9.94	0.021	78.3	78
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	24.5	25.5	23.15	12.54	0.004	46.3	46
240	21.5	22.5	20.15	13.03	0.003	40.3	40
480	19.5	20.5	18.15	13.35	0.002	36.3	36
1440	18	19.0	16.65	13.59	0.001	33.3	33



Şekil A.19: A-21 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

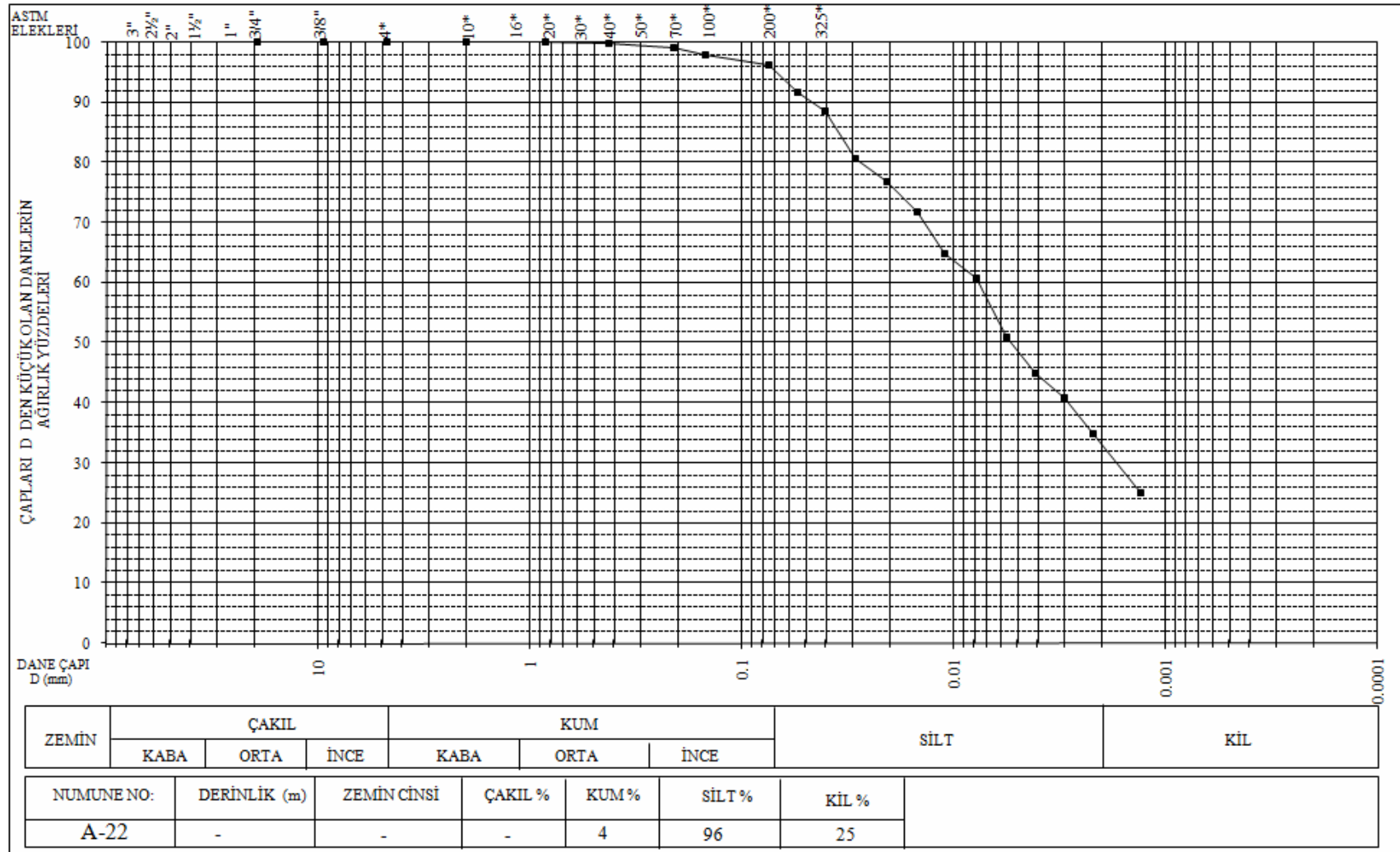
A.1.20 A-22 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.39 : Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü 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	1.5	493.9	100
70	0.212	3.4	490.5	99
100	0.150	5.6	484.9	98
200	0.075	8.9	476	96

Çizelge A.40 : 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	51	48.15	8.48	0.075	96.3	96
0.5	48	49	46.15	8.80	0.056	92.3	92
1	46.5	47.5	44.65	9.04	0.040	89.3	89
2	42.5	43.5	40.65	9.69	0.030	81.3	81
4	40	41	38.65	10.02	0.021	77.3	77
8	37.5	38.5	36.15	10.43	0.015	72.3	72
15	34	35	32.65	10.99	0.011	65.3	65
30	32	33	30.65	11.32	0.008	61.3	61
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	14	15	12.65	14.24	0.001	25.3	25



Şekil A.20 : A-22 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

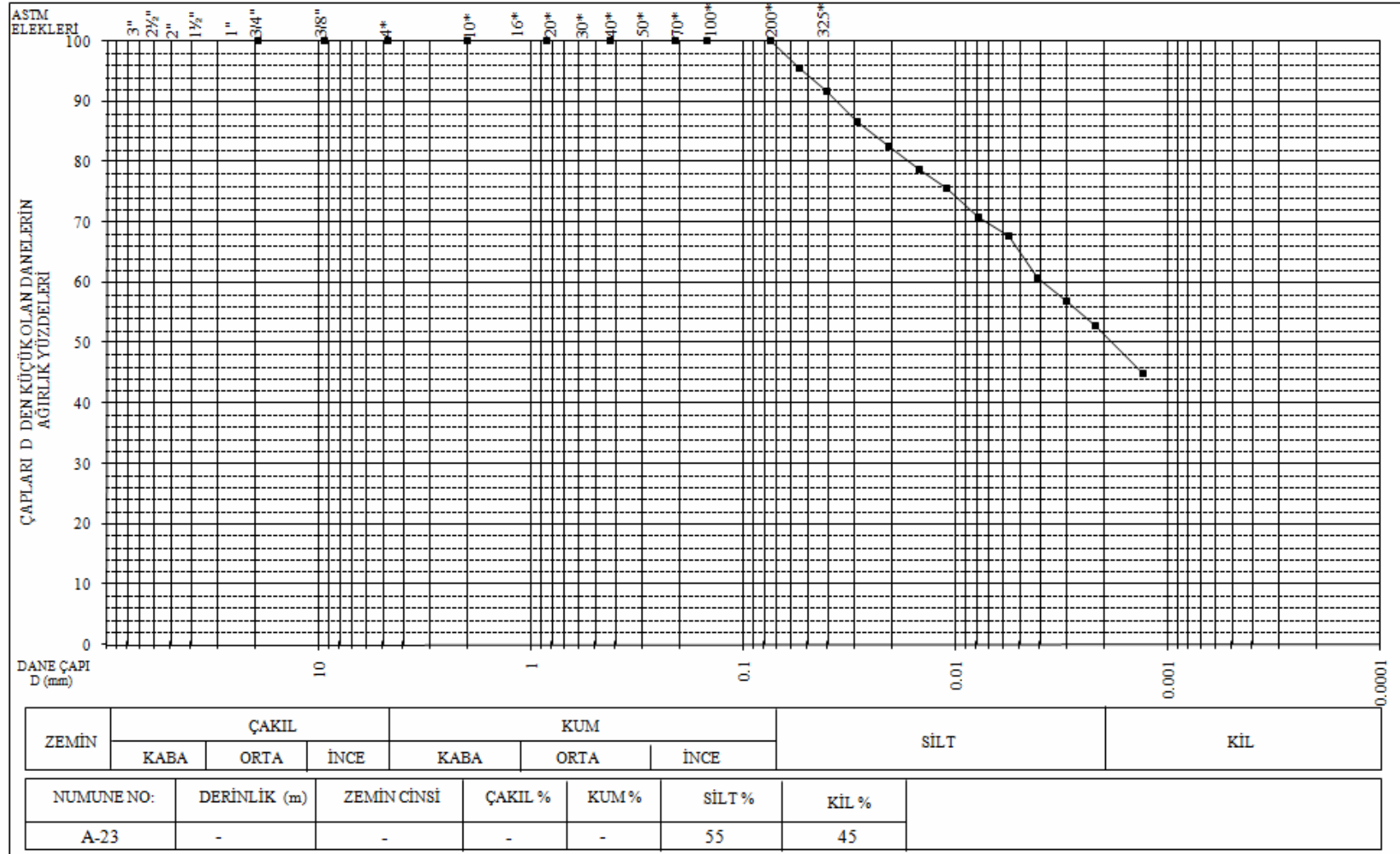
A.1.21 A-23 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.41 : Elek analizi

Elek no	Açıklık (mm)	Elek Üstü 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.42 : 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	24	25	22.65	12.62	0.001	45.3	45



Şekil A.21 : A-23 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

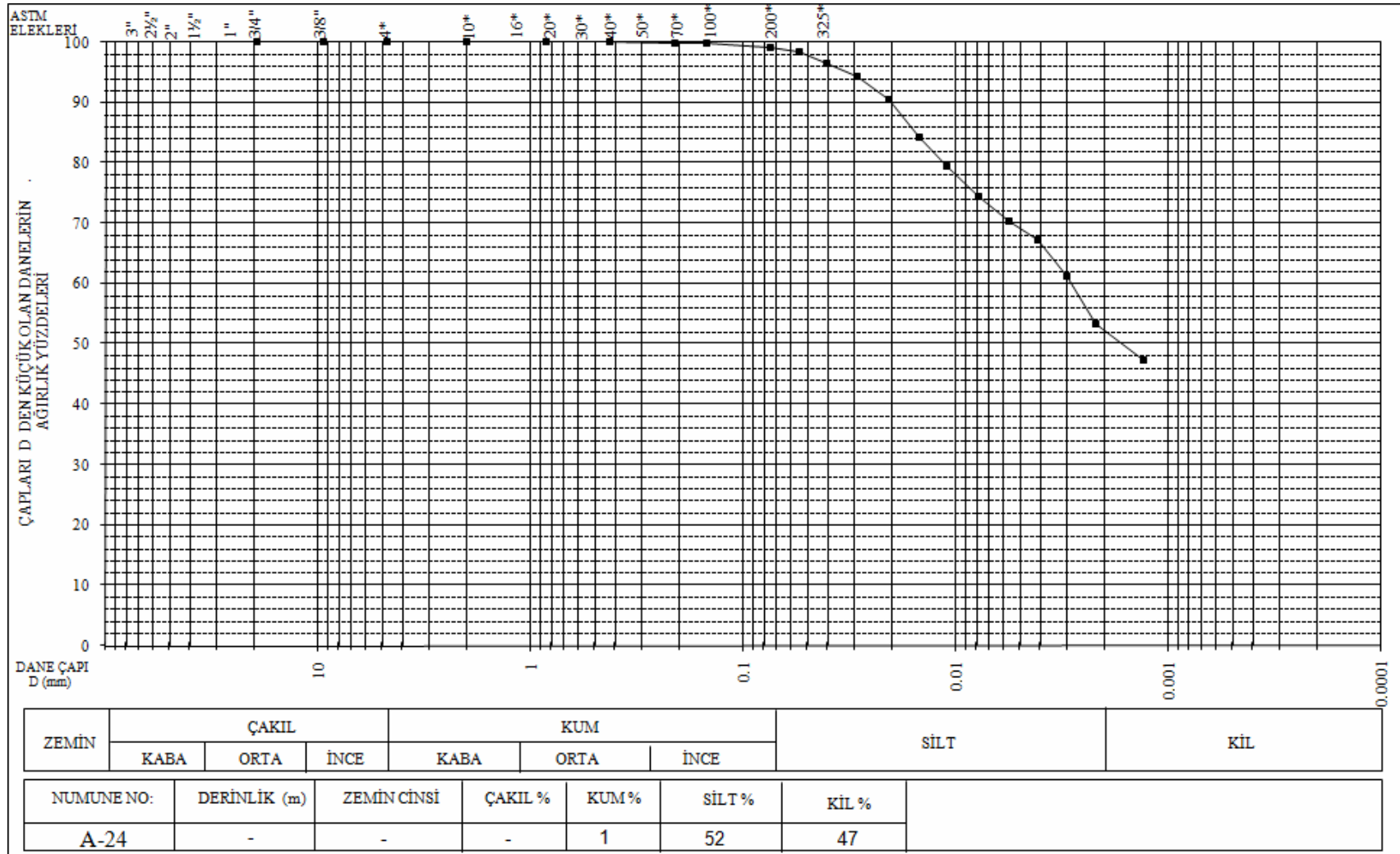
A.1.22 A-24 numunesinin elek ve hidrometre analizi

Çizelge A.43 : 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	0.5	469.3	100
200	0.075	3	466.3	99

Çizelge A.44 : 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	0.052	98.3	98
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	28	29	26.65	11.97	0.002	53.3	53
1440	25	26	23.65	12.46	0.001	47.3	47



Şekil A.22 : A-24 numunesine ait dane çapı dağılımı eğrisi

EK B

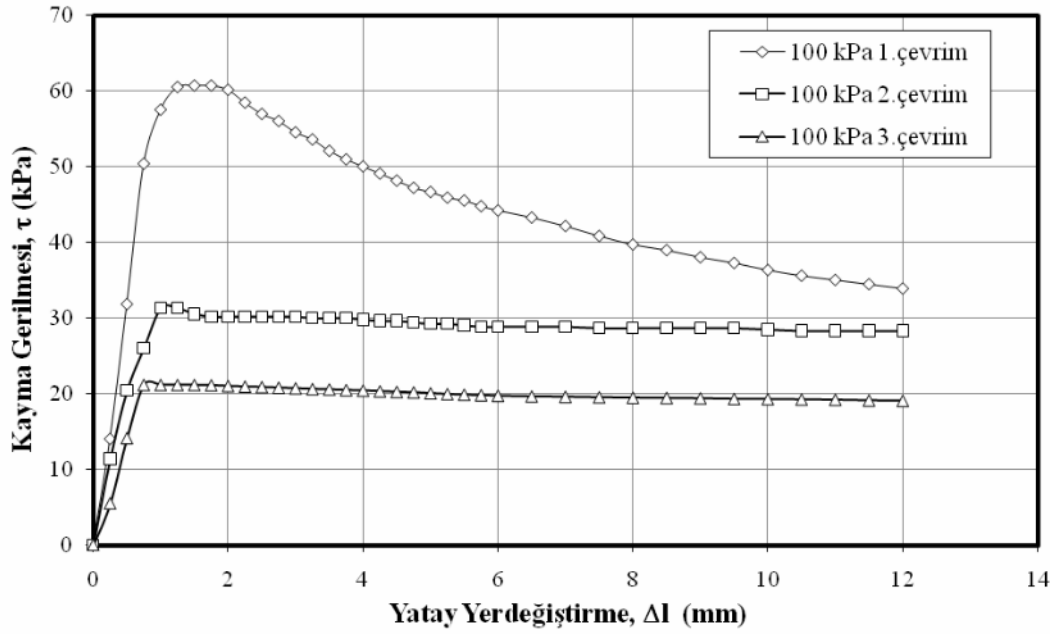
B.1 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri

B.2 Halka Kesme Deneyi

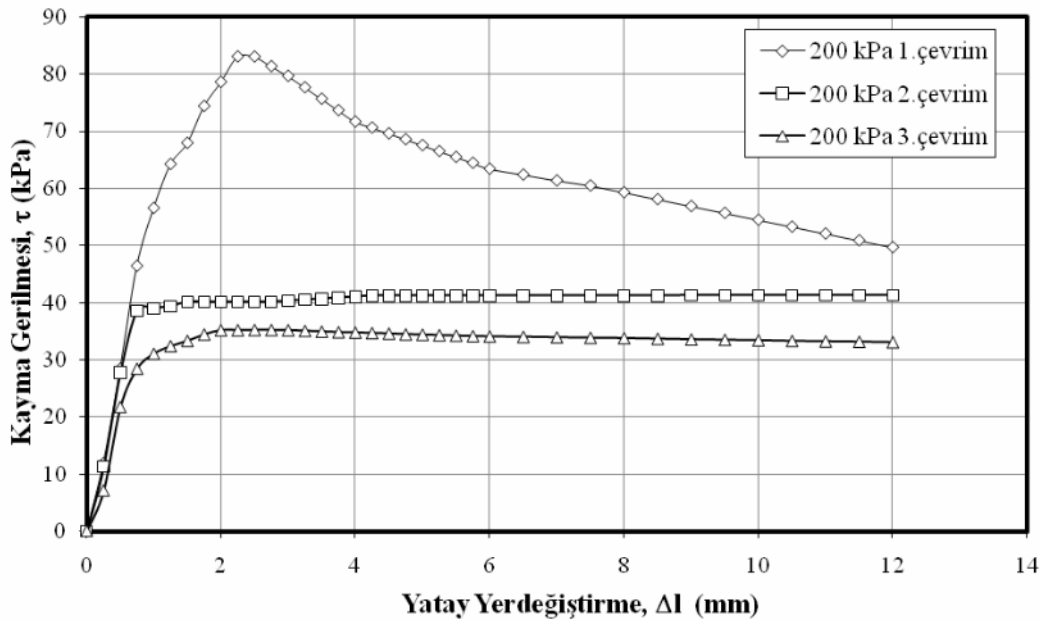
EK B

B.1 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri

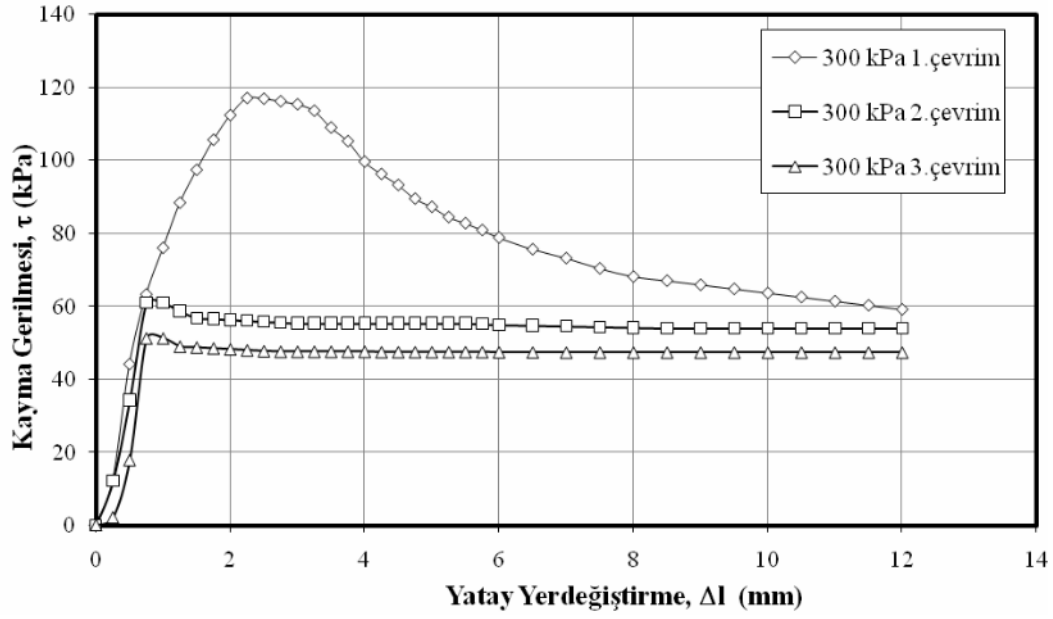
B.1.1 A-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



