

**ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN
HALKA KESME DENEYİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Serdar KOLTUK**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

**Programı : ZEMİN MEKANİĞİ VE GEOTEKNİK
MÜHENDİSLİĞİ**

HAZİRAN 2005

**ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN
HALKA KESME DENEYİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Serdar KOLTUK
(501021278)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2005**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Recep İYİSAN
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Oğuz TAN
Yard. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan halka kesme deney sisteminin çalışır duruma getirilmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Halka kesme deneyi, zeminlerin kalıcı mukavemet parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ve sonuçlarına güvenilen deney yöntemlerinden biridir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, özellikle kohezyonlu zeminlerde numune hazırlanması bu deney yönteminde oldukça zahmetlidir. Bu çalışma kapsamında, öncelikle deney sisteminin kalibrasyonu yapılmış ve kohezyonlu zeminlerden daha kolay numune hazırlayabilmek için bir düzenek tasarlanmış, sistem deney yapılabilir duruma getirilmiştir. Daha sonra, seçilen dört farklı zeminden hazırlanan numunler kullanılarak değişik hızlarda deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmaya beni yönlendiren ve çalışmamın her aşamasında yardımını esirgemeyen Sayın Doç.Dr.Recep İYİSAN'a, ayrıca Ar.Gör.Gökhan ÇEVİKBİLEN'e, İnş.Yük.Müh.Yavuz DELİCE'ye, Zemin Mekaniği laboratuvarı çalışanlarına ve Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Mayıs 2005

Serdar KOLTUK

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİ	3
2.1 Zeminlerin Kayma Mukavemeti	3
2.2 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Geoteknik Mühendisliğindeki Önemi	8
2.3 Kalıcı Kayma Mukavemeti Mekanizması	10
2.4 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi	12
2.5 Kayma Mukavemetinin Kayma Yerdeğiştirmesi ile Değişimi	14
2.6 Kalıcı Göçme Zarfının Yapısı	15
2.7 Kalıcı Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler	18
2.7.1 Zemin yapısının etkisi	18
2.7.2 Minerolojinin etkisi	20
2.7.3 Efektif normal gerilmenin etkisi	24
2.7.4 Kesme hızının etkisi	25
2.8 Kalıcı Mukavemet Açısı ile Endeks Özellikleri Arasındaki İlişkiler	31
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	37
3.1 Halka Kesme Deney Aleti	37
3.2 Kesme Kutusu Deney Aleti	38
3.3 Deney Numunelerinin Geoteknik Özellikleri	39
3.4 Deney Numunelerinin Hazırlanışı	40
3.5 Deney Aletinin Montajı ve Deneyin Yapılışı	44
3.6 Hesaplamalar	59
4. DENEYSEL SONUÇLAR	62
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	67
6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	76
EK A : Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi	78
EK B : Halka Kesme ve Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri	102
EK C : Amplifikatör Kalibrasyonu	127
ÖZGEÇMİŞ	129

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Pik ve kalıcı kayma mukavemetlerinin elde edildikleri tipik deplasman değerleri.....	14
Tablo 2.2.	Kalıcı kayma mukavemeti parametreleri.....	15
Tablo 2.3.	Bazı kil minerallerinin ortalama kalınlık, çap ve özgül yüzey değerleri.....	22
Tablo 2.4.	Bazı kil minerallerinin, likit limit-plastik limit ve aktivitelerinin tipik değerleri.....	23
Tablo 2.5.	Geri analiz ve laboratuvar kalıcı mukavemetlerinin karşılaştırılması	26
Tablo 2.6.	Kaolin ve çamurtaşı numunelerine ait halka kesme deney sonuçları	30
Tablo 2.7.	Drenajlı kalıcı kayma mukavemeti için mevcut deneysel korelasyonların karşılaştırılması.....	35
Tablo 3.1.	N-1, N-2 ve N-3 numunelerinin geoteknik özellikleri.....	39
Tablo 3.2.	N-4 numunesinin geoteknik özellikleri.....	40
Tablo 3.3.	Amplifikatörün deney başlangıç değerleri.....	53
Tablo 4.1.	Halka kesme deney sonuçları (Kalıcı mukavemet parametresi).....	64
Tablo 4.2.	Halka kesme deney sonuçları (Pik mukavemet parametreleri).....	64
Tablo 4.3.	Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları.....	66

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: Coulomb sürtünme teorisi	4
Şekil 2.2	: Kesme kutusu deneyinden göçme zarfının elde edilişi	5
Şekil 2.3	: Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi	6
Şekil 2.4	: Üç eksenli basınç deneyinden göçme zarfının elde edilişi	7
Şekil 2.5	: Sabit efektif normal gerilmede yüksek kil yüzdeli zeminlerin kayma mukavemetleri	10
Şekil 2.6	: Sabit efektif normal gerilmede düşük kil yüzdeli zeminlerin kayma mukavemetleri	11
Şekil 2.7	: Kum-bentonit karışımlarında yapılan halka kesme deneyleri	11
Şekil 2.8	: Halka kesme deneyi	13
Şekil 2.9	: Kalıcı göçme zarfları	15
Şekil 2.10	: Killi zeminlerin drenajlı pik ve kalıcı göçme zarfları	16
Şekil 2.11	: Tamamlanmış göçme zarfı ve kalıcı göçme zarfı	17
Şekil 2.12	: Kalıcı mukavemet açısının, 50 kPa ve 700 kPa değerlerindeki normal gerilmelere karşılık gelen değerlerinin oranı	18
Şekil 2.13	: Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemetine etkisi	19
Şekil 2.14	: Dane çapı-dane şekli ilişkisi	20
Şekil 2.15	: Kaolinit ve kuvars minerallerinin elektron mikroskopu altındaki görünümleri.....	21
Şekil 2.16	: Kil minerolojisinin kalıcı mukavemete etkisi	23
Şekil 2.17	: Killerin kalıcı mukavemetlerinin yavaş kesme hızları ile değişimi	25
Şekil 2.18	: Yüksek kil yüzdeli zeminlerde, yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi	26
Şekil 2.19	: Halka kesme deneylerinden elde edilen göçme zarfları.....	27
Şekil 2.20	: Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (K.Y.= %40)....	27
Şekil 2.21	: Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (K.Y.= %21)....	28
Şekil 2.22	: 400 mm/dak değerindeki kesme hızının kalıcı mukavemete etkisi...	29
Şekil 2.23	: Çamurtaşı numunesi için, τ/σ oranı ile açısız deformasyon ve açısız hız arasındaki ilişki.....	30
Şekil 2.24	: Kaolinin farklı kesme hızlarında elde edilen kalıcı durumları için elektron mikroskopu altındaki görünümleri.....	31