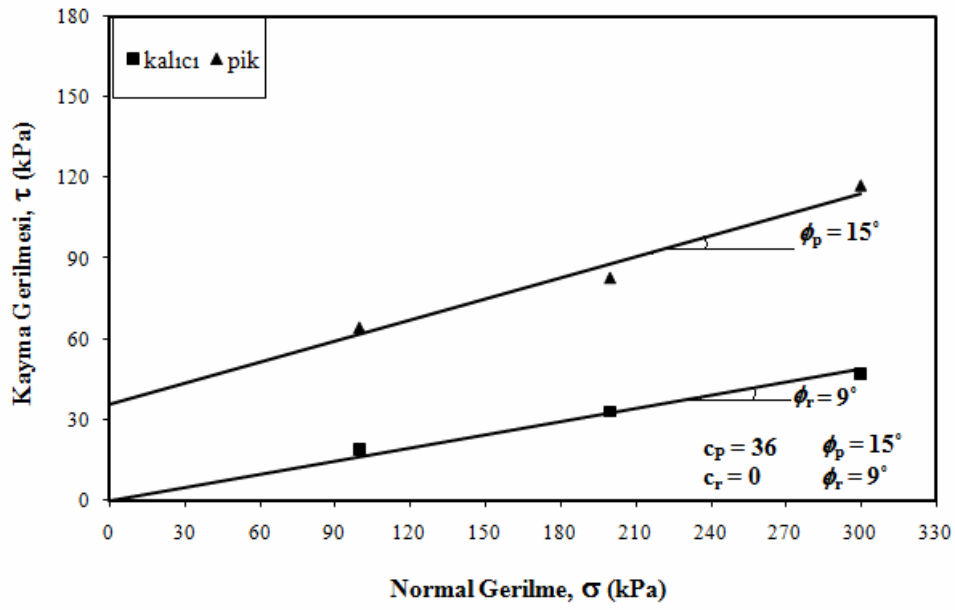
Şekil B.1 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.2 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

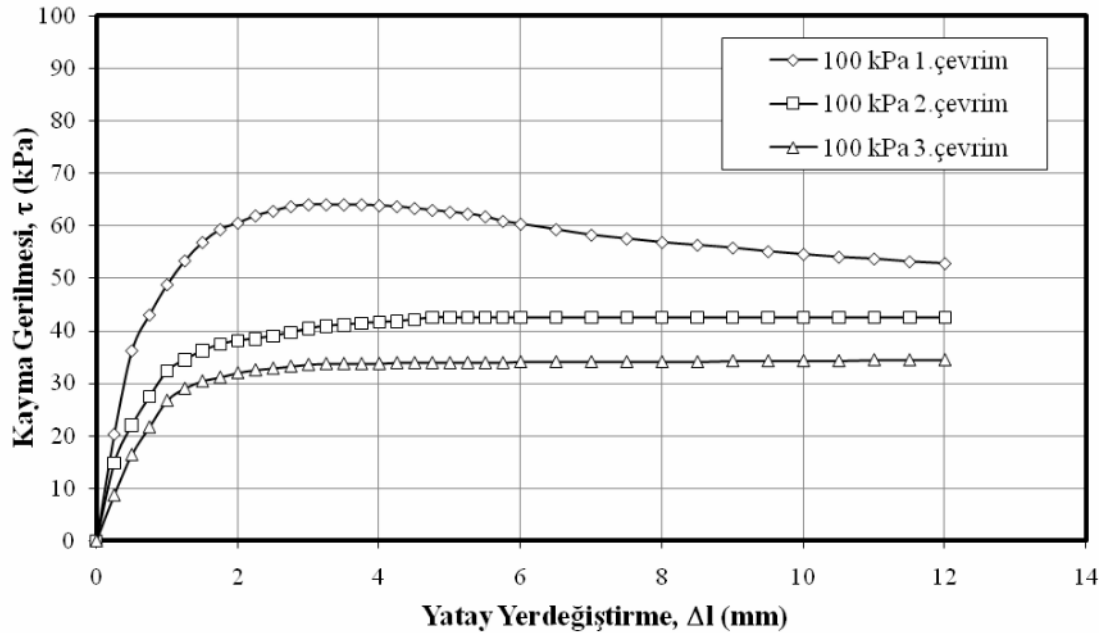


Şekil B.3 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

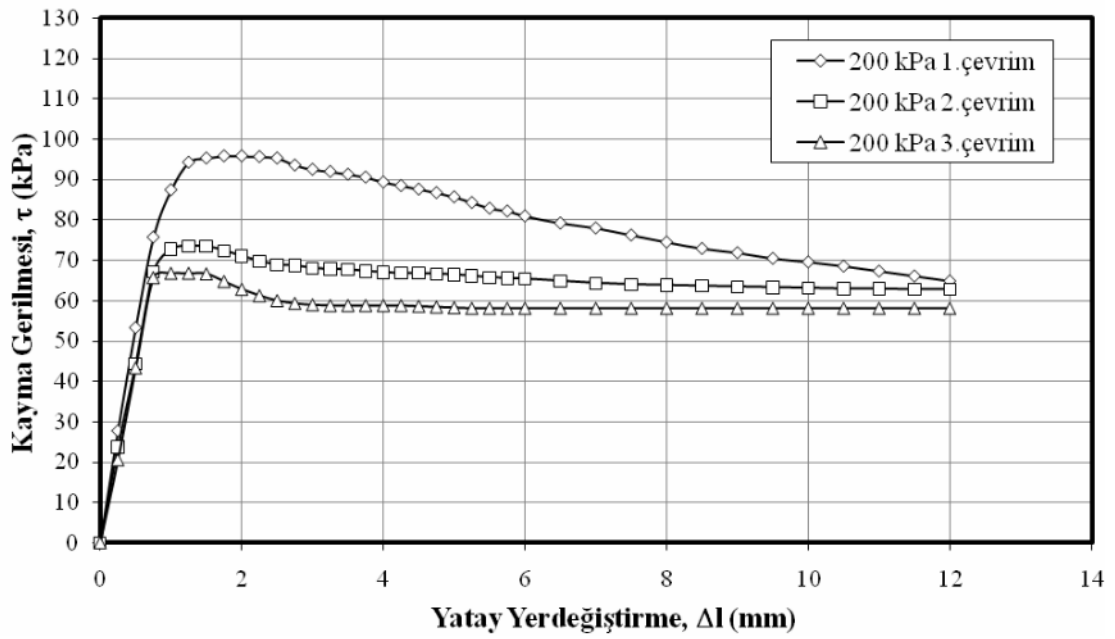


Şekil B.4 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

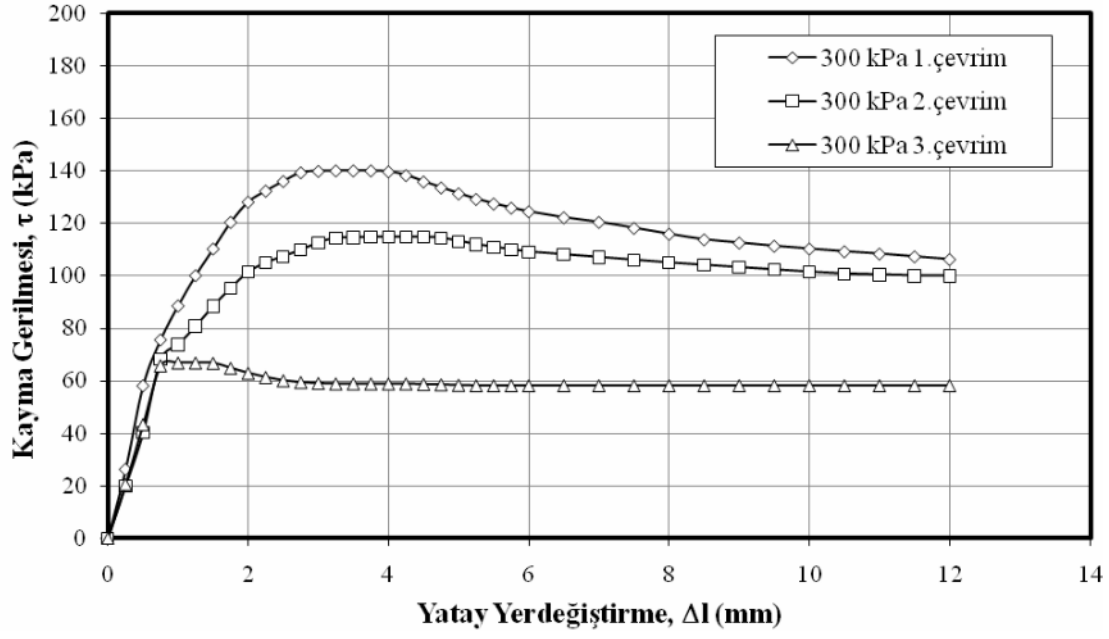
B.1.2 A-2 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



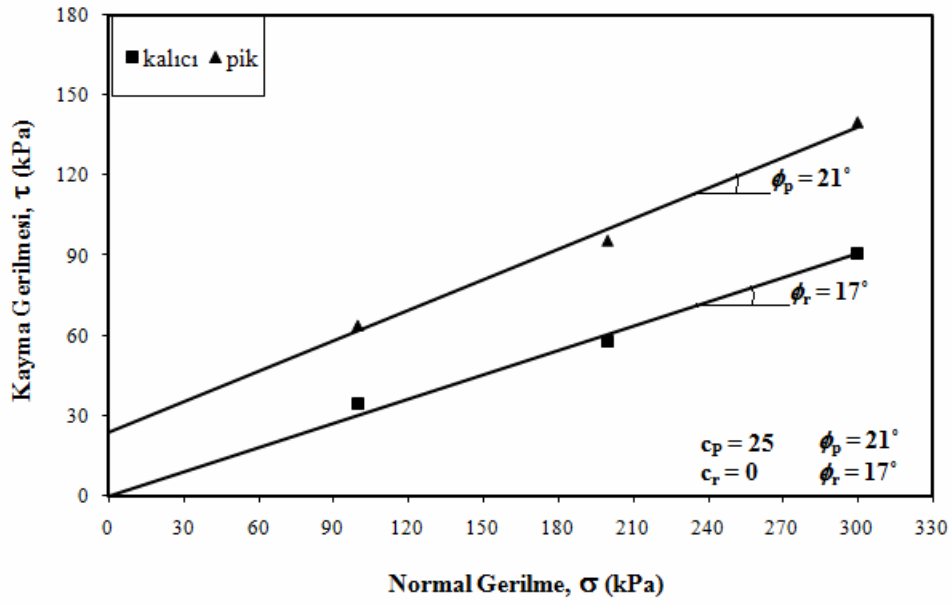
Şekil B.5 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.6 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

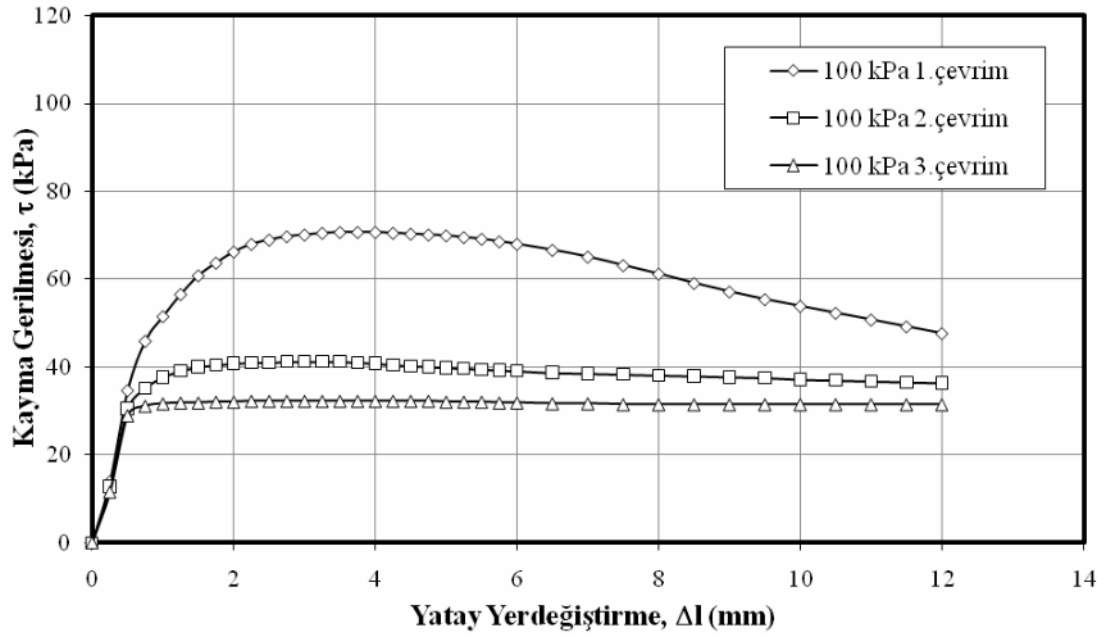


Şekil B.7 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

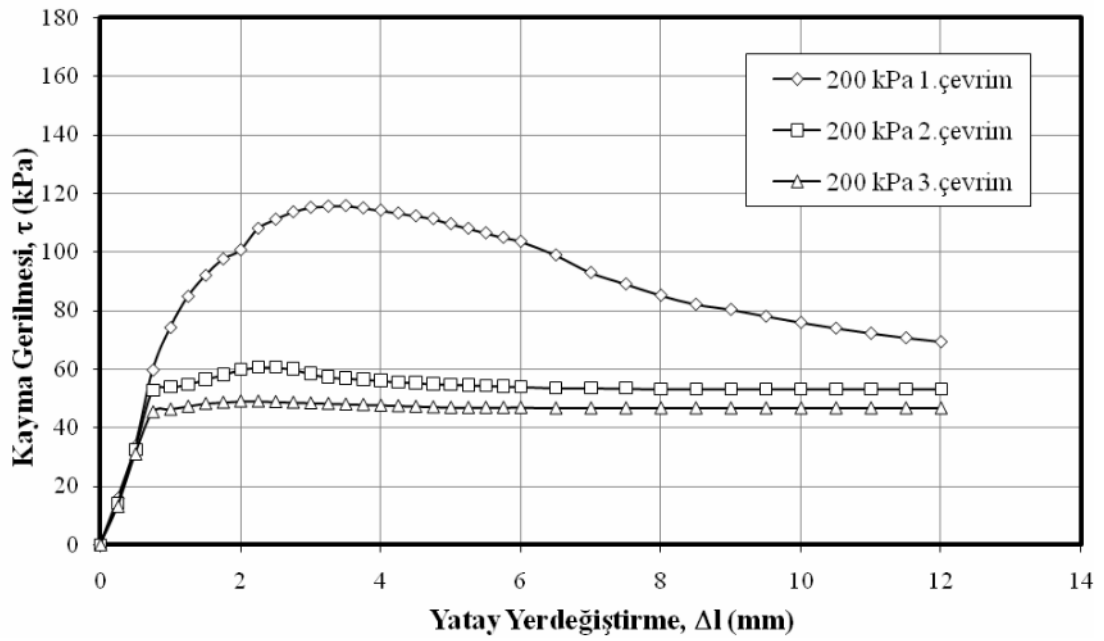


Şekil B.8 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

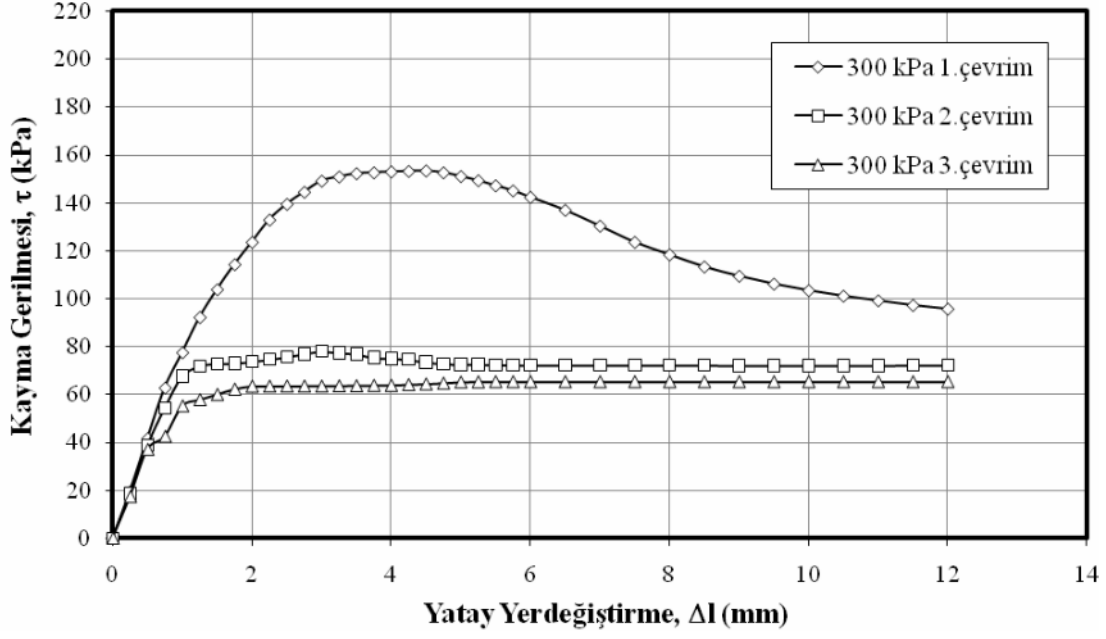
B.1.3 A-3 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



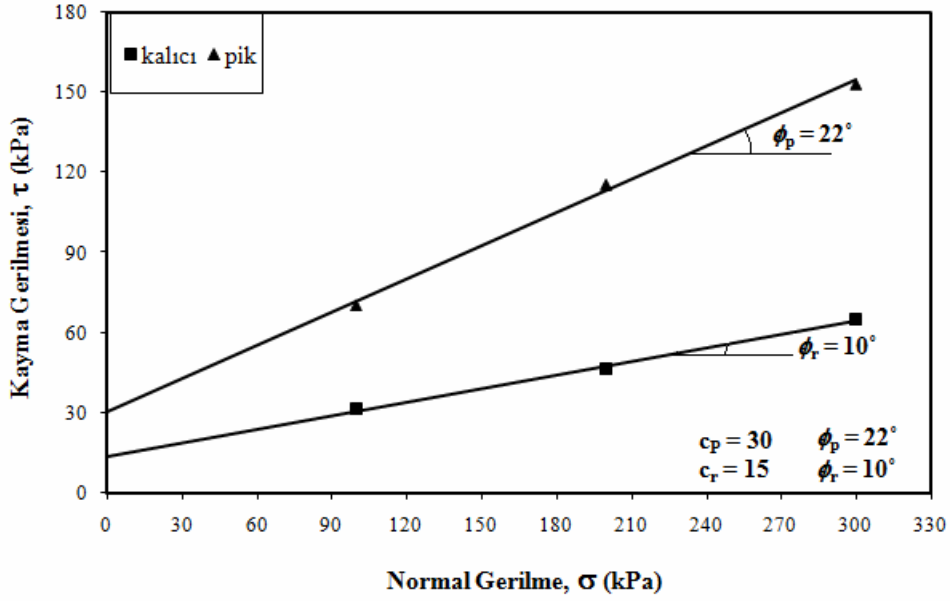
Şekil B.9 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.10 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

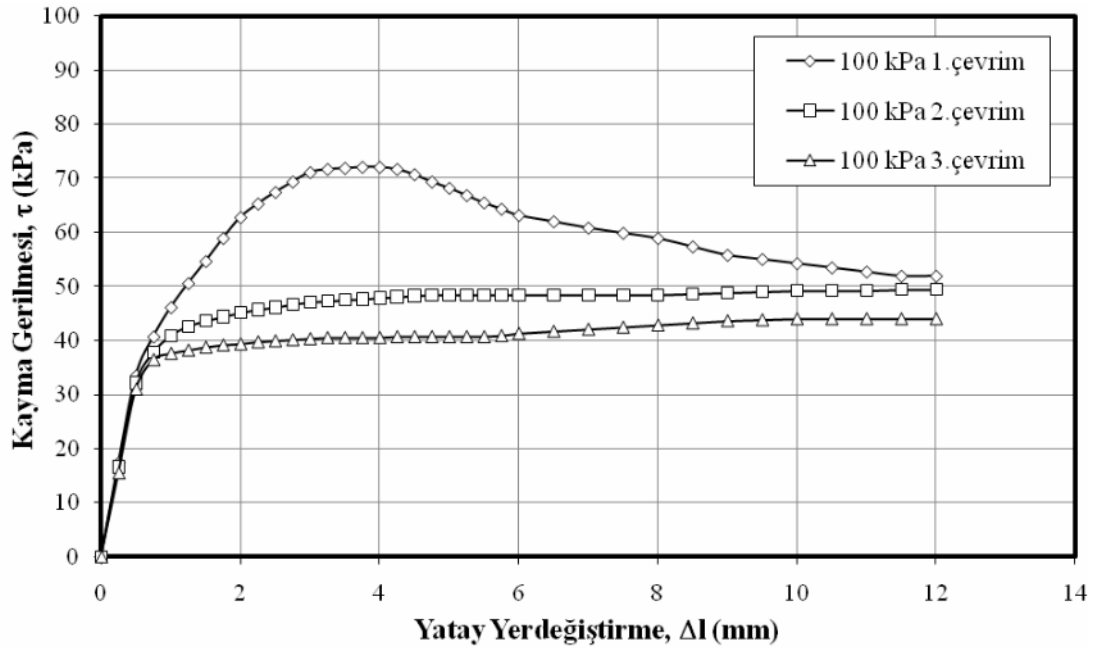


Şekil B.11 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

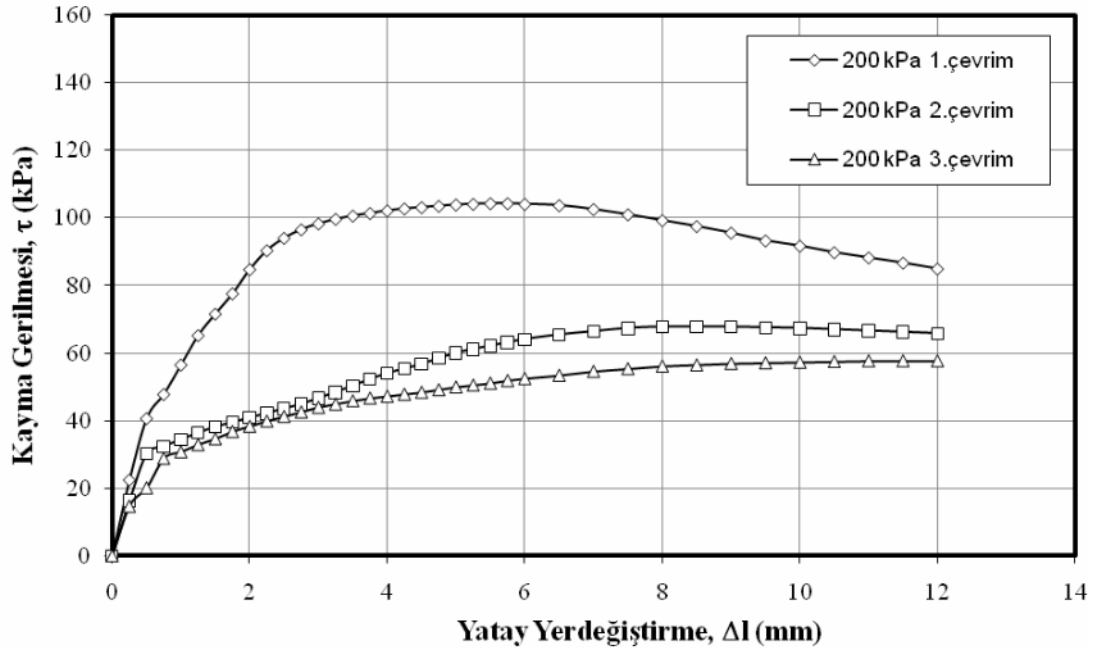


Şekil B.12 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

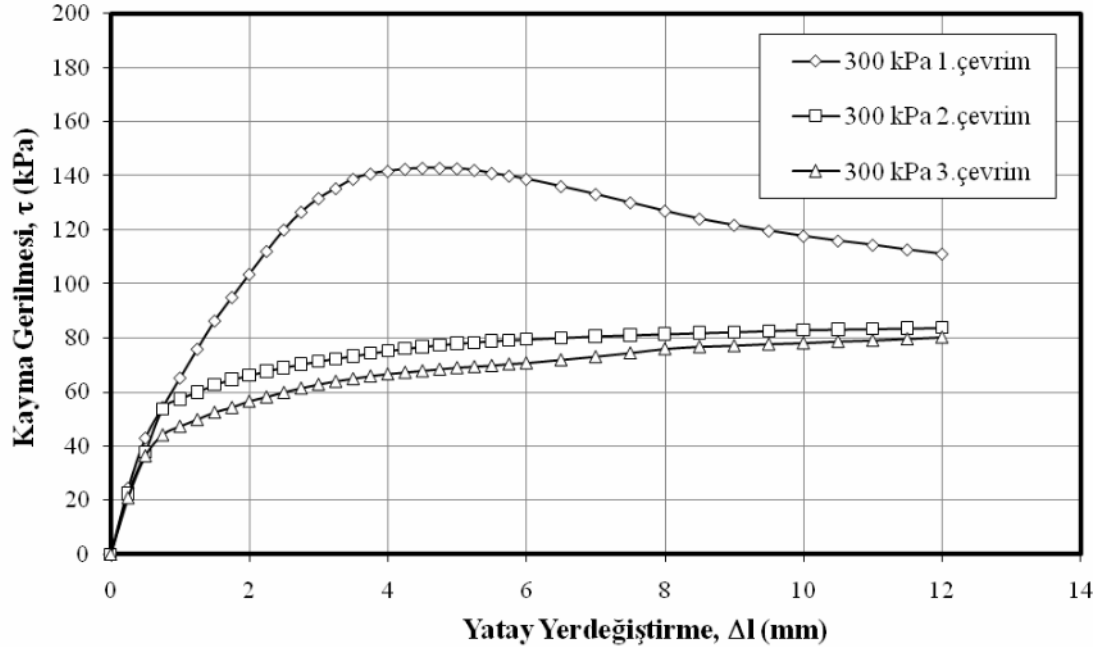
B.1.4 A-4 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



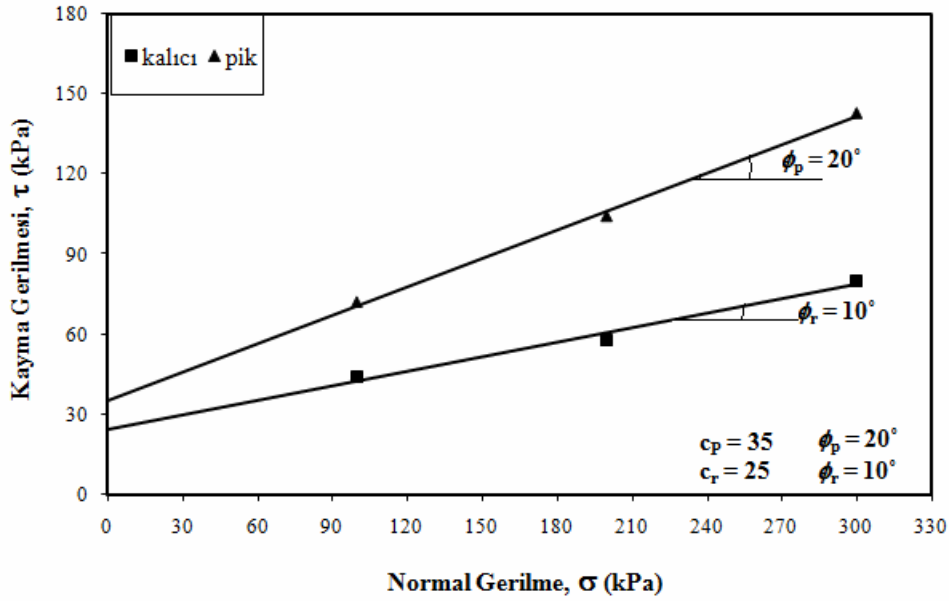
Şekil B.13 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.14 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

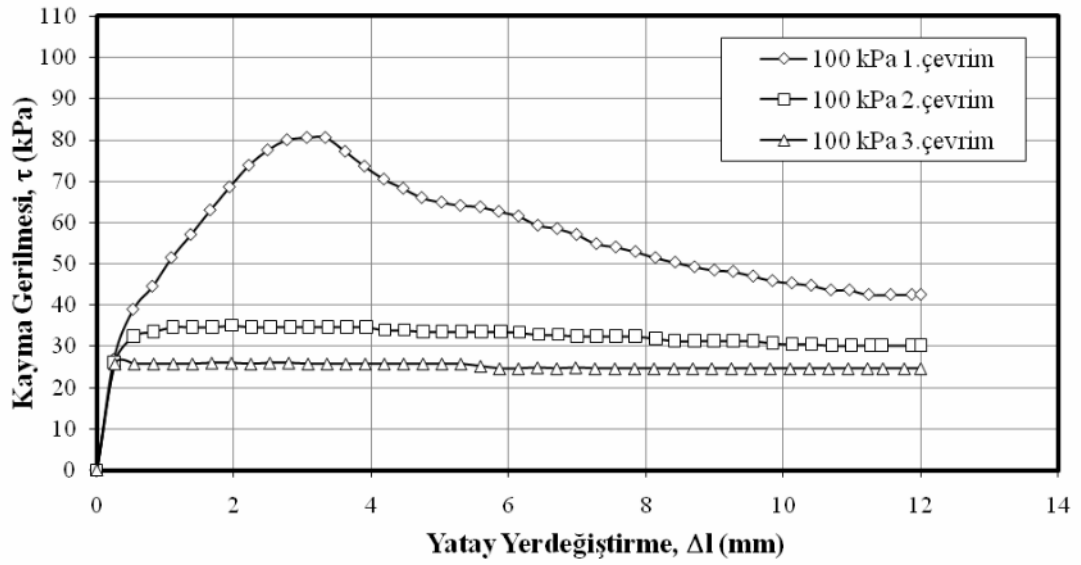


Şekil B.15 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

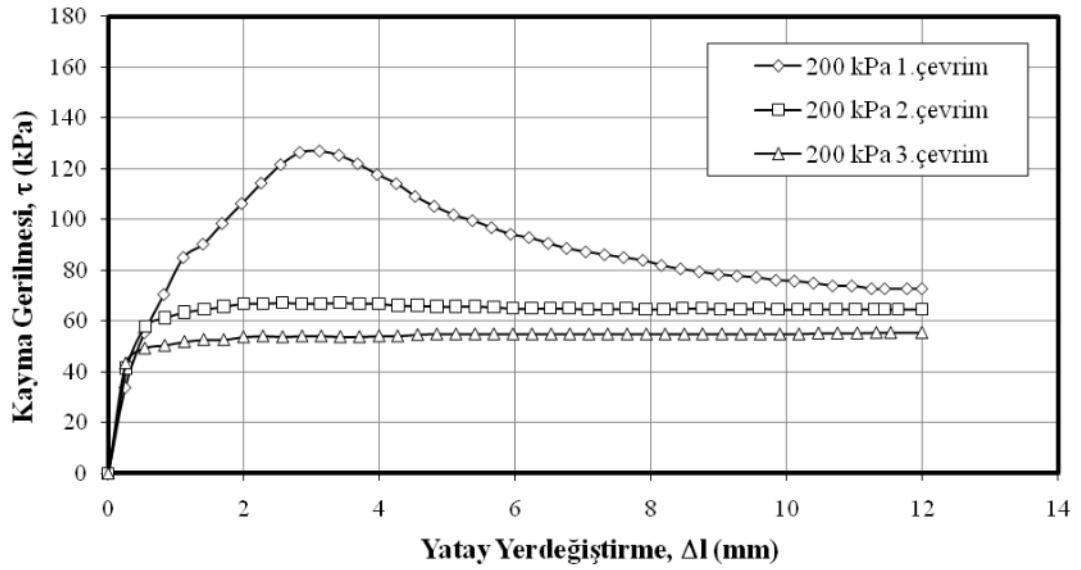


Şekil B.16 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

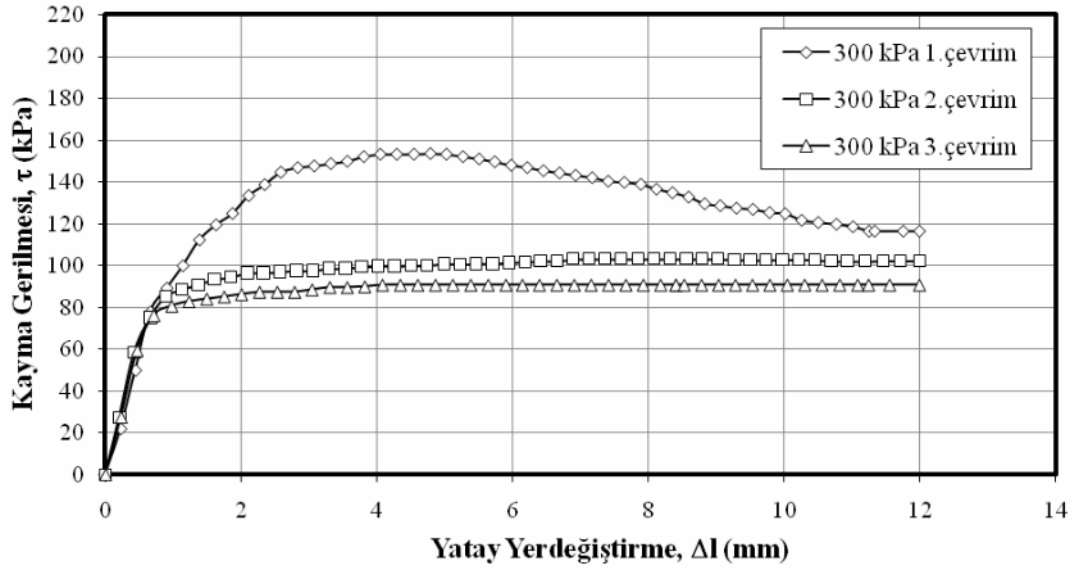
B.1.5 A-5 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



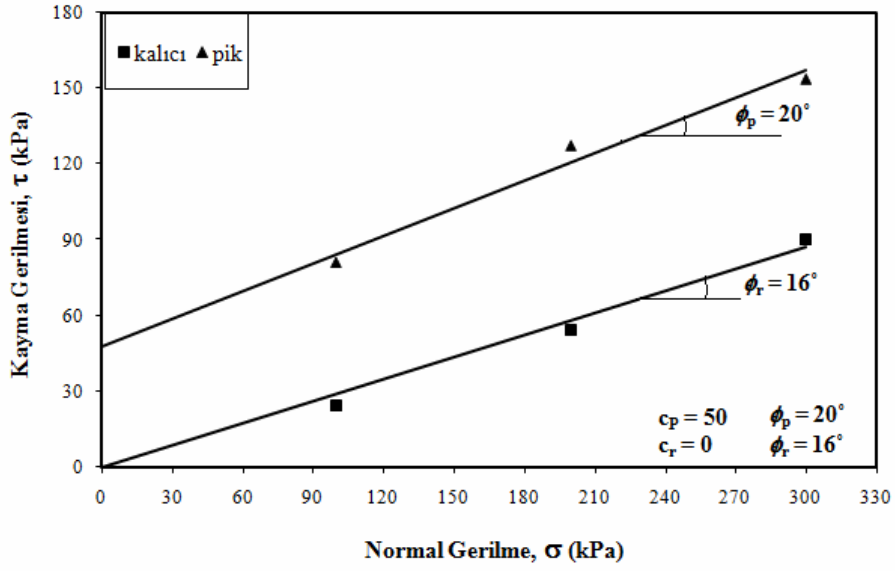
Şekil B.17 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.18 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