Şekil 2.25	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesiyle değişimi.....	32
Şekil 2.26	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisiiyle değişimi.....	32
Şekil 2.27	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi.....	33
Şekil 2.28	: Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile w_L , K.Y. ve σ' arasındaki ilişki..	34
Şekil 2.29	: Kalıcı kayma mukavemeti açısının ΔPI ile değişimi.....	36
Şekil 3.1	: Halka kesme deney aleti.....	38
Şekil 3.2	: Numunenin kalıptan çıkarılması ve dış ringe alınması.....	41
Şekil 3.3	: Numunenin gerçek yüksekliğine getirilmesi.....	42
Şekil 3.4	: Numunenin halka şekline getirilmesi.....	43
Şekil 3.5	: Numunenin deneye hazır durumu.....	43
Şekil 3.6	: En üst dış ve kılavuz ringlerin montajı.....	44
Şekil 3.7	: İç ringin montajı.....	44
Şekil 3.8	: Halka kesme deney aletine numunenin yerleştirilmesi.....	45
Şekil 3.9	: En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının montajı.....	46
Şekil 3.10	: En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının montajı.....	46
Şekil 3.11	: Mavi renkli pimlerin çıkarılması.....	46
Şekil 3.12	: Basınç plakasının montajı.....	47
Şekil 3.13	: Somunların basınç plakasına sabitlenmesi.....	47
Şekil 3.14	: Dengeleme basıncının uygulanması.....	48
Şekil 3.15	: Düşey yük uygulama şaftının yerleştirilmesi.....	48
Şekil 3.16	: Su yatağının yerleştirilmesi.....	49
Şekil 3.17	: Tork kolunun yerleştirilmesi.....	49
Şekil 3.18	: Ring çekme metalinin yerleştirilmesi.....	50
Şekil 3.19	: Sürtünme yük alıcısının montajı.....	50
Şekil 3.20	: Beyaz renkli vidaların çıkarılması.....	51
Şekil 3.21	: Somunların gevşetilmesi.....	51
Şekil 3.22	: Sarı ve kırmızı renkli vidaların çıkarılması.....	52
Şekil 3.23	: Sarı renkli ringin aşağı indirilmesi.....	52
Şekil 3.24	: Deformasyon saati ve ringler arası açıklık saatinin yerleştirilmesi...	53
Şekil 3.25	: Amplifikatör.....	54
Şekil 3.26	: Normal gerilmenin uygulanması.....	55
Şekil 3.27	: Ringler arasında açıklığın bırakılması.....	56
Şekil 3.28	: Hız kontrol kutusu.....	57

Şekil 3.29	: Deney sonrasında kesilmiş numunenin görünümü.....	58
Şekil 4.1	: N-1 numunesine ait halka kesme deney sonucu ($V=50$ mm/dak).....	63
Şekil 4.2	: N-1 numunesine ait göçme zarfları ($V=50$ mm/dak).....	63
Şekil 4.3	: N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (1.çevrim).....	65
Şekil 4.4	: N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (2.çevrim).....	65
Şekil 4.5	: N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (3.çevrim).....	66
Şekil 4.6	: N-1 numunesine ait göçme zarfları ($V=0.035$ mm/dak).....	66
Şekil 5.1	: N-1 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi.....	67
Şekil 5.2	: N-2 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi.....	67
Şekil 5.3	: N-3 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi.....	68
Şekil 5.4	: N-4 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi.....	68
Şekil 5.5	: Düşey deformasyonun kayma yerdeğiştirmesi ile değişimi.....	69
Şekil 5.6	: Kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi.....	70
Şekil 5.7	: Kil yüzdesi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi.....	70
Şekil 5.8	: Plastisite indisi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi...	71
Şekil 5.9	: Aktivite ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi.....	71
Şekil 5.10	: Likit limitin kalıcı mukavemet açısına etkisi.....	72
Şekil 5.11	: Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	73

SEMBOL LİSTESİ

A_c	: Aktivite
a_v	: Sıkışma katsayısı
AKO	: Aşırı konsolidasyon oranı
C_c	: Sıkışma indisi
C_s	: Şişme indisi
c_p	: Pik kohezyon mukavemeti
c_p'	: Efektif pik kohezyon mukavemeti
c_r	: Kalıcı kohezyon mukavemeti
c_r'	: Efektif kalıcı kohezyon mukavemeti
c_v	: Konsolidasyon katsayısı
e	: Boşluk oranı
D	: Çap
D_r	: Relatif sıklık
G_s	: Dane özgül ağırlığı
H	: Yükseklik
k	: Geçirimsizlik (Permeabilite) katsayısı
K.Y.	: Kil yüzdesi (0.002 mm den küçük çaplı danelerin yüzdesi)
m_v	: Hacimsel sıkışma katsayısı
I_p	: Plastisite indisi
R_h	: Hidrometre okuması
S	: Düşey deformasyon
T	: Kesme kuvveti
T_v	: Zaman faktörü
t	: Zaman
U	: Konsolidasyon yüzdesi
V	: Kesme hızı
w	: Su muhtevası
$w_{opt.}$	: Optimum su muhtevası
w_L	: Likit limit
w_P	: Plastik limit

W	: Ağırlık
Δl	: Kayma yerdeğiştirmesi
γ	: Birim hacim ağırlık
γ_k	: Kuru birim hacim ağırlık
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
σ_c	: Ön konsolidasyon basıncı
σ	: Normal gerilme
σ'	: Efektif normal gerilme
ϕ_p	: Pik kayma mukavemeti açısı
ϕ_p'	: Efektif pik kayma mukavemeti açısı
ϕ_r	: Kalıcı kayma mukavemeti açısı
ϕ_r'	: Efektif kalıcı kayma mukavemeti açısı
τ	: Kayma mukavemeti
τ_p	: Pik kayma mukavemeti
τ_r	: Kalıcı kayma mukavemeti

ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN HALKA KESME DENEYİ İLE BELİRLENMESİ

ÖZET

Zeminlerde, deformasyonla değişmeyen ve sabit olarak kalan en küçük kayma gerilmesinin değerine kalıcı mukavemet adı verilmektedir. Belirli bir deney türü için; minerolojik yapı, efektif normal gerilme seviyesi ve kesme hızı zeminlerin kalıcı mukavemetlerini etkileyen başlıca faktörlerdir. Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede en yaygın olarak kullanılan deney yöntemleridir. Halka kesme deneyi, tek yönde büyük kayma yerdeğiştirmelerine izin vermesi ve genellikle kohezyonlu zeminlerde görülen dairesel şev kaymalarını modellemesi açısından, tekrarlı kesme kutusu deneyinden daha güvenilirdir. Bu çalışmada, zeminlerin kalıcı mukavemet parametrelerini belirlemek için plastisite indisleri ve kil yüzdeleri farklı, standart Proctor sıkılığında hazırlanmış numunler üzerinde üç değişik normal gerilme altında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Deneyler beş farklı kesme hızında tekrarlanarak kesme hızının kalıcı mukavemete etkisi incelenmiştir. Aynı numunler üzerinde ve aynı gerilmeler altında tekrarlı kesme kutusu deneyleri de yapılmış ve elde edilen sonuçlar halka kesme deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, halka kesme deneyleri ile bulunan kalıcı mukavemet açısının artan hız ile birlikte azaldığı, kil yüzdesinin veya plastisite indisinin kalıcı mukavemet açısı üzerinde kesme hızından daha etkili olduğu ve tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı mukavemet açısının halka kesme deneyinden bulunan değerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

DETERMINATION OF RESIDUAL SHEAR STRENGTH OF SOILS BY THE RING SHEAR TEST

SUMMARY

Residual strength of soils is the minimum and constant value of shear strength attained at large shear displacements. Mineralogy, effective normal stress and shear displacement rate are the main factors affecting residual strength for a given test type. Ring shear test and reversal direct shear test are widely used methods to determine the residual strength parameters. The ring shear test is more reliable than the shear box because of its suitability for large displacement conditions and analogy of its shearing mechanism to rotational landslide movement. In this study, ring shear tests were carried out on soil samples having different clay fractions and plasticity indexes to determine the residual strength parameters. Soil samples were prepared in standard Proctor density and tests were performed under three different vertical stresses. The tests were conducted five different shearing rates in order to investigate the displacement rate effect on residual strength. Additionally, reversal direct shear tests were performed on identical samples under same vertical stresses and the results obtained from these tests were compared with the ring shear test results. The ring shear test results show that residual friction angle decreases with increasing shearing rate and that clay fraction or plasticity index has a greater influence on residual strength than the shearing rate. It has also been observed that the residual friction angle obtained by reversal shear box test is greater than the one obtained by ring shear test.

1. GİRİŞ

Zemine uygulanan yüklerin, derinlik boyunca zemin tabakaları içerisinde gerek kayma gerilmelerinde gerekse düşey ve yatay düzlemlere etkiyen normal gerilmelerde artışlara neden olduğu bilinmektedir. Bu gerilme artışlarının, zemin tabakalarında şekil değişikliklerine neden olacağı açıktır. Ortaya çıkan ek gerilmeler sonucu kayma gerilmelerinin, zeminin kayma mukavemetini aşması veya kayma şekil değiştirmelerinin aşırı düzeylere ulaşması durumunda zeminde göçme meydana geldiği kabul edilmektedir.

Temellerin taşıma gücü, şevlerin stabilitesi, istinat duvarlarına gelen yanal toprak basınçlarının hesabı gibi bütün stabilite problemlerinde, olası bir göçme yüzeyi boyunca göçmeye yol açan kuvvetler ile göçmeye karşı koyan kuvvetlerin karşılaştırmasını yapmak ve göçmeye karşı bir güvenlik sayısı hesap etmek gerekmektedir. Burada göçmeye karşı koyan kuvveti, olası göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma mukavemeti oluşturmaktadır.

Zeminlerin kayma gerilmesi-kayma deformasyonu ilişkileri incelendiğinde, aşırı konsolide killerde veya sıkı kumlarda, artan deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin önce bir pik yaptığı daha sonra azalarak artık deformasyonla değişmeyen sabit bir değer aldığı görülür. Kayma gerilmesinin bu sabit değerine zeminin kalıcı (residual) mukavemeti adı verilmektedir. Normal konsolide veya gevşek kumlarda ise, gerilme deformasyon ilişkilerinde belirgin bir pik mukavemet görülmemesine karşılık, artan deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin yönlendiği değer yine kalıcı kayma mukavemeti olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993).

Kalıcı kayma mukavemeti, büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan (bazen metreye varan hareket gerekebilir), önceden büyük kayma hareketlerinin yaşanmış olduğu göçme yüzeyleri içeren şevlerin stabilitesi ve fisürlü kil şevlerde görülen mukavemetin zamanla azalması sonucu oluşan ani göçme (progressive failure) gibi problemlerde kullanılmaktadır (Mitchell, 1993).

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan en yaygın laboratuvar deney yöntemleri; kesme kutusu ve halka (ring) kesme deneyleridir. Halka kesme deney aleti, deney numunesinde büyük deformasyonlar yapmaya izin verecek şekilde geliştirilmiştir. Halka kesme deney aletinin bu özelliği nedeniyle, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi, kesme kutusu deneyine göre daha kolay ve daha hızlı olmaktadır. Ayrıca, kohezyonlu zeminlerin oluşturduğu şevlerde görülen dairesel kaymayı modellemesi açısından, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılan en güvenilir deney yöntemi olduğu belirtilmektedir (Bishop, 1971).

Belirli bir deney türü için, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini etkileyen başlıca faktörler; zeminin minerolojik yapısı, etkisinde kaldığı efektif normal gerilme seviyesi ve kesme hızıdır (Mitchell, 1993).

Bu çalışmada; zeminlerin kalıcı mukavemet parametrelerini belirlemek amacıyla halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Halka kesme deneyleri, standart kompaksiyon sıklığında hazırlanmış, farklı kil yüzdesine ve plastisite indisine sahip numuneler üzerinde, 25-50-100-200 ve 400 mm/dak değerlerindeki kesme hızlarında yapılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri ise 0.035 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılmıştır. Tüm deneylerde kullanılan numuneler; 200, 300 ve 400 kPa değerindeki düşey gerilmeler altında iki gün süre ile su altında konsolidasyona bırakılmışlardır. Ayrıca, %50 relatif sıklıkta hazırlanan kum numunesi üzerinde ise 25, 100 ve 400 mm/dak kesme hızlarında ve 200, 300 ve 400 kPa düşey gerilmeler altında halka kesme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Halka kesme deneylerinde, yüksek kesme hızlarından dolayı oluşan boşluk suyu basınçlarındaki değişimi ölçme olanağı bulunmadığından, toplam gerilmelere göre çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, zeminlerin kalıcı mukavemeti hakkında genel bilgiler verilmiş ve konu üzerinde daha önce yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, bu çalışmada kullanılan deney yöntemleri ve deneylerde kullanılan numuneler hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde yapılan deneylerin sonuçları, beşinci bölümde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve son bölümde ise genel sonuçlar yer almaktadır.

2. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA MUKAVEMETİ

Bu bölümde; zeminlerin kayma mukavemeti, kalıcı kayma mukavemetinin geoteknik mühendisliğindeki önemi, kalıcı kayma mukavemeti mekanizması, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan laboratuvar deneyleri, kayma mukavemetinin kayma deformasyonu ile değişimi, kalıcı göçme zarfının yapısı, kalıcı kayma mukavemetini etkileyen faktörler ve kalıcı kayma mukavemeti ile endeks özellikleri arasında kurulan ilişkiler anlatılmıştır.

2.1 Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Zeminlerin kayma mukavemeti, Coulomb sürtünme yasasına dayanmaktadır. Şekil 2.1’den görüldüğü gibi, iki blok birbirleri üzerinden gittikçe artan bir H kuvvetiyle kaydırılmak istendiğinde, hareket ancak H kuvvetinin bloklar arasındaki sürtünme kuvvetini yenmesi ile oluşacaktır (Bardet, 1997).

$$H=T \quad (2.1)$$

Artan W değerlerinde bu işlem tekrarlandığında, blokları kaydırmak için gerekli olan H yatay kuvveti de doğrusal olarak gittikçe artacaktır.

$$H = \mu W \quad (2.2)$$

Bu ifadedeki μ , sürtünme katsayısı olup blokların yüzey özelliklerine bağlıdır. Değeri ise;

$$\mu = \tan\phi \quad (2.3)$$

ifadesi ile belirlenir. Dolayısıyla yatay kuvvet ile düşey kuvvet arasındaki ilişki;