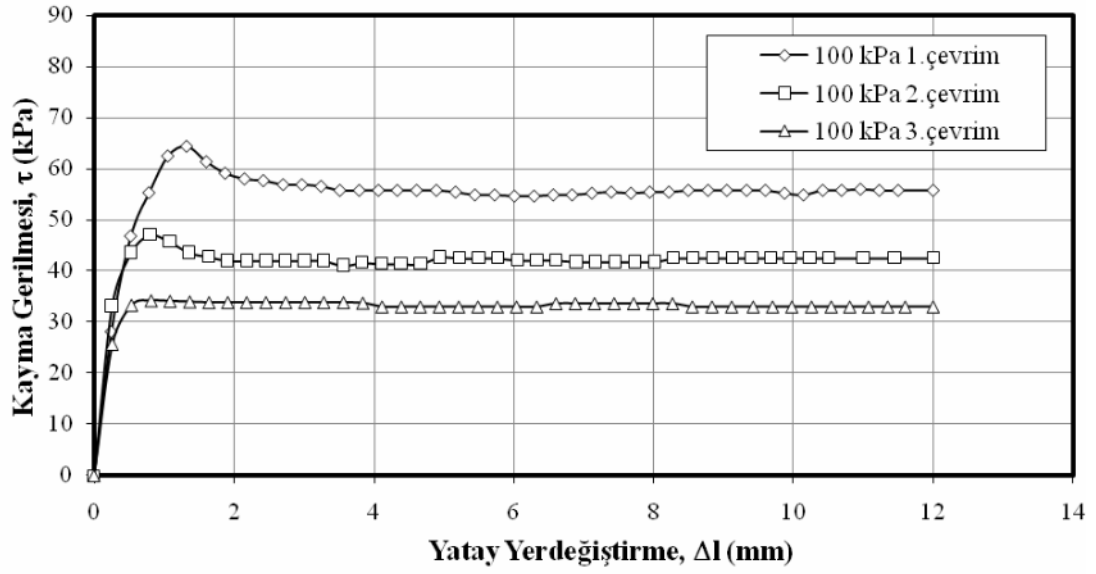


Şekil B.19 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

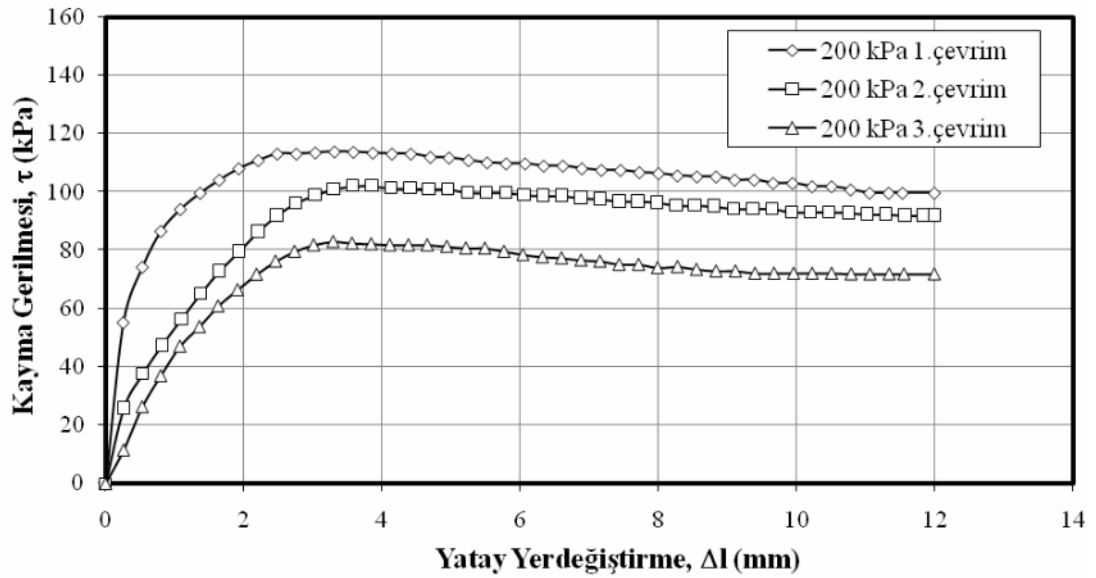


Şekil B.20 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

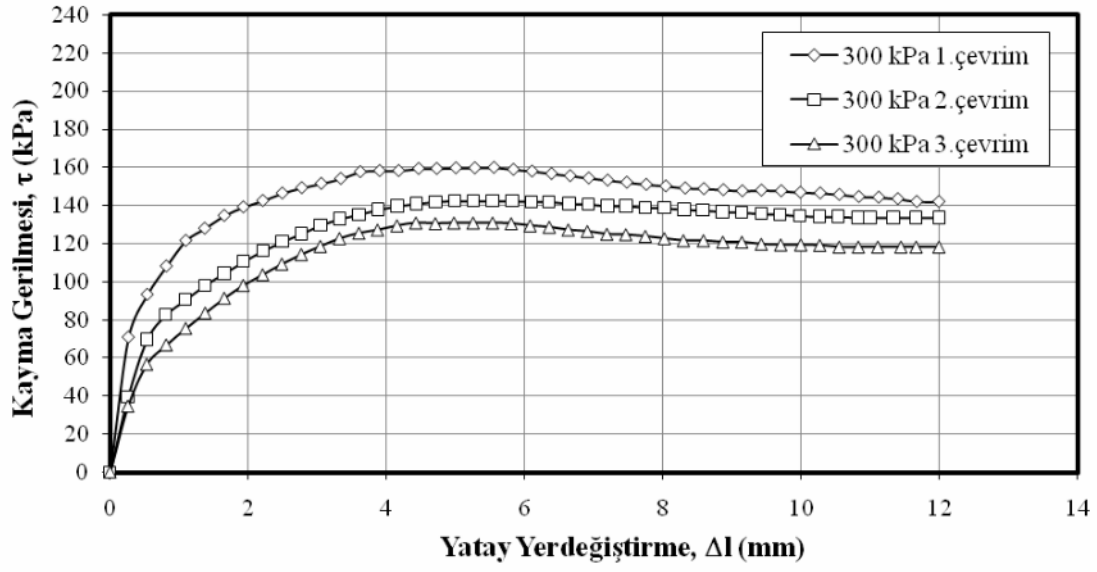
B.1.6 A-6 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



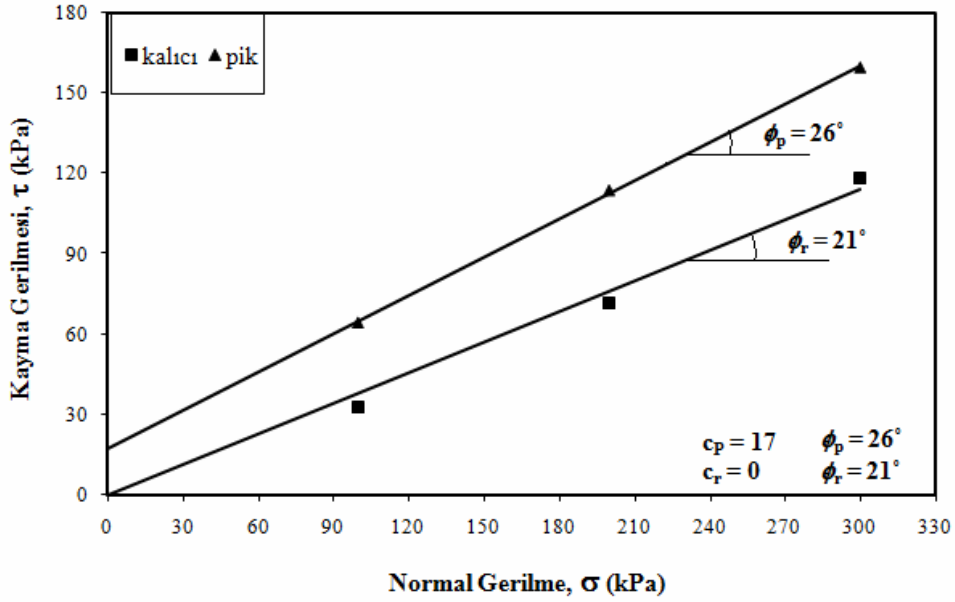
Şekil B.21 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.22 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

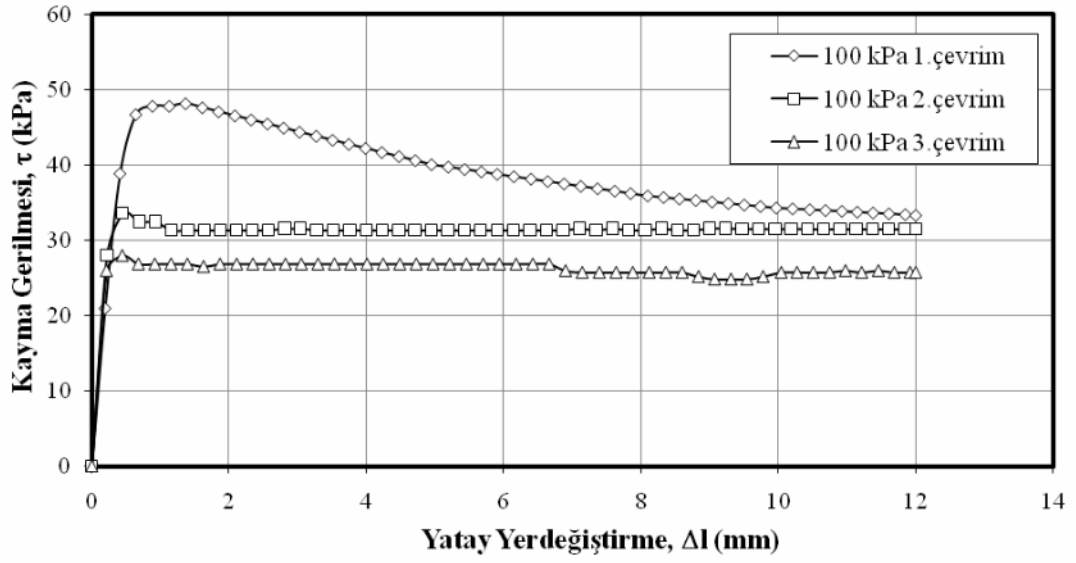


Şekil B.23 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

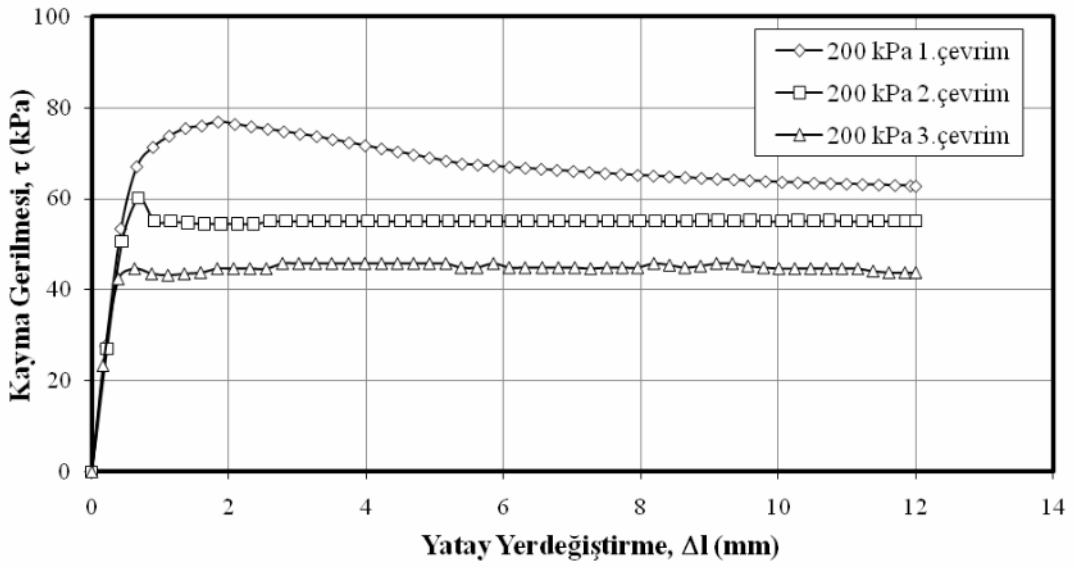


Şekil B.24 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

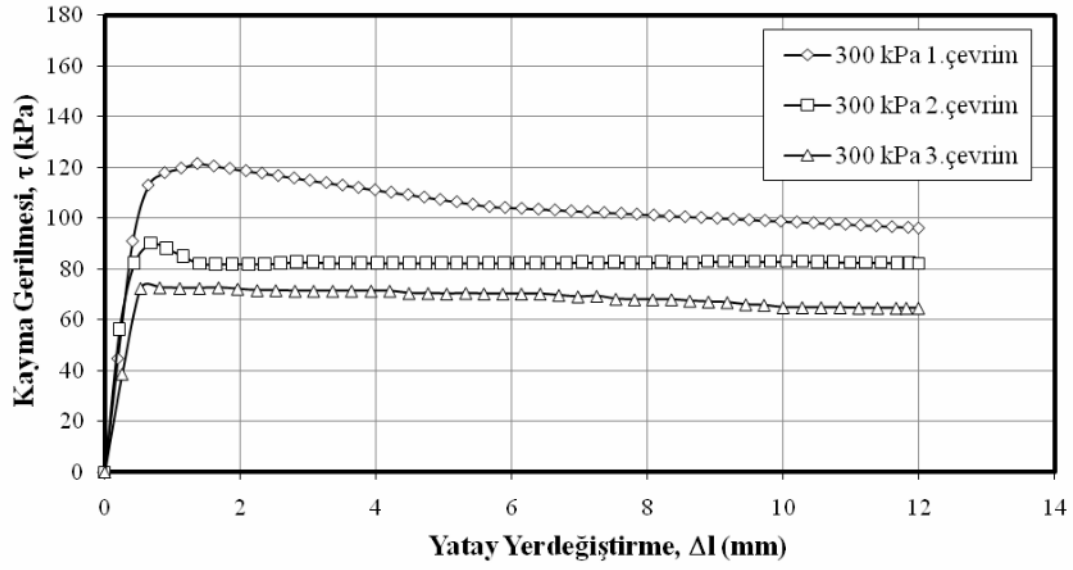
B.1.7 A-7 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



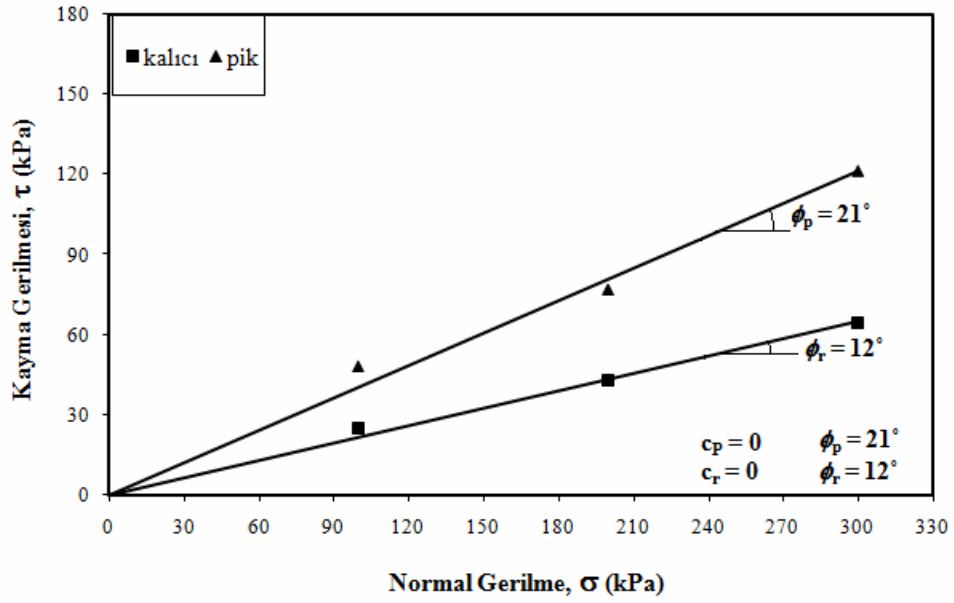
Şekil B.25 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.26 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

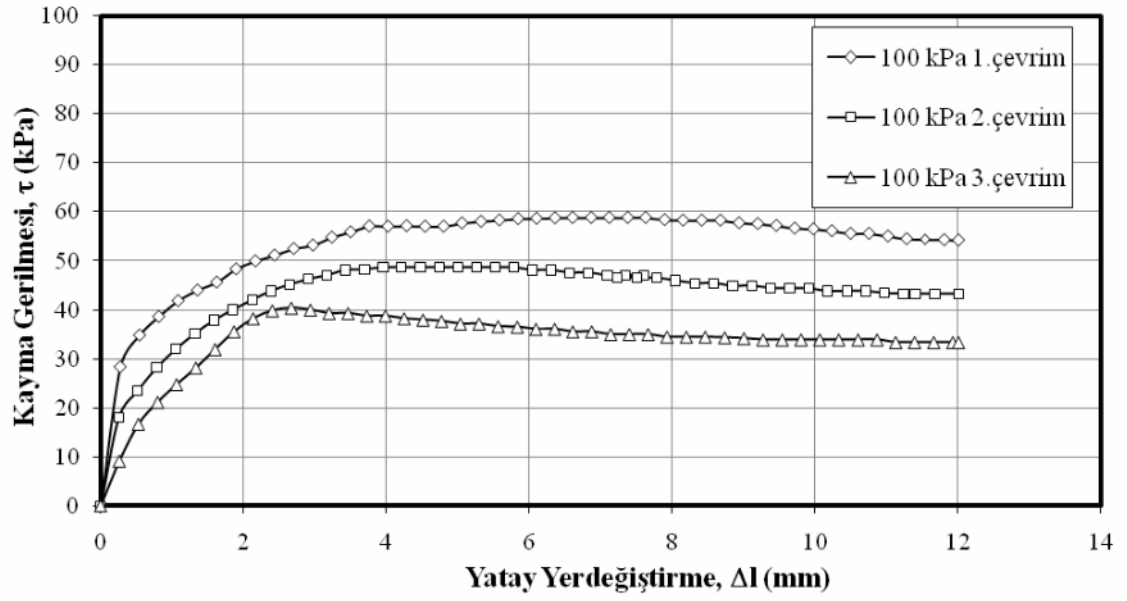


Şekil B.27 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

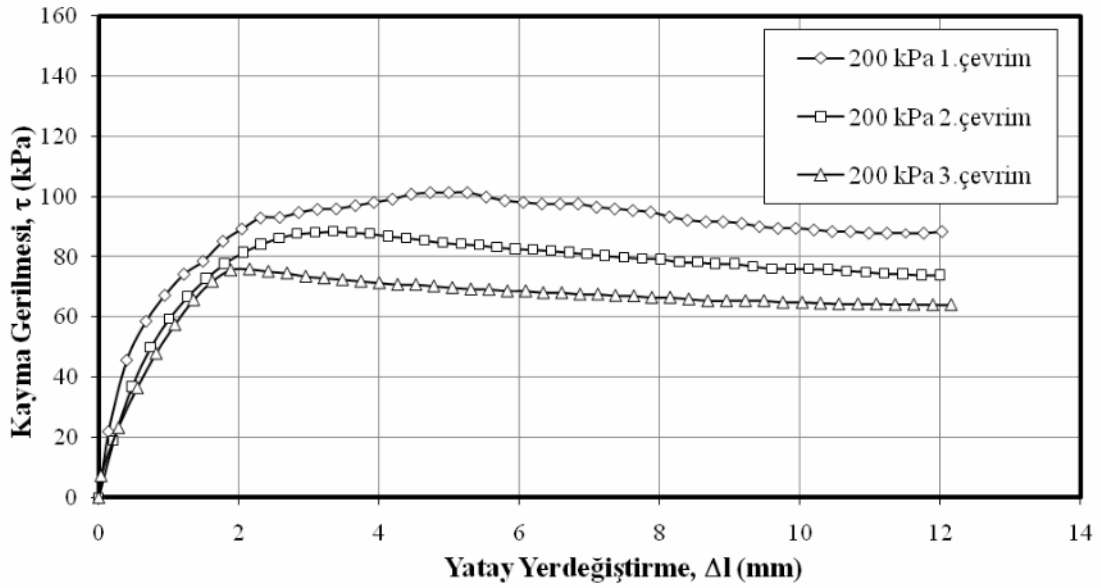


Şekil B.28 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

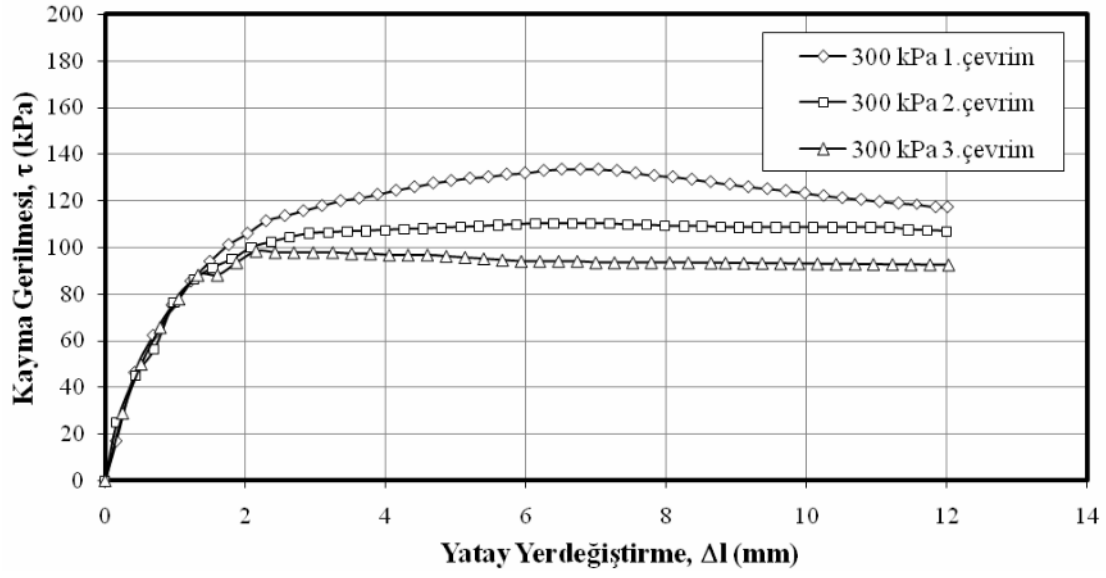
B.1.8 A-8 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