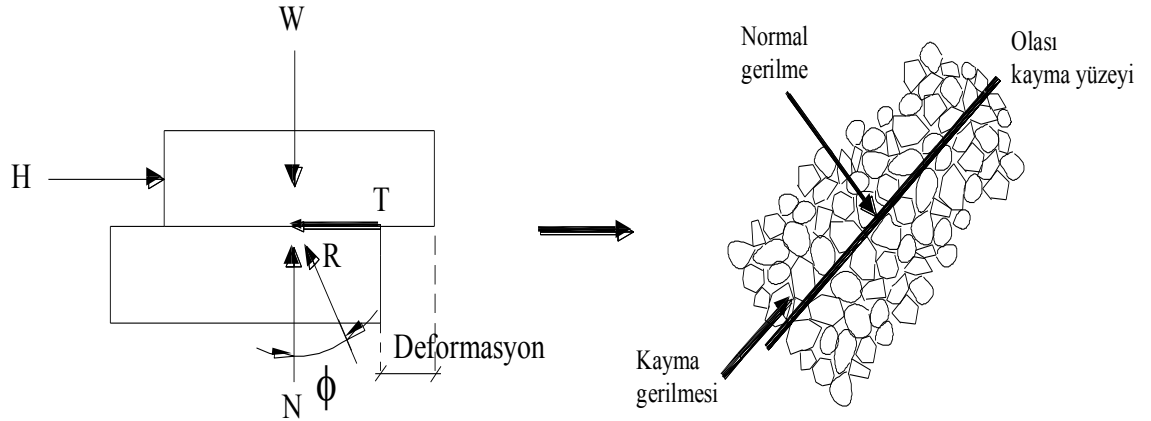
$$H = W \tan\phi \quad (2.4)$$

şeklinde olmaktadır. Burada ϕ bloklar arasındaki sürtünme açısıdır.

Görüldüğü gibi sürtünme kuvveti dokunan yüzeylerin alanlarından bağımsızdır. Bu eşitlikteki ifadeler gerilme cinsinden yazılacak olursa,

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (2.5)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemdeki kayma gerilmesi, $\tau=H/A$ ve normal gerilme, $\sigma=W/A$ değerindedir (A, blokların temas eden yüzey alanıdır).

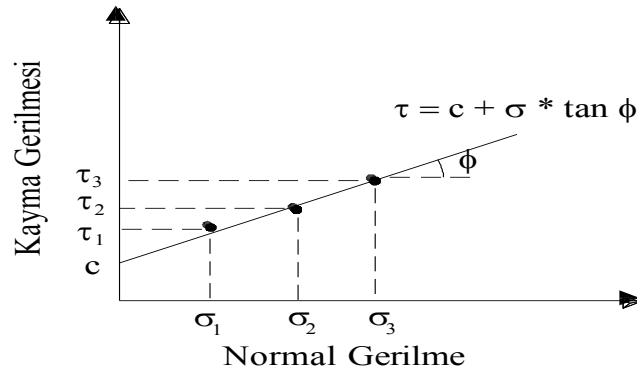


Şekil 2.1 Coulomb sürtünme teorisi (Bardet, 1997)

Coulomb sürtünme yasasının zeminlere uygulanmasında, zeminin kayma mukavemetinin en genel halde, normal gerilmeden bağımsız bir bileşeni (c) ve bir de normal gerilmeye bağlı bir bileşeni ($\sigma \tan \phi$) olduğu görülmüştür (Şekil 2.2). Kohezyon olarak isimlendirilen c ve kayma mukavemeti açısı olarak bilinen ϕ değerleri, kayma mukavemeti parametreleri olarak adlandırılırlar. Bu parametreler, belirli bir zemin için sabit olmayıp, deney sırasında hakim olan yükleme ve drenaj şartlarına göre değişirler. Zeminin dane yüzeylerinin bir düzlem olmadığı ve zeminin boşluklu bir yapı olduğu, ayrıca danelerin birbirlerinin hareketine engel olacak şekil ve konumda bulunmaları (kilitlenme etkisi) ϕ değerine sürtünmeden başka anlamlarda yüklemektedir. Bu nedenle zeminlerde, sürtünme açısı yerine “kayma mukavemeti açısı” ifadesini kullanmak daha doğru olmaktadır (Mitchell, 1993).

Zeminlerin kayma mukavemetlerini laboratuvarında belirlemede kullanılan başlıca deney yöntemleri; kesme kutusu, serbest basınç ve üç eksenli basınç deneyleridir.

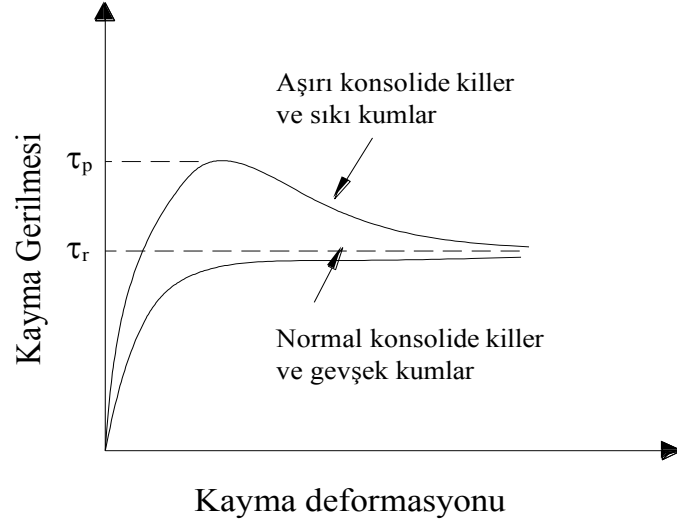
Bunlar içerisinde en eski yöntem, doğrudan kesme kutusu deneyidir. Sabit düşey yük altında konsolide edilen numune, sabit bir kesme deformasyonu hızı ile ortasından geçen düzlem boyunca kesilmeye zorlanır. Farklı düşey yükler altında bu işlem tekrarlanarak zeminin göçme zarfı elde edilir (Şekil 2.2). Kesme hızı, zeminin arazideki drenaj şartlarına göre seçilir. Kum ve çakıl gibi iri daneli zeminler, yüksek geçirimsizliğe sahip olduklarından, deprem yükleri gibi özel durumlar hariç, uygulamalarda drenajın sağlanarak boşluk suyu basınçlarının sönmüneceği varsayılır. Kil ve silt gibi düşük permeabiliteli zeminlerde ise, uzun süreli stabilite analizlerinde drenajın sağlanacağı varsayılarak efektif gerilmelerle (drenajlı kayma mukavemeti) çalışılmalı, kısa süreli stabilite analizlerinde ise toplam gerilmelere (drenajsız kayma mukavemeti) göre çalışılmalıdır (Mitchell,1993).



Şekil 2.2 Kesme kutusu deneyinden göçme zarfının elde edilişi

Peki, gerilme-deformasyon eğrilerindeki hangi gerilme değerlerine göre göçme zarfını elde edeceğiz? Yani göçme, kayma gerilmesi-deformasyon eğrisinin neresindedir? Bu, yenilme olarak kabul edebilebilecek birim deformasyona (%15~20 gibi) karşılık gelen gerilme değeridir. Eğer bu deformasyon değerinden önce gerilme-deformasyon eğrisi bir pik yapıyorsa, bu gerilme değerinde zeminin yenildiği kabul edilebilir.

Aşırı konsolide killerin veya sıkı kumların gerilme-deformasyon ilişkileri incelendiğinde, artan deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin önce bir pik yaptığı daha sonra azalarak artık deformasyonla değişmeyen sabit bir değer aldığı görülür. Kayma gerilmesinin bu sabit değerine zeminin kalıcı (residual) mukavemeti adı verilmektedir. Normal konsolide veya gevşek kumlarda ise, gerilme-deformasyon ilişkilerinde belirgin bir pik mukavemet görülmemekle beraber, kayma gerilmesinin yönlendiği değer yine kalıcı mukavemet değeridir (Şekil 2.3).