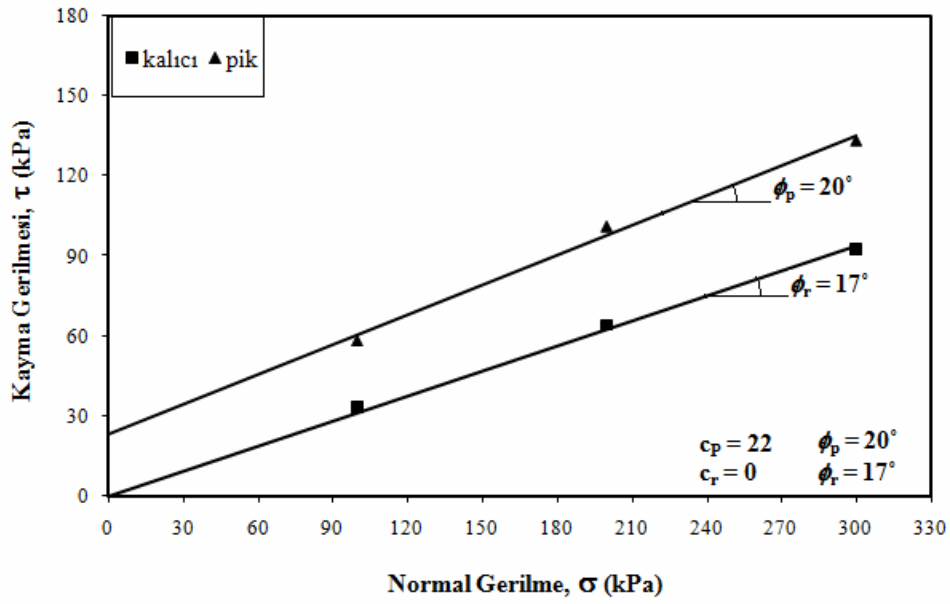
Şekil B.29 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.30 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

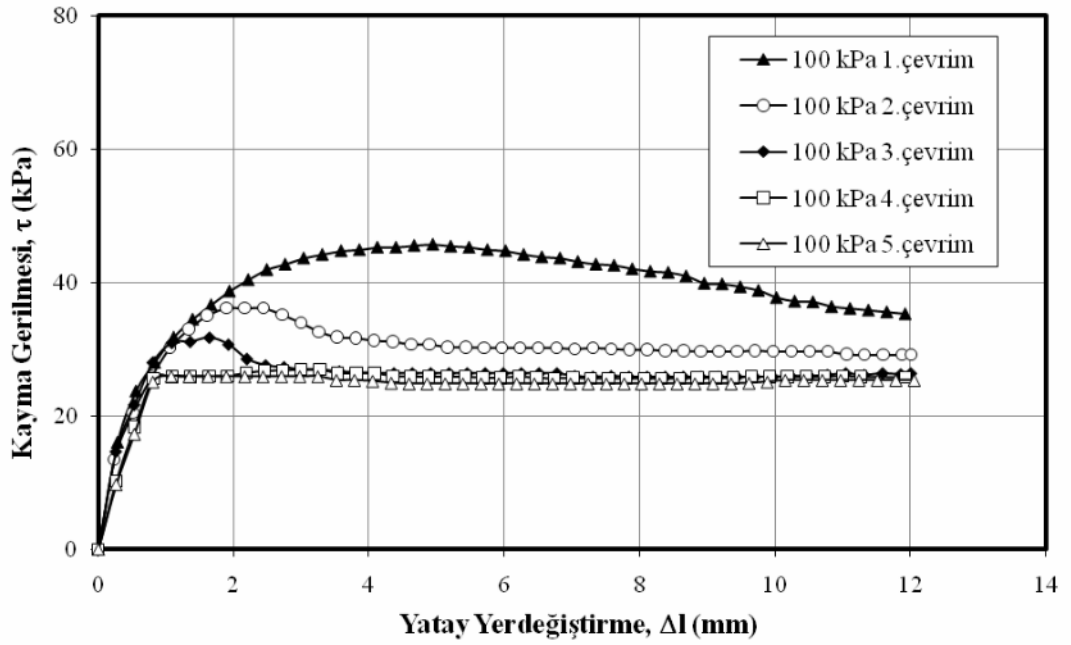


Şekil B.31 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

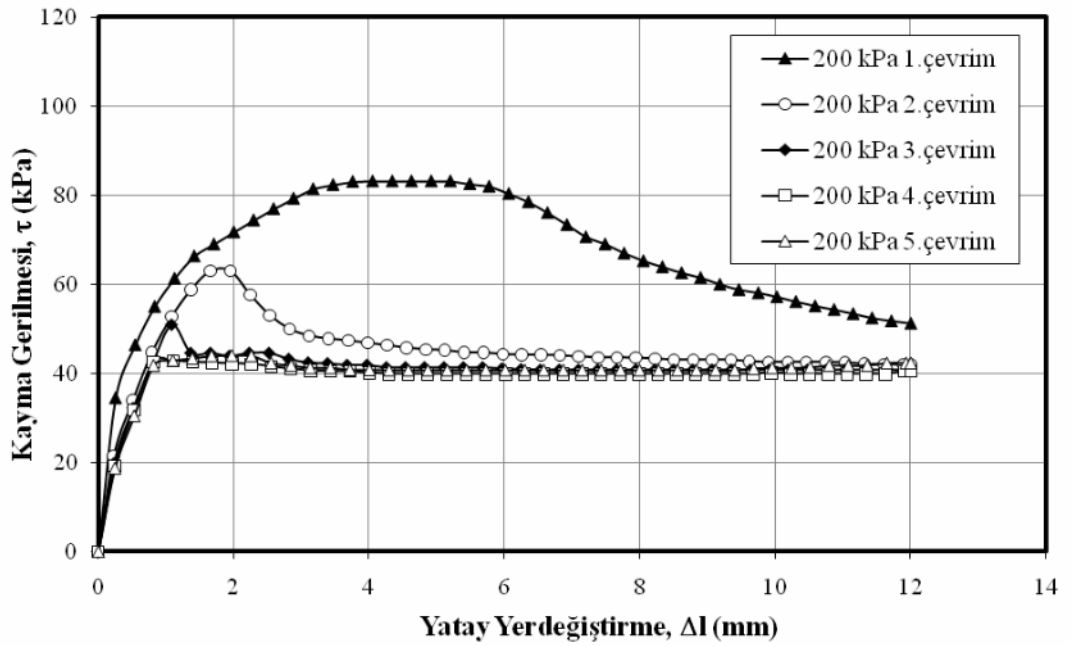


Şekil B.32 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

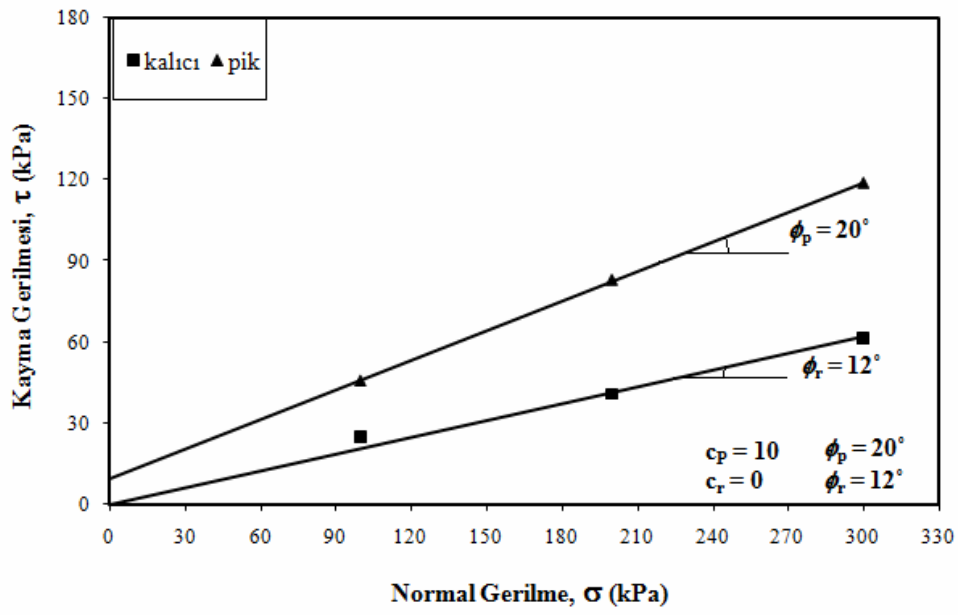
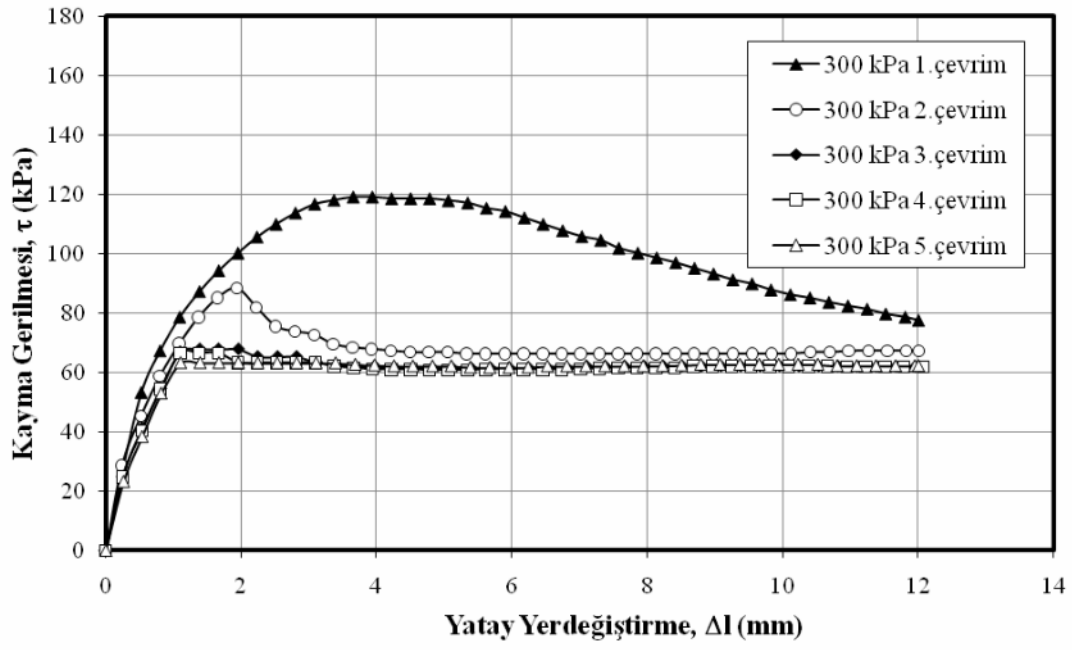
B.1.9 A-9 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



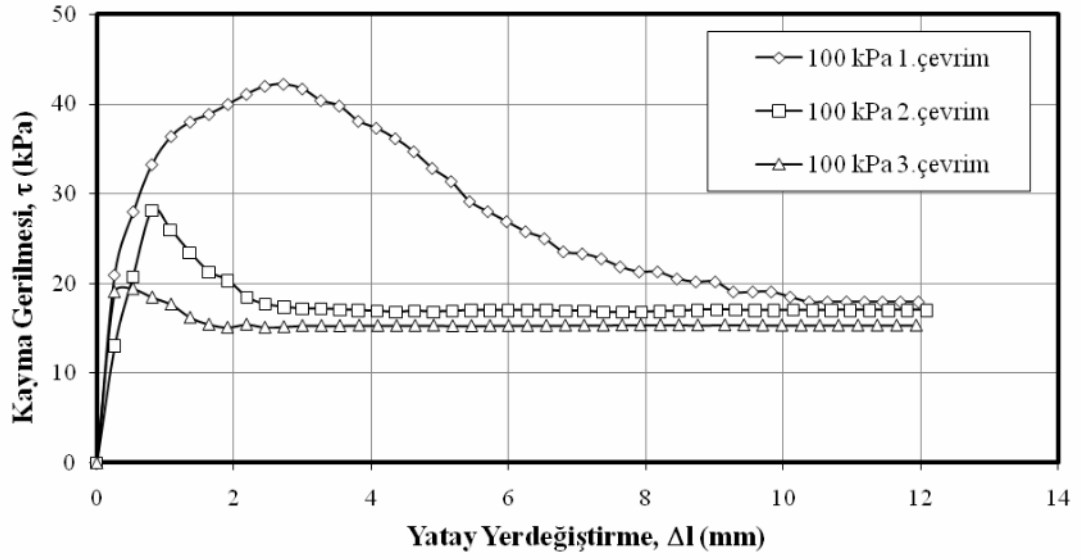
Şekil B.33 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



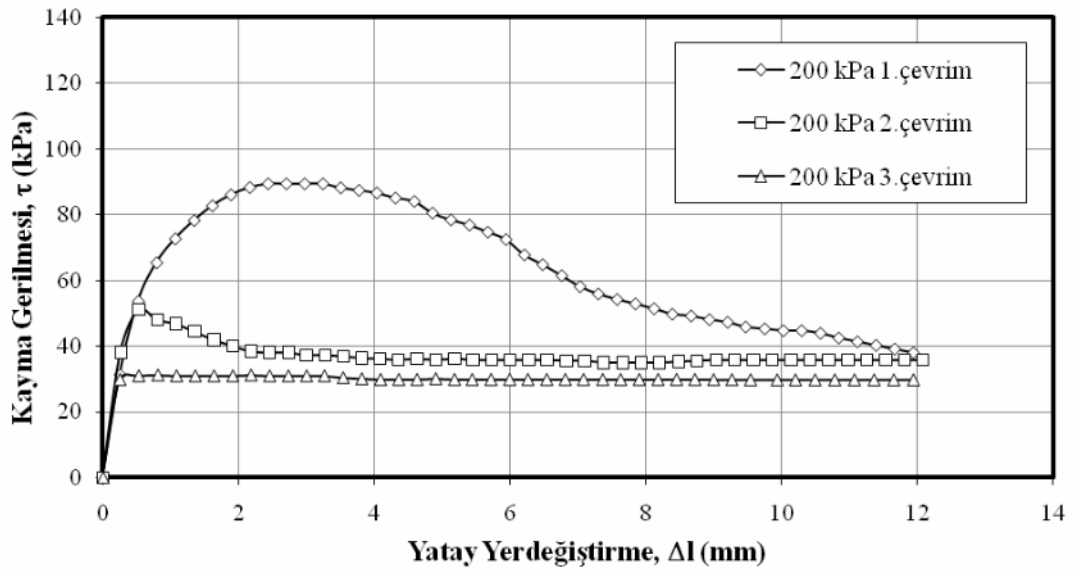
Şekil B.34 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa



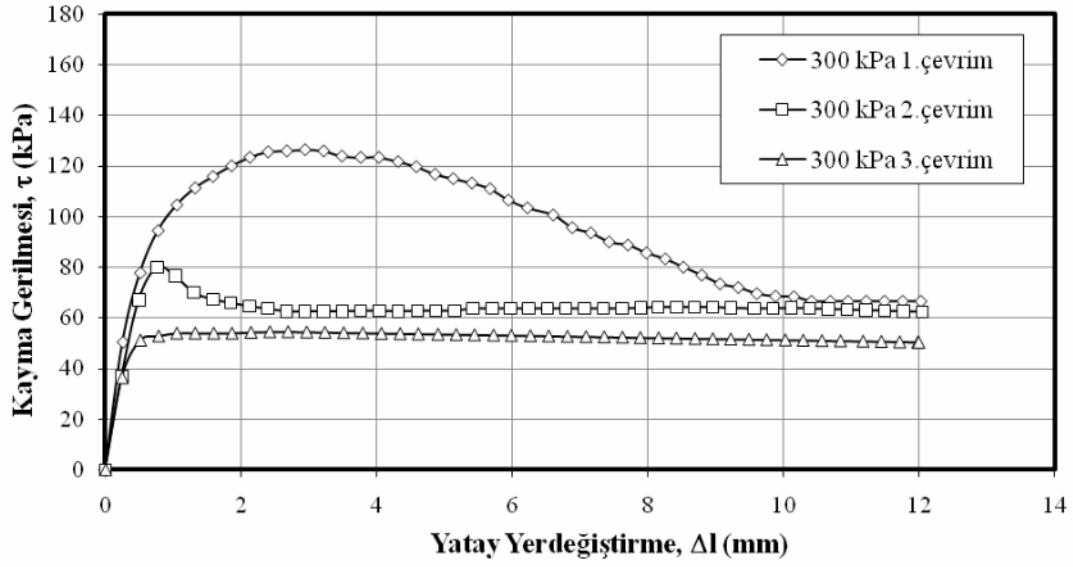
B.1.10 A-10 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