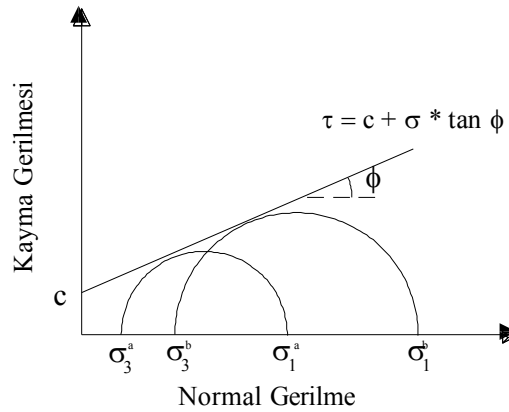
Şekil 2.3 Kayma gerilmesi-deformasyon ilişkisi

Kesme kutusu deneyinin en sakıncalı yanı, zorlanan kayma yüzeyinin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmayabileceğidir. Kesme sırasında beliren fazla boşluk suyu basınçlarının sönümü kesme hızına bağlıdır. Ancak bu deneyde, numune ne kadar hızlı kesilirse kesilsin drenaj tümüyle önlenemeyeceğinden gerçek CU (konsolidasyonlu-drenajsız) deneyinin gerçekleşmeyeceği kabul edilmekle birlikte, boşluk suyu basıncındaki değişimleri ölçme olanağı da bulunmamaktadır. Ayrıca, deneyde beliren gerilme koşulları incelendiğinde bazı sakıncalar görülmektedir. Başlangıçta yatay düzlem, kayma gerilmesinin sıfır olduğu bir asal düzlemdir. Ancak kayma gerilmesi uygulanmasıyla birlikte, bu düzlem artık asal düzlem olamaz. Bu nedenle, deneyin başlangıcından itibaren asal düzlem ve asal gerilmelerde kontrolsüz olarak dönme meydana gelmektedir. Arazi yükleme şartlarının laboratuvarında doğru bir şekilde modellenebilmesi için bu dönme miktarının bilinmesi ve hesaba katılması gerekmektedir. Ancak, bu gerçekte yapılamamaktadır. Bu deneyin bir diğer eksikliği, numune sınırlarında oldukça fazla gerilme yoğunluğunun oluşması ve bunun sonucu olarak ta deney numunesi içerisinde ileri derecede üniform olmayan gerilme dağılımlarının ortaya çıkmasıdır.

Zeminlerin kayma mukavemetlerini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında en gelişmiş olanı üç eksenli basınç deneyleridir. Bu deney ile, zeminin arazi koşullarında sahip olabileceği kayma mukavemeti gerçeğe en yakın olarak belirlenebilmektedir. Üç eksenli basınç deneyinde kontrol edilebilen ve ölçülebilen parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Zemin numunesinin arazi gerilmeleri altında konsolidasyonu sağlanabilmekte ve suya doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
- Yanal ve aksel gerilmeler uygulanarak, arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilmektedir.
- Aksel yüklenme sırasında drenajsız veya drenajlı koşullar sağlanabilmektedir (CD, CU ve UU).
- Drenajsız deneylerde, numunede oluşan boşluk suyu basıncı değişimleri, drenajlı deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir.

Bu deneylerde göçme zarfı, yenilme anındaki asal gerilmelere göre çizilen Mohr dairelerinden belirlenmektedir. Şekil 2.4'te gösterildiği gibi bu dairelere çizilen ortak teğet, zeminin göçme zarfı ve bu teğetin denklemi ise zeminin kayma mukavemetidir.



Şekil 2.4 Üç eksenli basınç deneyinden göçme zarfının elde edilişi

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan en yaygın laboratuvar yöntemi ise, doğrudan kesme kutusunun bir diğer türü olan halka (ring) kesme deneyidir. Bu deney aleti, deney numunesinde büyük kayma yerdeğiştirmeleri yapmaya izin verecek şekilde geliştirilmiştir. Bu, zeminlerin kalıcı mukavemetlerini elde etmek için kesme kutusu deneylerinde yapılan birçok tekrardan daha kolay ve hızlıdır (Bishop, 1971).

2.2 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Geoteknik Mühendisliğindeki Önemi

Kohezyonlu zeminlerin, büyük kayma yerdeğiştirmelerinden sonraki mukavemet özellikleri ilk olarak Hvorslev (1936, 1937, 1939), Tiedeman (1937) ve Haefeli (1938) tarafından incelenmiştir. Tiedeman, büyük kayma yerdeğiştirmelerinden sonra sabit bir mukavemet olduğunu fark etmiş ve buna saf kayma direnci (pure sliding resistance) adını vermiştir. Haefeli ise kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrisinin son noktasını geri kalan kayma mukavemeti (remaining shear strength) olarak adlandırmıştır. Zeminlerdeki kalıcı kayma mukavemetinin önemi, ilk kez 1960'lı yılların başlarında ortaya konulmuştur.

Kil şevlerin uzun süreli stabilitelerini araştırmadaki normal uygulama, olası kayma yüzeyini oluşturan zeminden alınan numuneler üzerinde drenajlı kayma mukavemeti deneyleri yaparak, pik değerlere göre zeminin mukavemet parametrelerini (c' ve ϕ') belirlemektir. Ancak bu yöntemle güvenli olduğuna karar verilen fisürlü (AKO oranı yüksek) kil şevlerin, diğerk koşulların aynı kalmasına rağmen bir süre sonra aniden göçtüğü gözlenmiştir. Bir şev göçtüğünde, güvenlik sayısı 1 olmalıdır. O halde göçme yüzeyinin yeri ve kayan zemin kitlesinin ağırlığı belirlendiğinde, bu şev için göçme oluştuğu anda, kayma yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesi belirlenebilir. Skempton (1964), fisürlü kil şevlerde yaptığı geri analiz sonuçları neticesinde, göçme yüzeyindeki ortalama kayma gerilmesinin, laboratuvarıada belirlenen pik kayma gerilmesinden oldukça küçük olduğunu belirlemiştir. Bu durum sonucunda, pik gerilmenin elde edilmesinden sonra durdurulan kayma mukavemeti deneylerine devam edilmiş ve sonuç olarak, artan deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin gittikçe azalarak artık deformasyonla değışmeyen sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Elde edilen bu sabit kayma gerilmesine, zeminin kalıcı kayma mukavemeti (residual shear strength) denir.

Fisürlü, sert killi zeminlerde görülen mukavemetin zamanla azalması sonucu gerçekteşen göçmeye, zamanla gelişen göçme (progressive failure) adı verilmektedir. Fisürler, genişlikleri mikron/milimetre düzeyinde olan ve bir sistem içerisinde tekrarlanan süresizlikler olarak ifade edilebilirler. AKO oranı yüksek aşırı konsolide killer genellikle fisürlü olurlar. Fisürler, zemin içerisinde mukavemeti düşük olan zayıf kısımlardır. Zeminde üniform olmayan gerilme dağılımlarına, dolayısıyla üniform olmayan deformasyonlara neden olurlar.

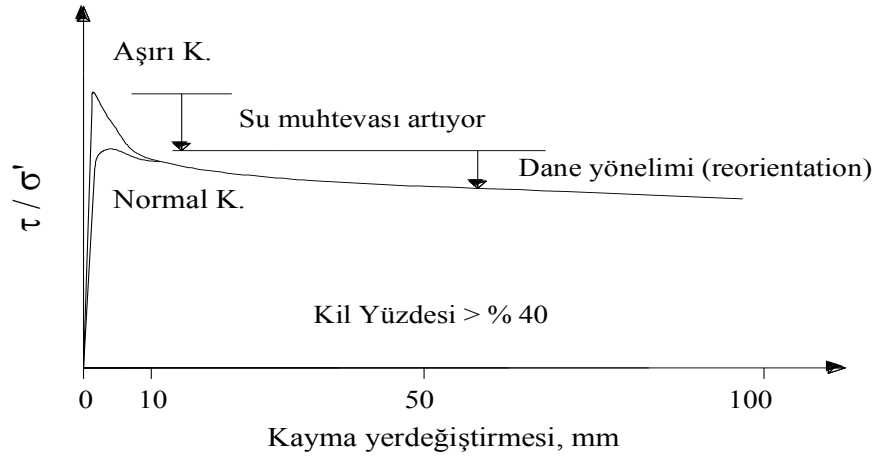
Bu durum sonucunda zeminin her noktası, kendi pik mukavemetine farklı zamanlarda ulaşacaktır. Zeminin kısıtlı bir bölgesi hatta bir noktası, kendi pik mukavemetinden daha fazla gerilirse bu nokta yenilir ve mukavemeti düşmeye başlar. Fazla gelen gerilme ise zeminin diğer noktalarına aktarılır. Bu süreç bir kez başladıktan sonra, eğer şev kaymıyorsa yani azalan mukavemet bile şevin stabilitesini korumasına yetiyorsa, potansiyel kayma yüzeyi boyunca her noktada mukavemet kalıcı değere düşünceye kadar devam eder. Dolayısıyla, zamanla zeminin kayma mukavemeti başlangıca göre azalmış olacaktır. Ayrıca suyun fisürler arasına girmesi zeminin yumuşamasına ve dolayısıyla mukavemetinin azalmasına neden olur. Öte yandan, süreksizliklerin sık olmaması da başka bir çelişkiyi ortaya çıkarır. Şöyle ki, süreksizlik sıklığı düşük olan bir ortamdan alınmış numune rastlantı sonucu bu süreksizlikleri içermiyorsa, gerçekte fisürlü olan kilin, laboratuvarında sürekli ve kusursuz bir malzeme olarak ölçülecek mukavemeti, arazideki kayma mukavemetinden çok daha fazla olacaktır.

Skempton (1985) yaptığı incelemeler sonucunda, önceden büyük deformasyonların yaşanmış olduğu kayma yüzeyleri içeren şevlerdeki mukavemetin kalıcı mukavemet değerinde olduğunu ($\tau \approx \tau_r$), ilk defa göçmenin yaşandığı fisürsüz kil şevlerde göçme anındaki kayma mukavemetinin pik değerinde olduğunu ($\tau \approx \tau_p$) ve fisürlü kil zeminlerin oluşturduğu şevlerde ise göçmenin pik ile kalıcı arasında bir kayma mukavemeti değerinde gerçekleştiğini ($\tau_r < \tau < \tau_p$) belirlemiş ve bu mukavemet değerinin, yoğrulmuş normal konsolide kilin pik mukavemeti olarak alınabileceğini önermiştir.

Kalıcı (residual) kayma mukavemeti, büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan, varolan göçme yüzeylerindeki mukavemetin, kalıcı değerinde olduğu veya gittikçe kalıcı değere yaklaşmakta olduğu ve fisürlü, aşırı konsolide kil şevlerin stabilite hesaplarında mukavemetin zamanla kalıcı kayma mukavemeti değerine doğru düşme eğiliminde olduğu ve bunun ani göçmelere (progressive failure) sebep olabileceği bilinmeli, tasarım esnasında bu durumlar göz önüne alınmalıdır (Mitchell, 1993).

2.3 Kalıcı Kayma Mukavemeti Mekanizması

Yüksek kil yüzdeli (K.Y.>%40) aşırı konsolide zeminlerin, drenajlı kayma mukavemetindeki düşüş iki kademedir, normal konsolide zeminlerin ise tek kademedir olduğu düşünülebilir. Bu durum Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

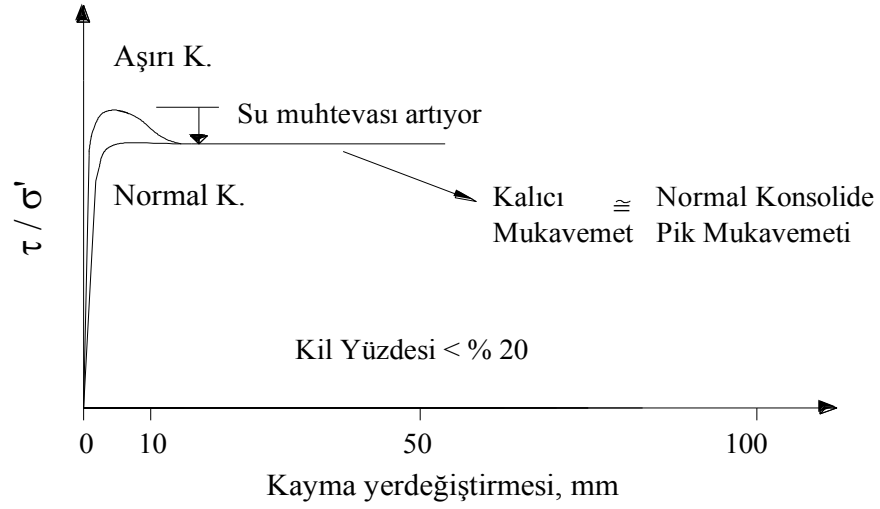


Şekil 2.5 Sabit efektif normal gerilme altında yüksek kil yüzdeli zeminlerin kayma mukavemetleri (Skempton, 1985).

Birinci kademe küçük deplasmanlarda, su muhtevasındaki artıştan dolayı mukavemetin azalmasıdır. İkinci kademe ise çok daha büyük deplasmanlar sonucu, yassı-yapraksı (kalınlıkları diğeri boyutlarına göre çok küçük olan) şekilli kil danelerinin konumlarını değiştirerek kayma yönüne paralel olarak yeni bir düzene girmelerinden oluşur (reorientation). Yüzey-yüzey etkileşimi için olan daneler arası sürtünme gerilmesinin, kenar-yüzey etkileşimi için olan sürtünme gerilmesinden daha küçük olması nedeniyle (temas yüzeyi arttıkça sürtünme gerilmesi azalır), mukavemet bir miktar daha düşer ve artık deformasyonla değişmeyen sabit bir değeri alır ki bu değeri kalıcı kayma mukavemeti denilmektedir. Dane yönlenmesi, yassı-yapraksı şekilli kil minerallerine ve %20-25 üzerinde kil içeren zeminlerde söz konusudur. Kil yüzdesi yaklaşık %50 ise kalıcı mukavemet, kil danelerinin kayma sürtünmesi (sliding) tarafından kontrol edilir ve kil yüzdesindeki bundan fazla bir artış çok az etkilidir (Skempton, 1985).