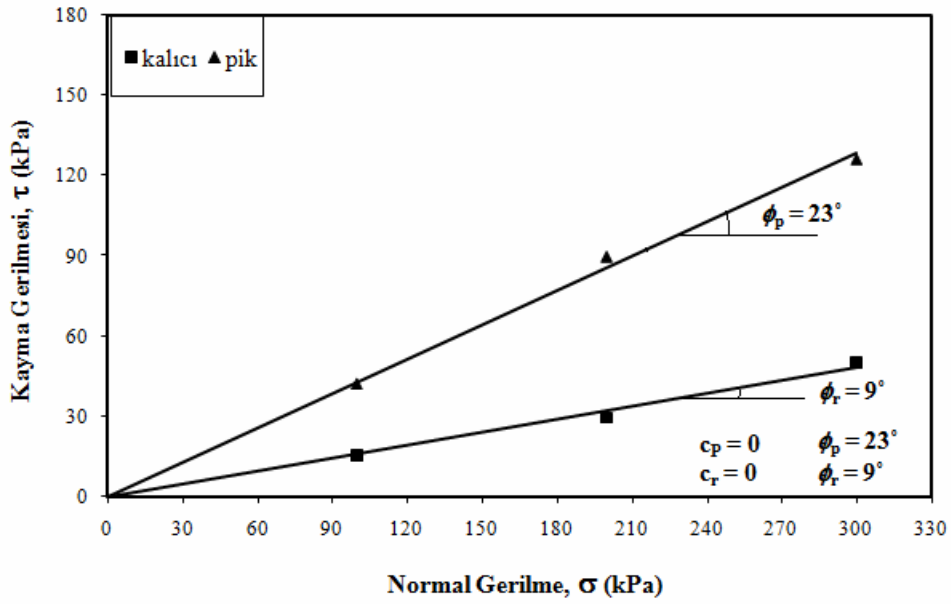
Şekil B.37 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.38 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

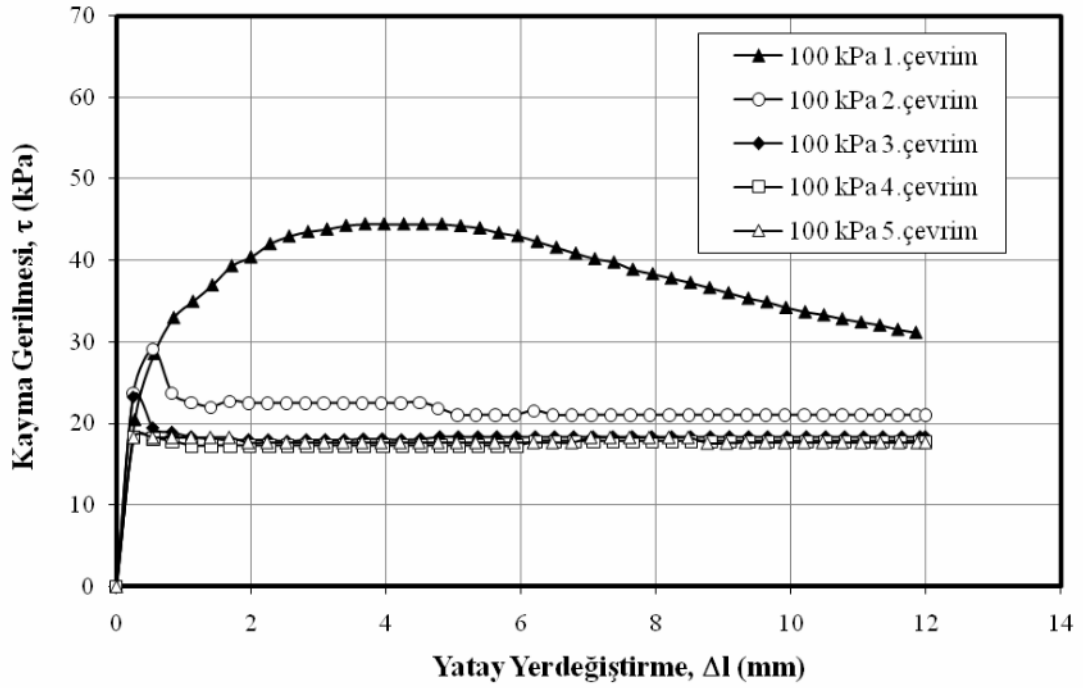


Şekil B.39 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

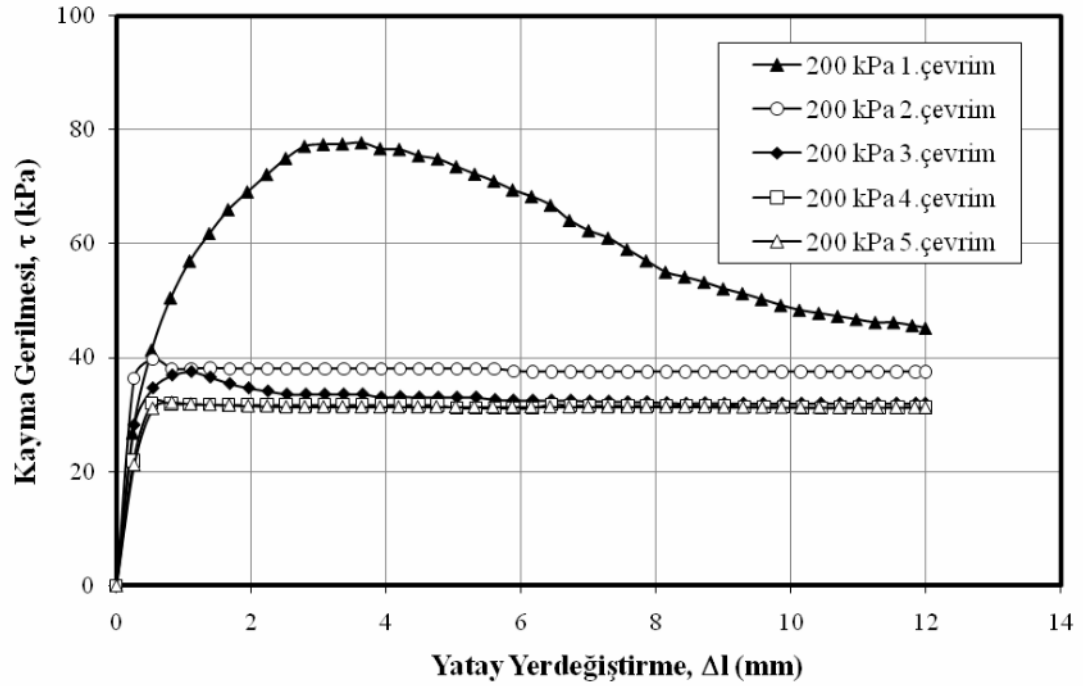


Şekil B.40 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

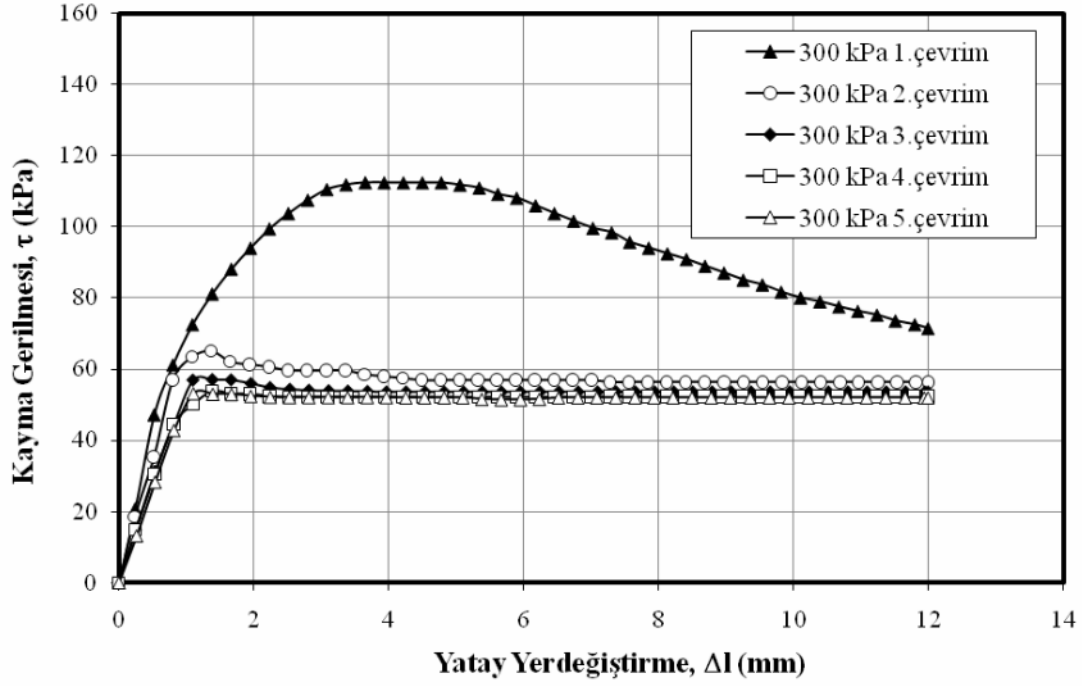
B.1.11 A-11 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



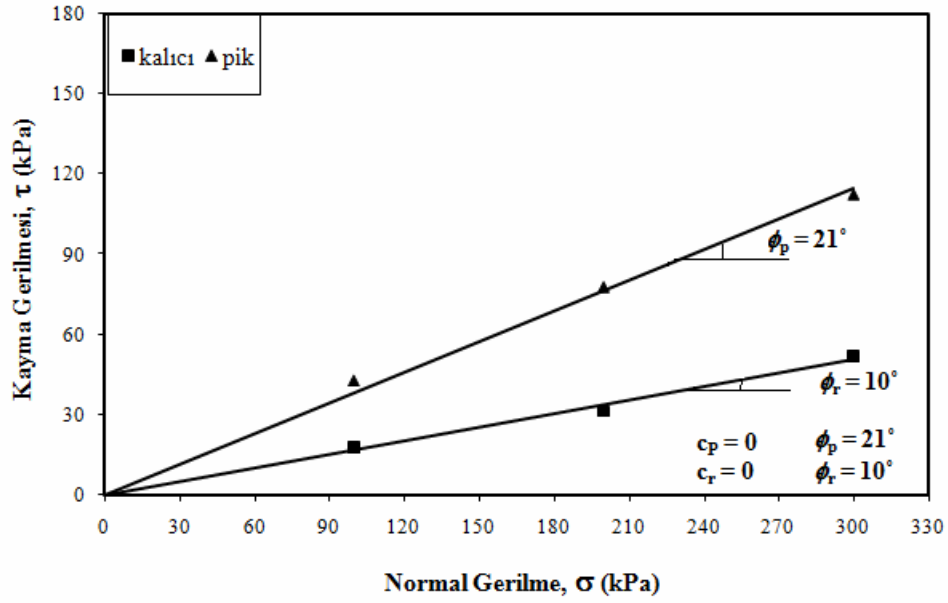
Şekil B.41 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.42 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

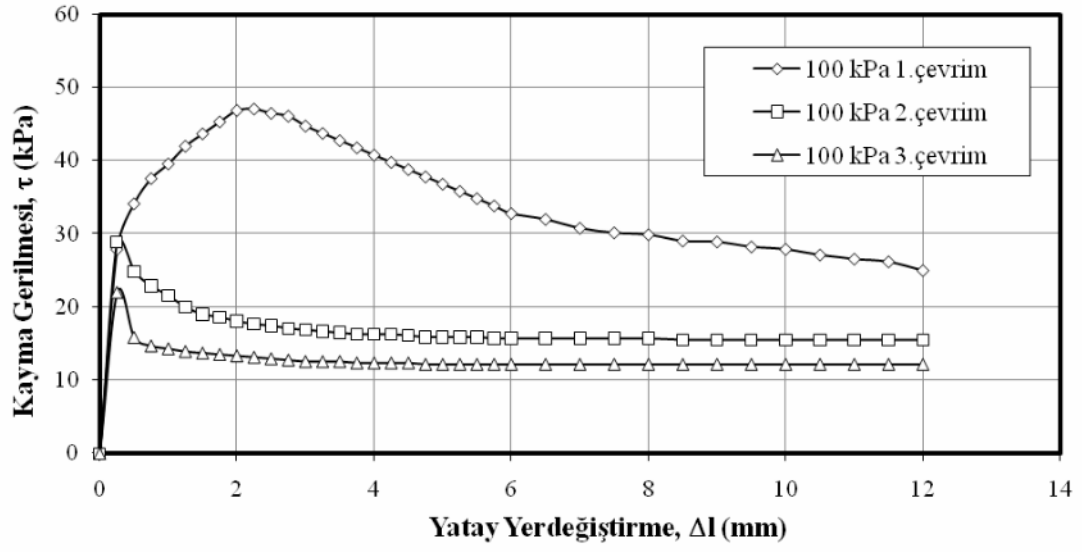


Şekil B.43 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirme ilişkisi, 300 kPa

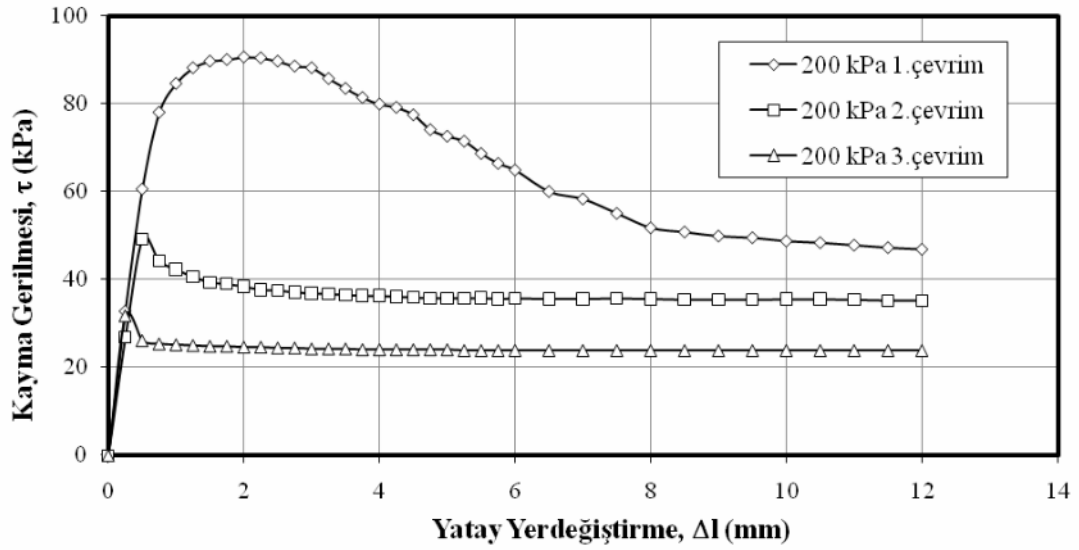


Şekil B.44 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

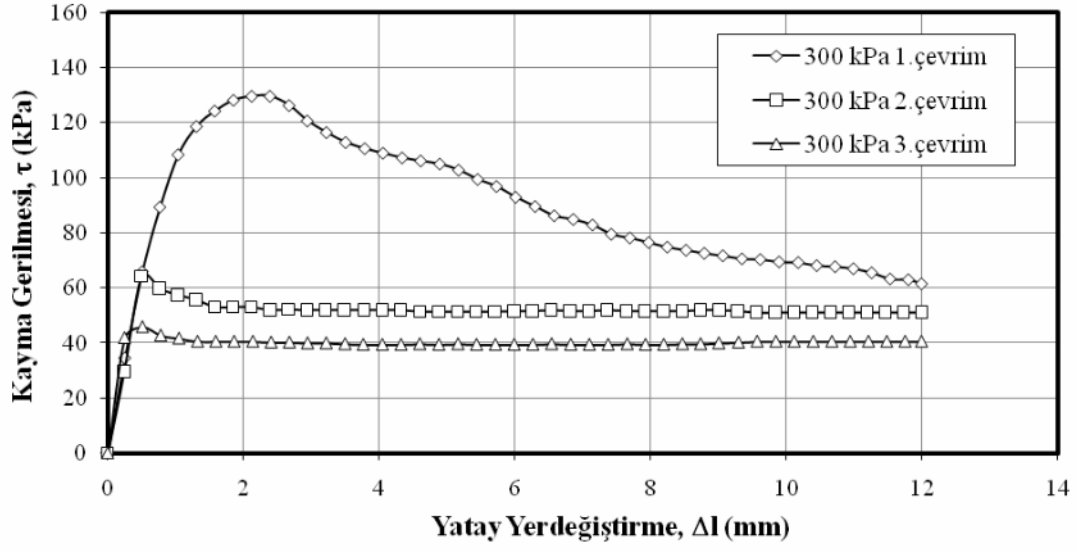
B.1.12 A-12 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



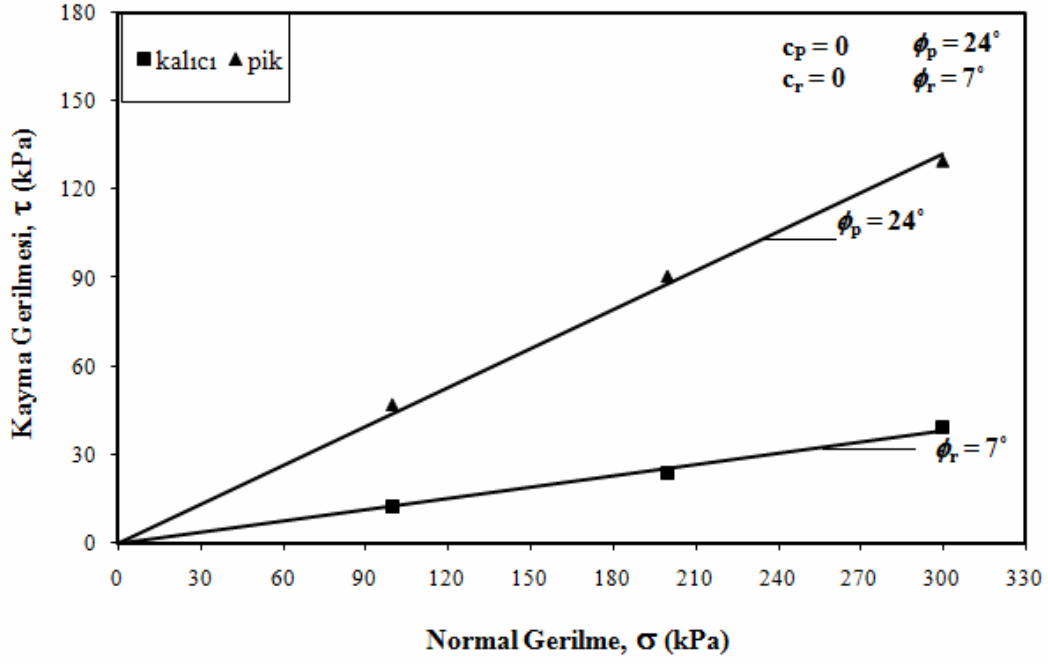
Şekil B.45 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.46 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