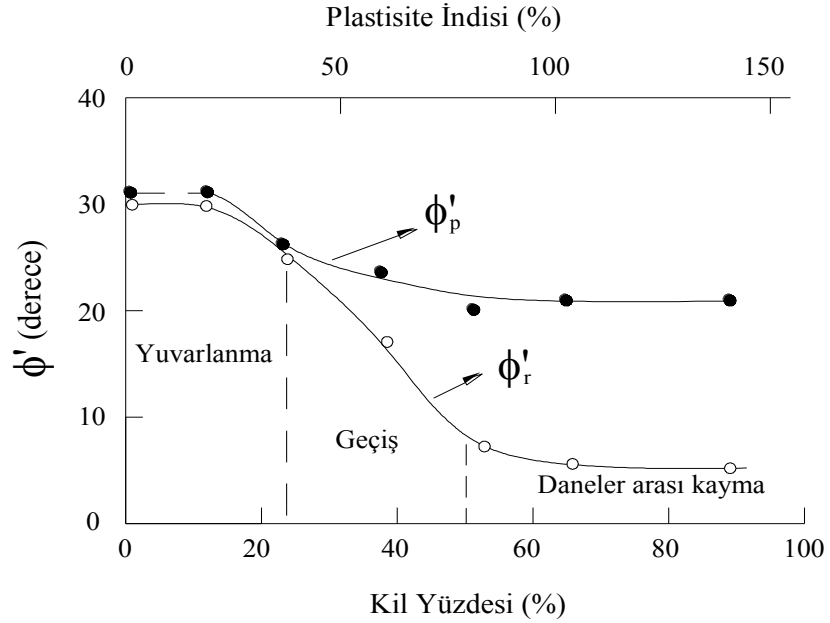
Eğer kil yüzdesi, %20-25’den az ise ikinci kademe olaya nadiren dahil edilir. Mukavemet, daha çok kum ve silt daneleri tarafından kontrol edilir. Normal konsolide zeminlerde, büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetin pik değeri

farkı çok azdır. Aşırı konsolide zeminlerde ise pikten düşüşün nedeni su muhtevastaki artıştır. Bu durum Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Sabit efektif normal gerilmede düşük kil yüzdeli zeminlerin kayma mukavemetleri (Skempton, 1985)

Zemindeki yassı dane miktarının (kil yüzdesinin) kalıcı mukavemete etkisi, iyi derecelenmiş kuvars kum ve yassı şekilli sodyum bentonit ($A_C = 1.55$) karışımından yapılan halka kesme deneyleri ile Şekil 2.7’de gösterilmiştir (Lupini, 1981). Karışım, uygulanan efektif normal gerilme altında normal konsolidedir.



Şekil 2.7 Kum-bentonit karışımlarında yapılan halka kesme deneyleri (Lupini, 1981)

Şekilden görüldüğü gibi, üç tip kalıcı kayma davranışı mevcuttur. Bunlar, baskın dane şekline ve daneler arası sürtünmeye bağlı kalıcı kayma mukavemeti mekanizmalarıdır (Lupini,1981). Bu mekanizmalar, baskın olarak hacimli (bulky) danelerden oluşan zeminler için olan yuvarlanma (rolling) kesmesinden, yüksek oranda yassı (platy) şekilli kil daneleri içeren zeminlerde görülen kayma (sliding) kesmesine doğru geçiş (transitional) şeklindedir.

Kohezyonsuz zeminlerin kalıcı mukavemet açısı, daneler arasındaki kaymadan çok, danelerin birbirleri üzerinden yuvarlanması ile oluşan yeni dizilimlerinden (rearrangement) etkilenir. Bunun sonucu olarak, pik ile kalıcı mukavemet açıları arasındaki fark küçüktür. Kil içeriği yeterince yüksek olduğunda, kum ve silt danelerinin yuvarlanarak yeniden dizilimleri önemsiz hale gelir. Kayma, kil daneleri arasındaki sürtünmeden kaynaklanır.

Ancak volkanik kökenli yüksek plastisiteli killeri buna uymazlar. %50'nin üzerinde kil içerebilen bu tür zeminler, yüksek kalıcı mukavemet açısına sahiptirler. Çünkü volkanik killeri, büyük oranda allophan gibi yassı olmayan kil mineralleri içerirler (Mitchell,1991).

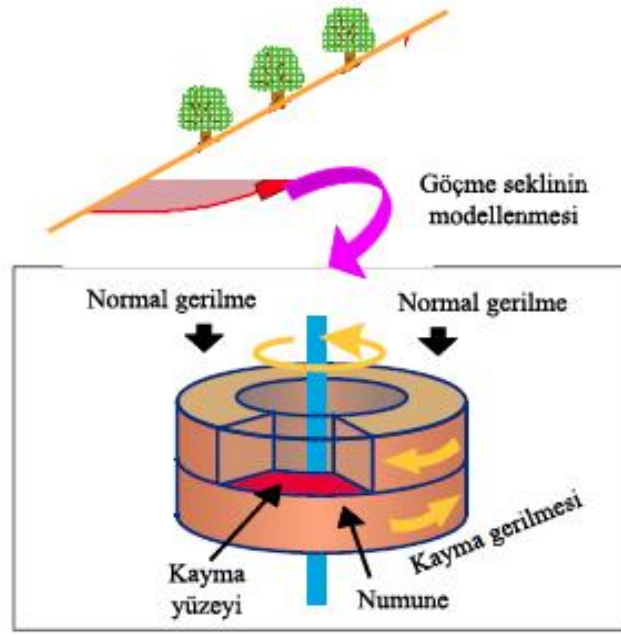
Kaymış aşırı konsolide killerdeki su muhtevastaki artış için laboratuvarından alınan veriler kadar araziden gelen kanıtlarda mevcuttur. Örneğin, Londra kilinde ($w_L = \%80$, $I_p = \%51$ ve $K.Y. = \%55$), kayma yüzeyi ve yakınında su muhtevası yaklaşık %35 iken kaymanın olmadığı komşu bölgelerde bu değer %30 civarındadır.

2.4 Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan başlıca laboratuvar deney yöntemleri; halka kesme, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleridir (Bromhead, 1983).

Drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde aşırı konsolide zeminler, pik mukavemetlerine ulaştıktan sonra artan deformasyonla birlikte mukavemetlerinde bir düşüş gösterirler. Fakat bu deneylerde, numuneye uygulanabilir şekil değiştirmenin bir sınırı vardır. Bu nedenle zeminlerin büyük deformasyonlardan sonraki mukavemetlerini belirlemede, kesme kutusu ve halka kesme deneyleri daha kullanışlı olmaktadır (Craig, 1987).

Kesme kutusu deneyinde, kalıcı mukavemete ulaşıncaya kadar numune ileri-geri kesilmektedir. Sonuç olarak numune sürekli aynı yönde kaymaya maruz bırakılmadığından yassı kil danelerinin tümünün kayma doğrultusuna paralel olarak yönelimi elde edilememektedir (Bromhead, 1983). Şekil 2.8’de gösterilen halka kesme deneyinin büyük kayma deformasyonlarına izin vermesi ve genellikle kohezyonlu zeminlerde görülen rotasyonel kaymayı modellemesi yönünden, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde en güvenilir deney yöntemidir (Bishop, 1971).