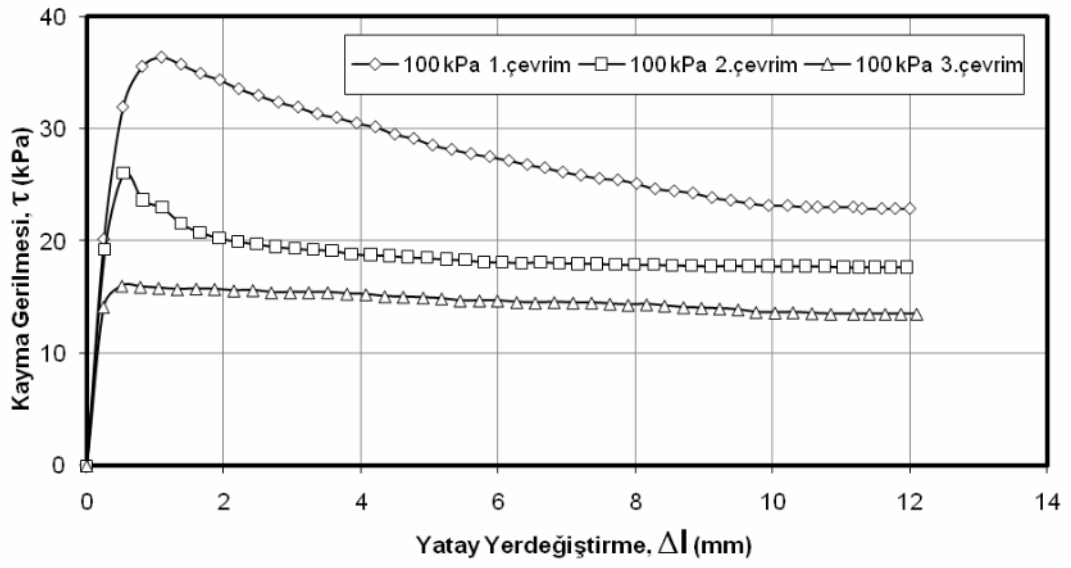


Şekil B.47 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

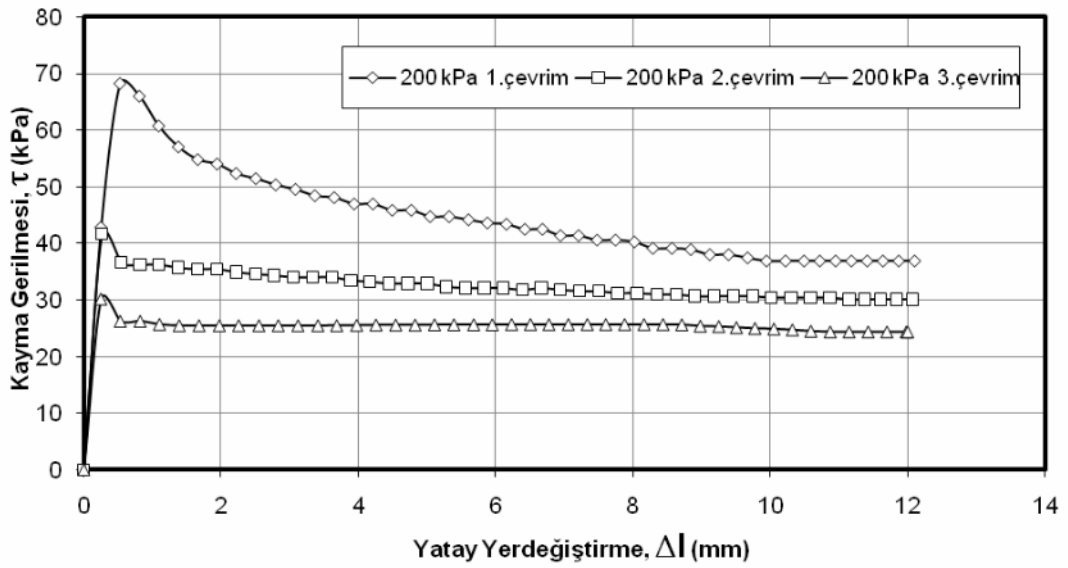


Şekil B.48 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

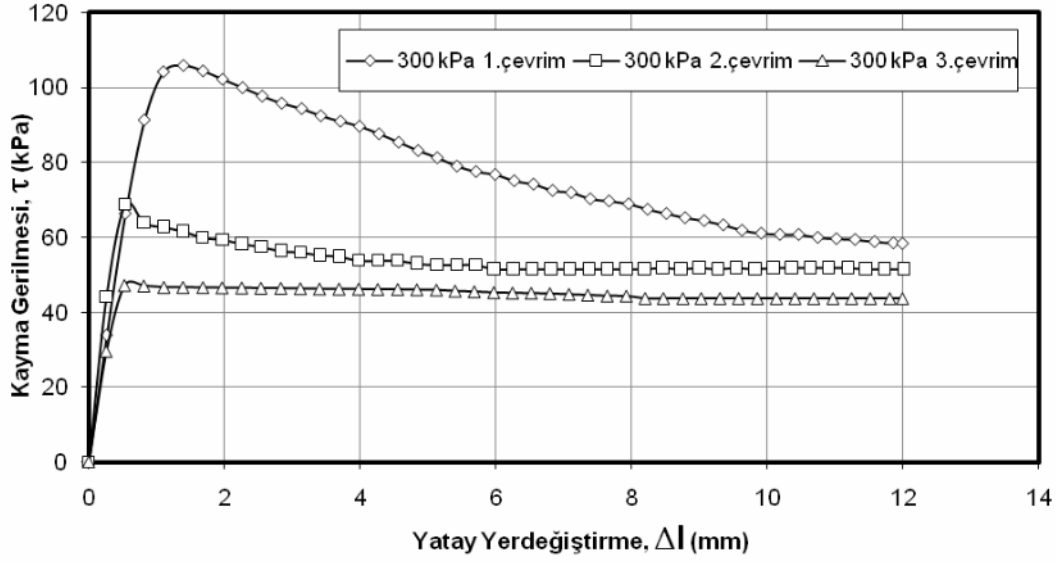
B.1.13 A-13 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



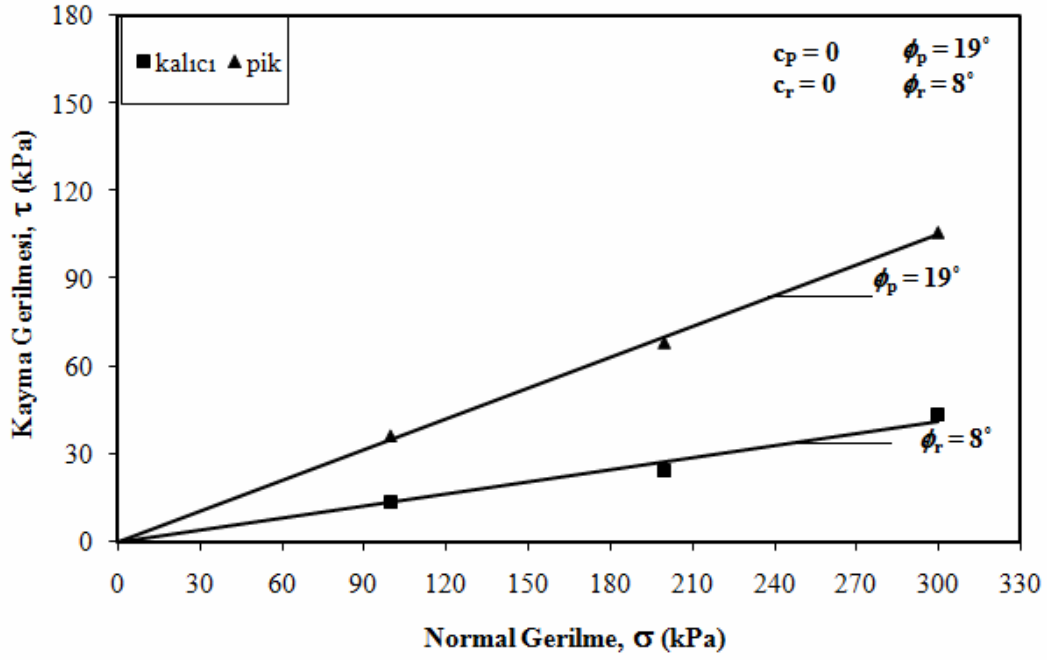
Şekil B.49 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.50 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

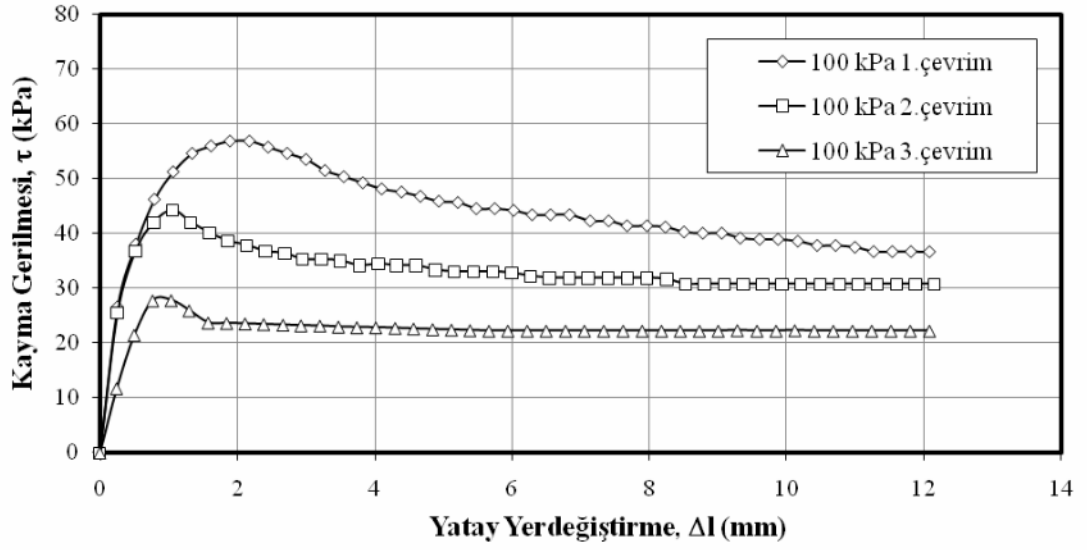


Şekil B.51 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

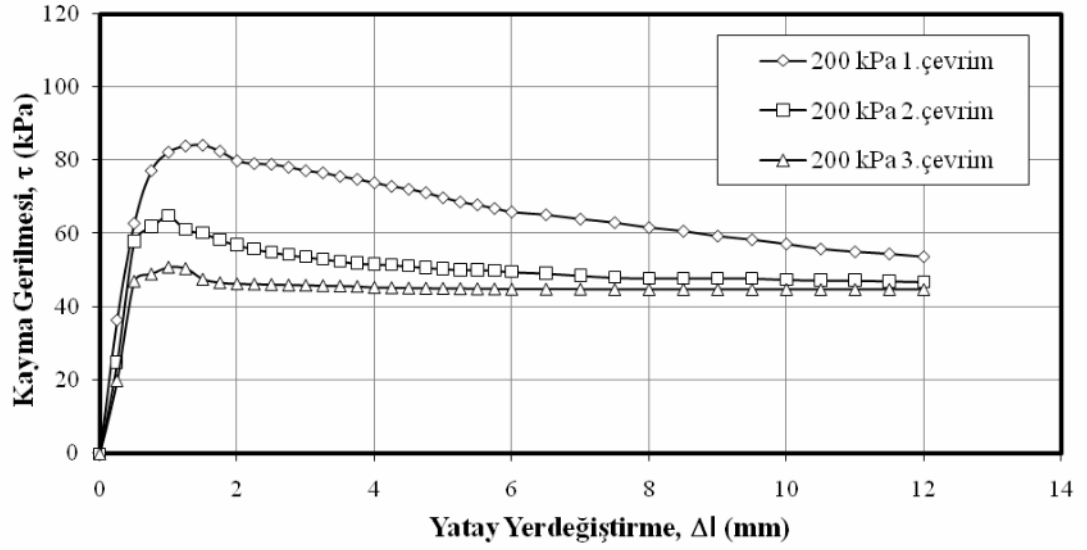


Şekil B.52 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

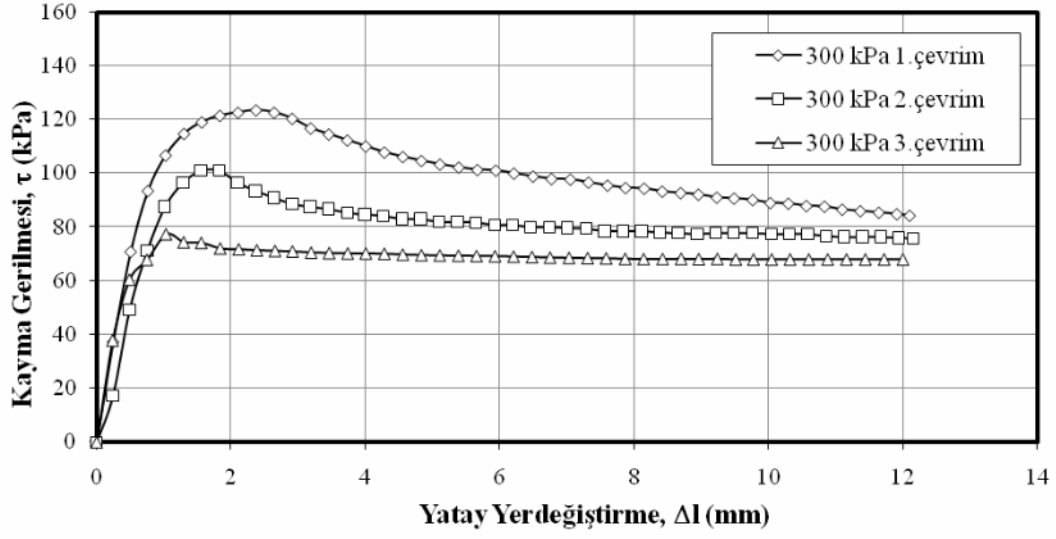
B.1.14 A-14 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



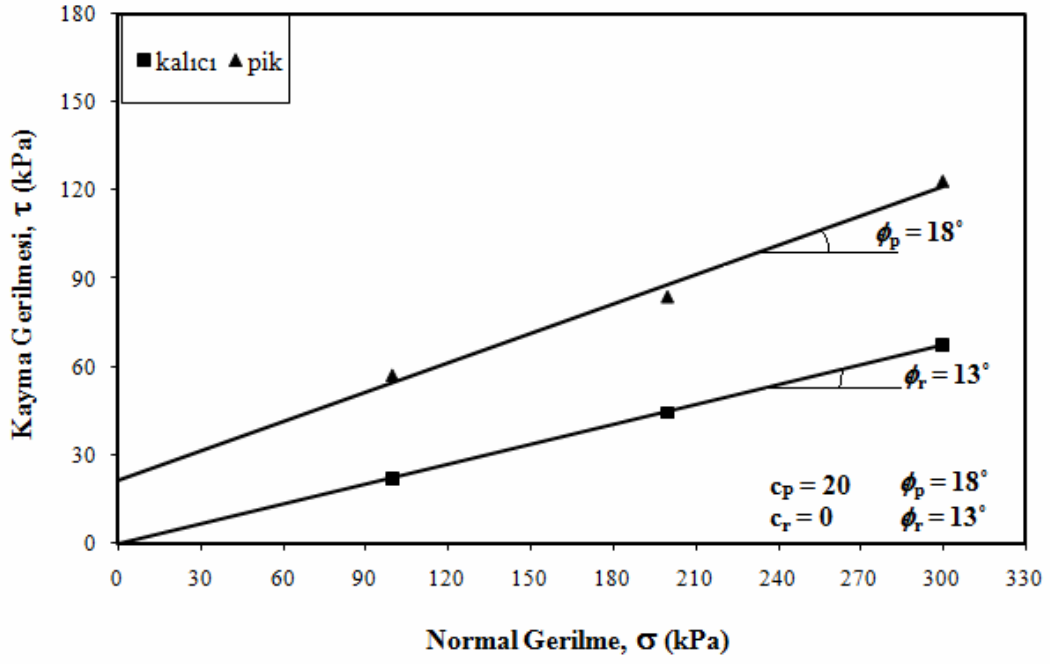
Şekil B.53 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.54 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

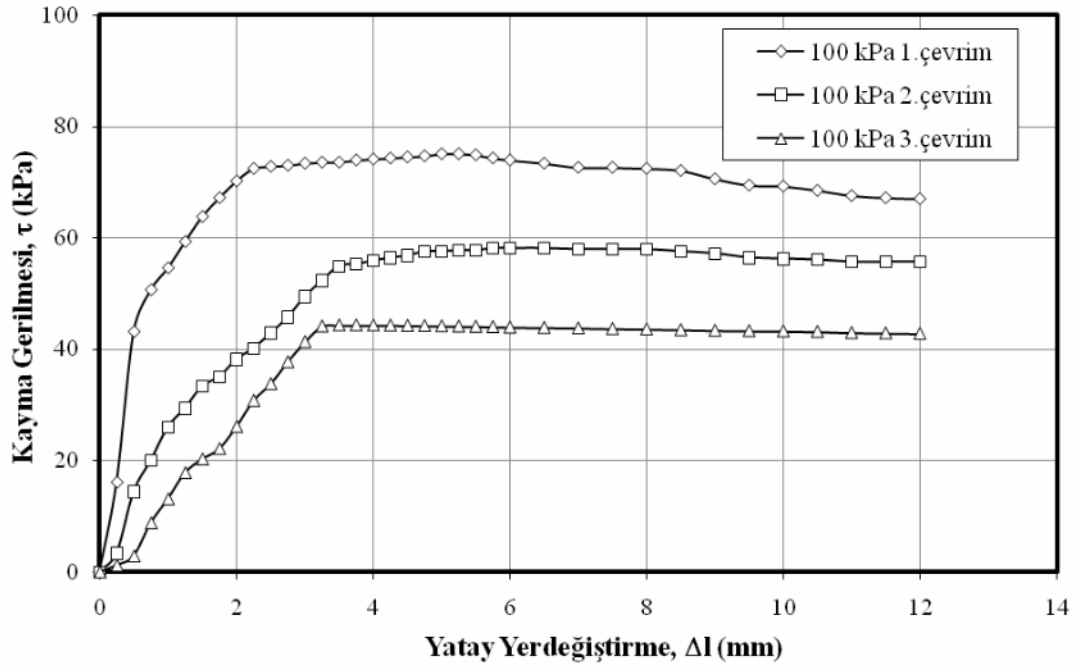


Şekil B.55 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

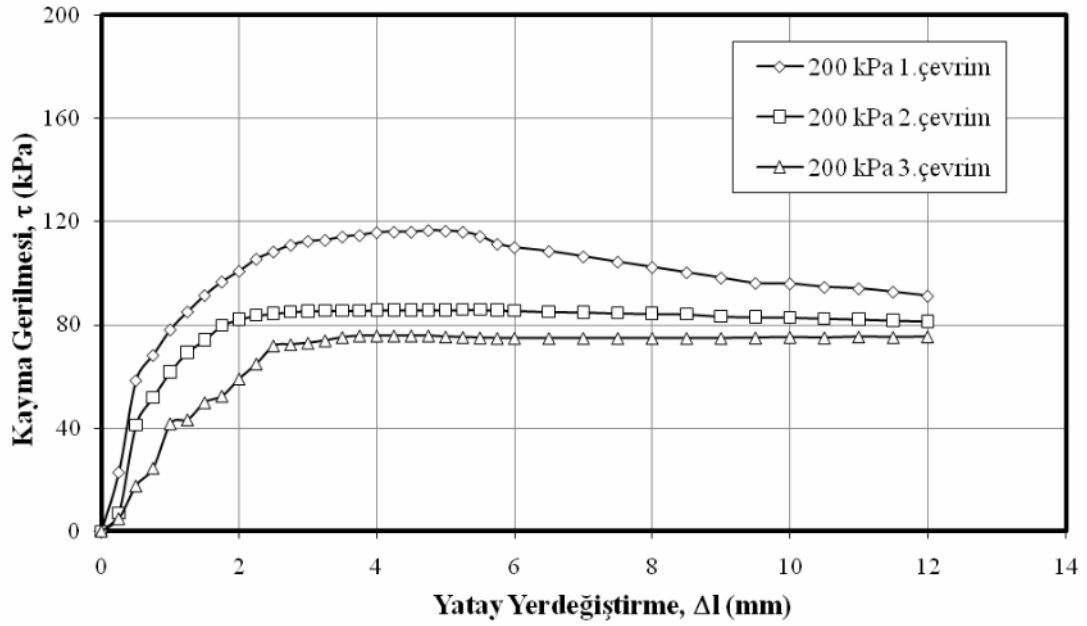


Şekil B.56 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

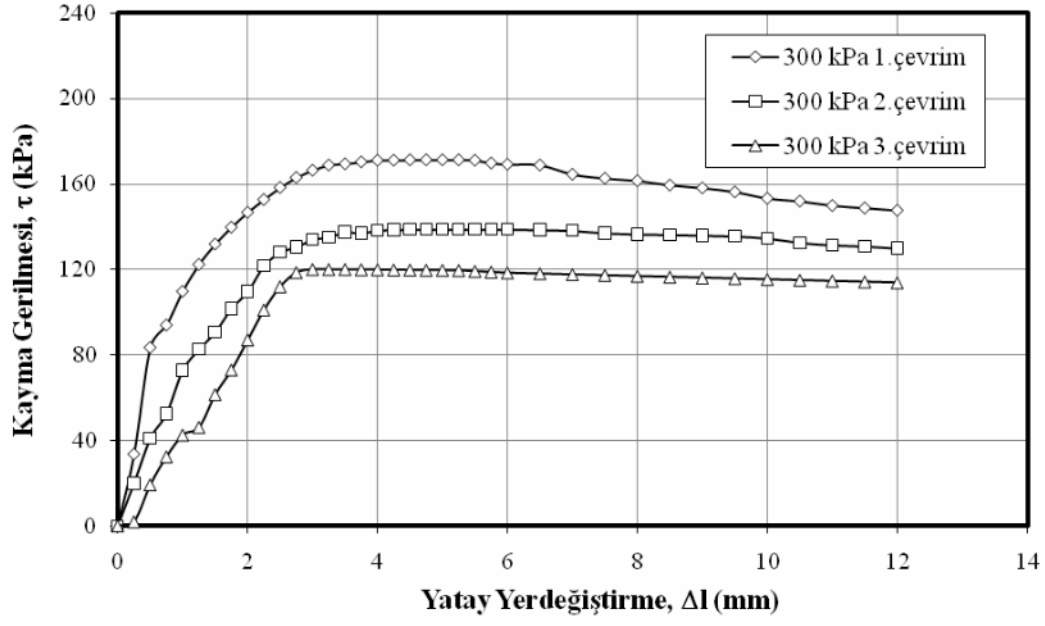
B.1.15 A-15 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



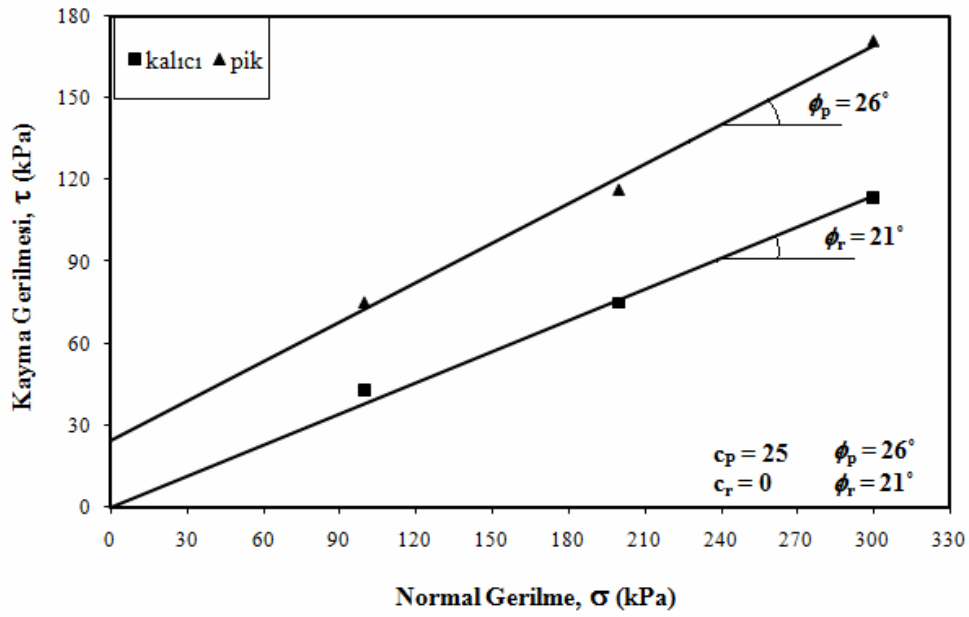
Şekil B.57 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.58 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa

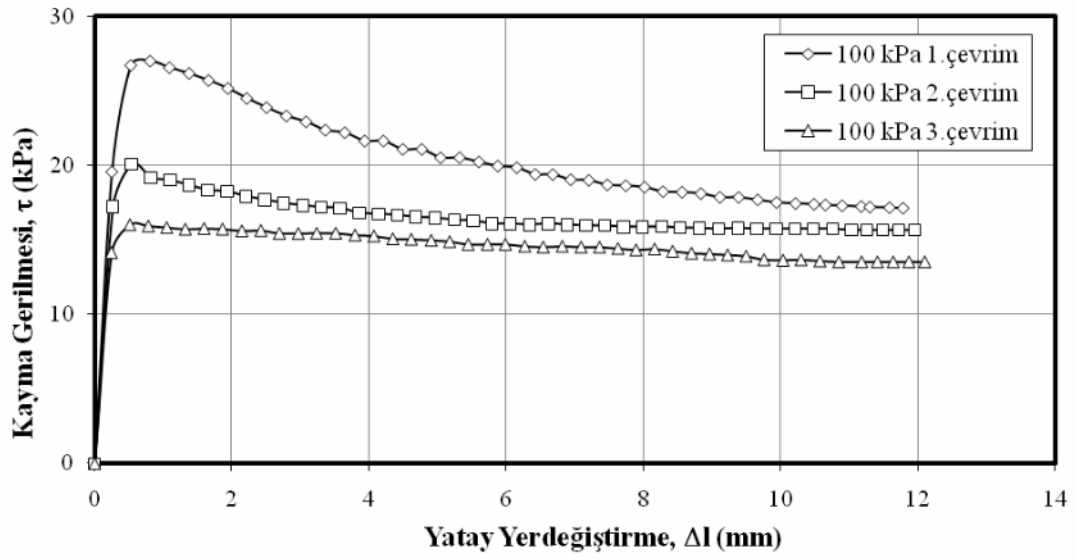


Şekil B.59 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa

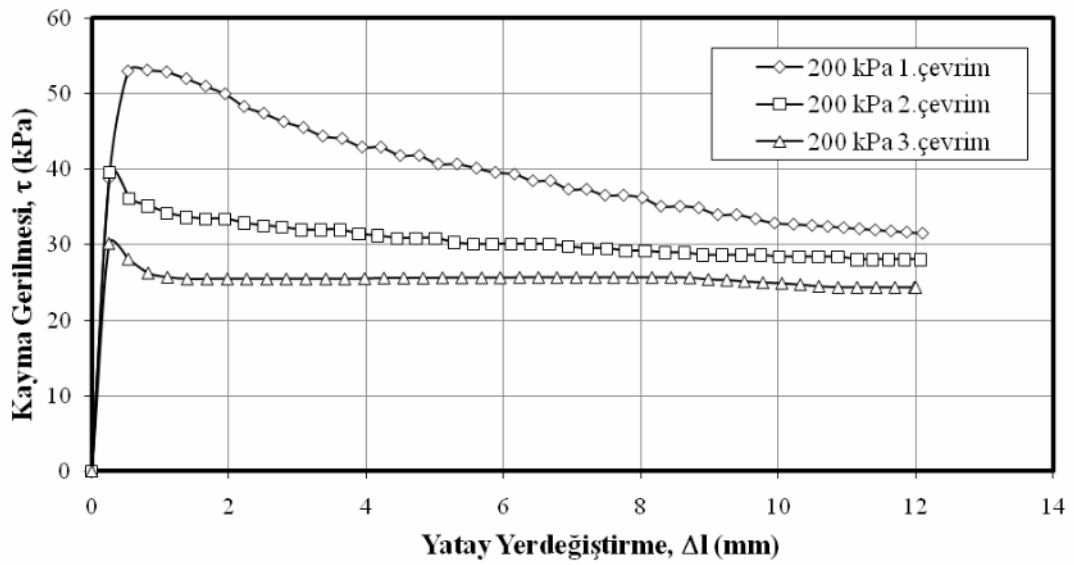


Şekil B.60 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

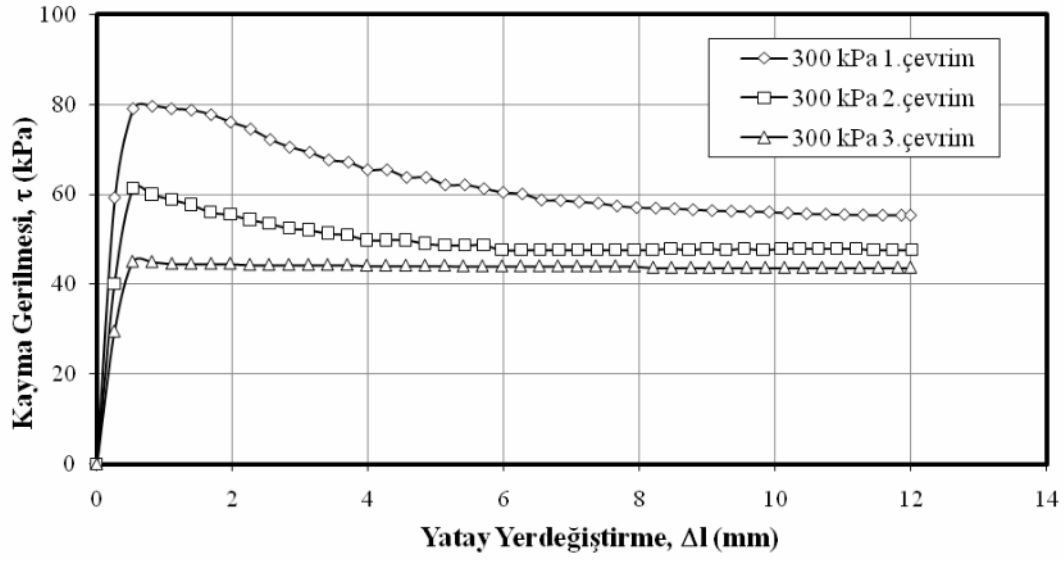
B.1.16 A-16 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



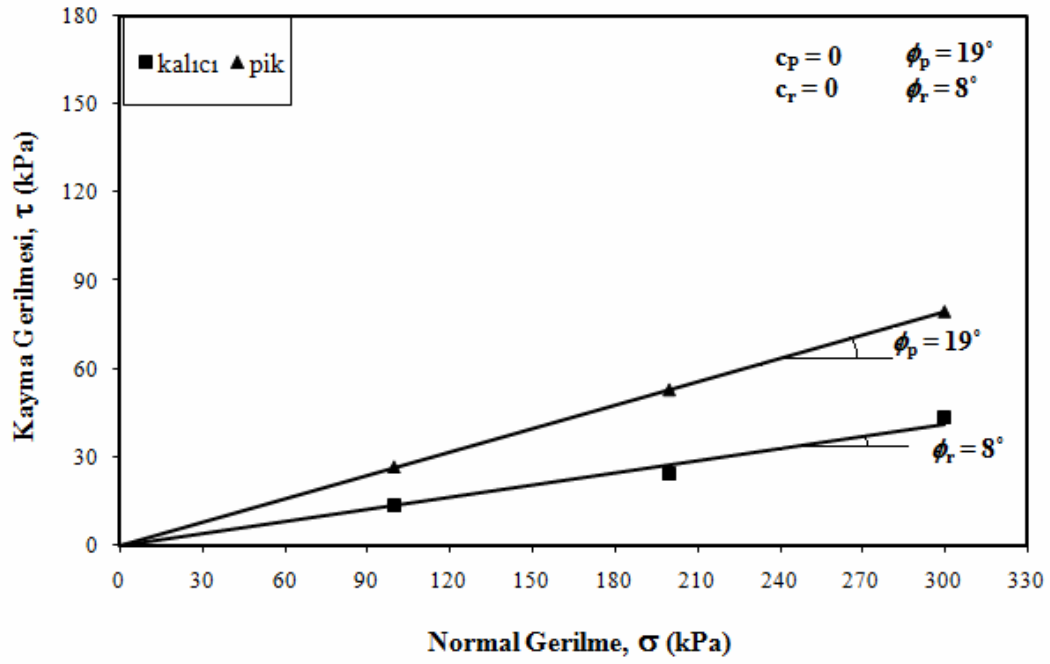
Şekil B.61 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.62 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 200 kPa



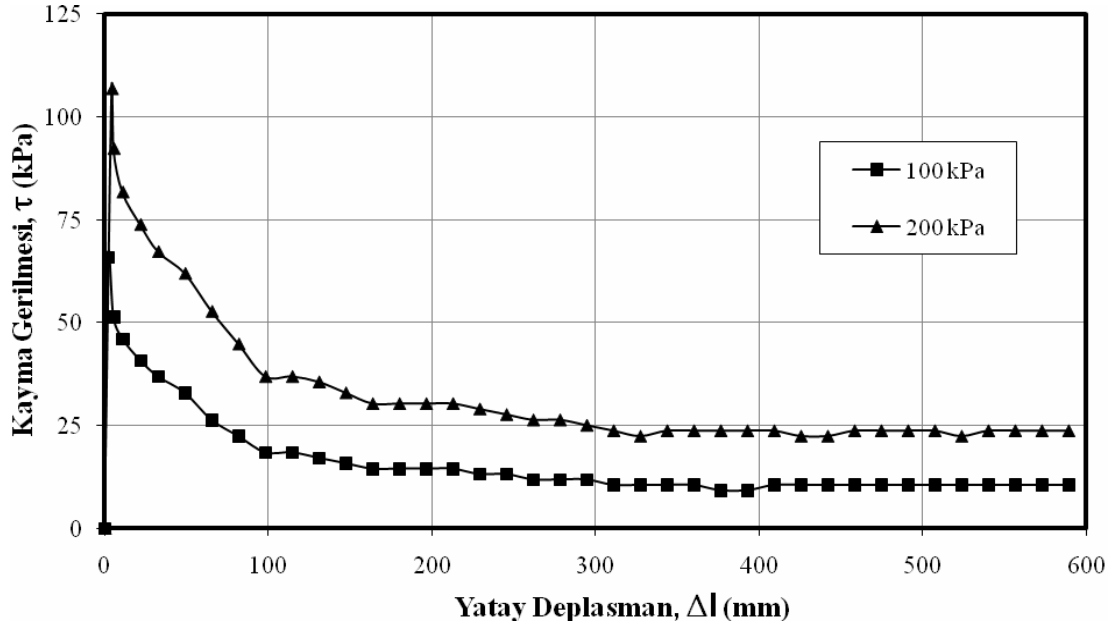
Şekil B.63 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 300 kPa



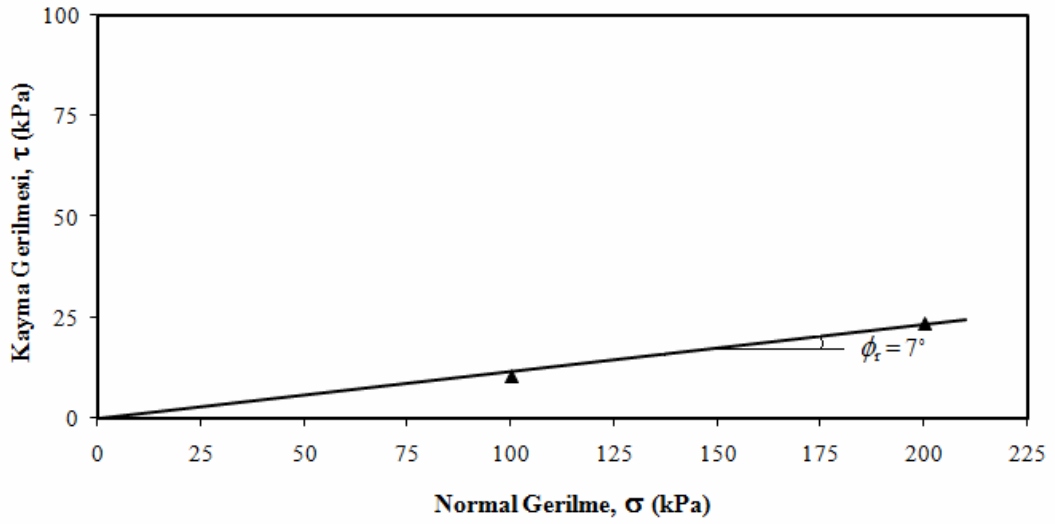
Şekil B.64 : Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.2 Halka Kesme Deneyi

B.2.1 A-14 numunesine ait halka kesme deneyi



Şekil B.65 : Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi, 100 kPa



Şekil B.66 Kalıcı göçme zarfı

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet Rüştü ÜRKMEZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Kartal/İstanbul, 10/11/1985

Adres: 19 Mayıs Cad. Akasya Sok. Arda Apartmanı 23/14, Pendik/İstanbul

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2003-2007, İstanbul.

Mezun Olduğu Lise, Ortaokul ve İlkokul: Özel Ortadoğu Yabancı Dil Ağırlıklı Süper Lisesi, 2000-2003 (Okul birinciliği ile).

Özel Ortadoğu Koleji Ortaokulu, 1996-2000 (Okul üçüncülüğü ile).

Özel Ortadoğu Koleji İlkokulu, 1991-1996.

Bilgisayar Programları: Microsoft Office (word, excel, powerpoint), Autocad, Sap2000.

Konferans ve yarışmalar: Zemin ve yapı etkileşim sempozyumu, İstanbul Üniversitesi (2007).

Tübitak matematik olimpiyatları, İstanbul (2000).

Akdeniz matematik olimpiyatları, Antalya (2000).

Stajlar: Oyak İnşaat A.Ş Zirvekent Sitesi bina inşaatı, Ankara, 2005 (2 ay).

Alarko-Garanti Koza A.Ş ortaklığı İstanbul Metrosu 4.Levent-Hacıosman arası metro inşaatı, İstanbul teknik Üniversitesi karşısı Şaft 4 Maslak/İstanbul, 2006(2 ay).

Hobiler: Tarih, araştırma, belgesel, trekking, yüzme, koşu, sinema, tiyatro, puzzle, yurtiçi geziler, futbol.