Şekil 2.8 Halka kesme deneyi

Verilen bir normal gerilme altında, yatay düzlem üzerindeki halka şeklindeki numune, aletin alt yarısının sabit olan üst yarısına göre dönmesiyle, örneğin iki yarısı arasındaki kayma yerdeğiştirmesinin büyüklüğünde hiçbir sınır olmaksızın kesilir. Bu sayede, bütün kil danelerinin kayma yönüne paralel olarak yönelimi sağlanmakta ve kalıcı mukavemetin elde edilmesi çok daha kısa sürede olmaktadır. Ayrıca, kesme süresince kayma yüzeyinin sabit en kesit alanına sahip olması bu deneyin bir başka üstünlüğüdür (Stark, 1994).

Deney sonuçları incelendiğinde, tekrarlı kesme kutusu deneylerinin, geri analiz ile elde edilen değerden ortalama 0.5° daha büyük kalıcı mukavemet değerleri verdiği, halka kesme deneylerinin ise hatalara daha az meyilli olduğu ve gerçeğinden daha küçük mukavemet değerleri verdiği belirlenmiştir (Skempton, 1985).

2.5 Kayma Mukavemetinin Kayma Yerdeğiştirmesi ile Değişimi

Aşırı konsolide killerin pik mukavemetleri, kesme kutusu veya halka kesme deneylerinde ortalama 1 mm'lik yerdeğiştirmeler sonucu elde edilmektedir. Normal konsolide killerde ise daha ileriki kayma hareketleri sonucunda pik mukavemetleri oluşmaktadır. Su muhtevastaki değişimler genellikle 5-10 mm yerdeğiştirmeler sonucu tamamlanmaktadır (Skempton, 1985).

600 kPa değerine kadar olan efektif normal gerilmelerde yapılan halka kesme deneylerinde, genellikle 100 mm'yi ařan yerdeğiştirmeler sonucunda ve bazen 500 mm'yi ařan yerdeğiştirmelerden sonra kalıcı mukavemet ačısına ulaşıldığı görülmüştür. Buna rağmen, kalıcı mukavemete yaklaşan mukavemet değerleri; örneğin, $\phi_r' + 1$ ile gösterilen mukavemet, kalıcı mukavemete ulaşmak için gerekli yerdeğiştirmenin %20'si ile %50'si arasında değişen deplasmanlar sonucu elde edilir (Skempton, 1985).

Tablo 2.1'de bozulmamış (intact) killerin (kil yüzdesi > %30), 600 kPa değerinden daha düşük efektif normal gerilmelerdeki değişik mukavemet durumları için gereken tipik yerdeğiştirme değerlerini vermektedir (Skempton, 1985).

Tablo 2.1 Pik ve kalıcı mukavemetlerin elde edildiği tipik deplasman değerleri (Skempton,1985)

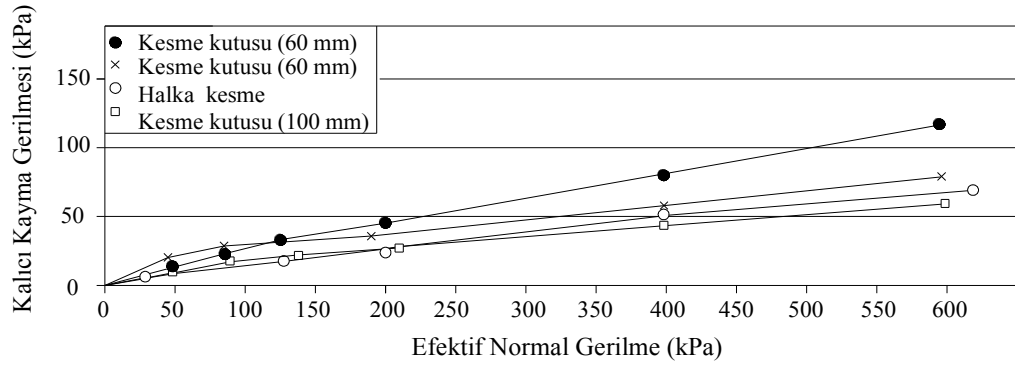
Kayma Mukavemeti Ačısı	Deplasman (mm)	
	Aşırı konsolide	Normal konsolide
ϕ_p' (Pik)	0.5-3	3-6
$\phi_r' + 1$	30-200	
ϕ_r' (Kalıcı)	100-500	

Yüksek efektif normal gerilmelerde ($\sigma' > 600$ kPa), dane yönlenmesinin ve dolayısıyla kalıcı değere ulaşmak için gereken yerdeğiştirme miktarının daha küçük olması beklenebilir. Bu görüş, Sinclair ve Broker (1967) tarafından yapılan deneylerce desteklenir. Efektif normal gerilme 100 kPa olduğundaki mukavemet, 60 mm'den daha büyük yerdeğiştirmelerden sonra düştüğü halde, efektif normal gerilme 2000 kPa iken kalıcı mukavemete 25 mm civarındaki yerdeğiştirmelerle ulaşılır.

Kumda yapılan kesme kutusu deneyleri, kalıcı duruma bir kesme kutusu hareketiyle çok çabuk bir şekilde ulaşıldığını ve daha sonraki tekrarların kalıcı mukavemete etkisinin çok az olduğunu göstermiştir (Craig, 1987).

2.6 Kalıcı Göçme Zarfının Yapısı

Hawkins ve Privett (1985), Bromhead halka kesme aleti, 60 mm ve 100 mm'lik kesme kutularını kullanarak yoğrulmuş numunelerde ($w_L=\%96$, $I_p=\%60$ ve Kil Yüzdesi= $\%73$) kıyaslanabilir deneyler yapmışlardır. Bu deneylerden elde edilen göçme zarfları Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Kalıcı göçme zarfları (Hawkins ve Privett, 1985)

Bu göçme zarflarının elde edildikleri efektif normal gerilmelere karşılık gelen kalıcı kayma mukavemeti parametresi ($\tau_r = \sigma' \tan \phi_r'$) ve göçme zarflarına uygulanan doğrusal yaklaşım sonucu elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ($\tau_r = c_r' + \sigma' \tan \phi_r'$) Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Kalıcı kayma mukavemeti parametreleri (Hawkins ve Privett, 1985)

Deney	Efektif Normal Gerilme (kPa)						Doğrusal Yaklaşım	
	50	100	150	200	400	600		
	ϕ_r' (°)						ϕ_r' (°)	c_r' (kPa)
Halka kesme	11.3	9.5	8.2	7.4	7.2	6.4	6.0	5.5
100 mm'lik kesme kutusu	12.7	11.3	9.6	8.0	6.2	6.0	5.3	7.0
60 mm'lik kesme kutusu	13.4	13.5	12.6	11.7	11.0	11.0	11.0	4.0
60 mm'lik kesme kutusu	18.0	16.2	12.8	9.0	8.5	7.5	6.3	13.5

Privett (1985) tarafından test edilen kilce zengin zeminlerin çoğunun, eğri göçme zarfına sahip oldukları ve 200 kPa değerindeki efektif normal gerilmeden daha düşük gerilme seviyelerinde bu eğriliğin söz konusu olduğu görülmüştür. Bu durum, bir zeminin ϕ_r' değerinin zemine etkiyen efektif normal gerilme ile değiştiğini

göstermektedir. Yani σ' arttıkça ϕ_r' azalmakta ve yaklaşık 200 kPa değerine ulaştığında artık sabit bir kalıcı kayma mukavemeti açısı elde edilmektedir.

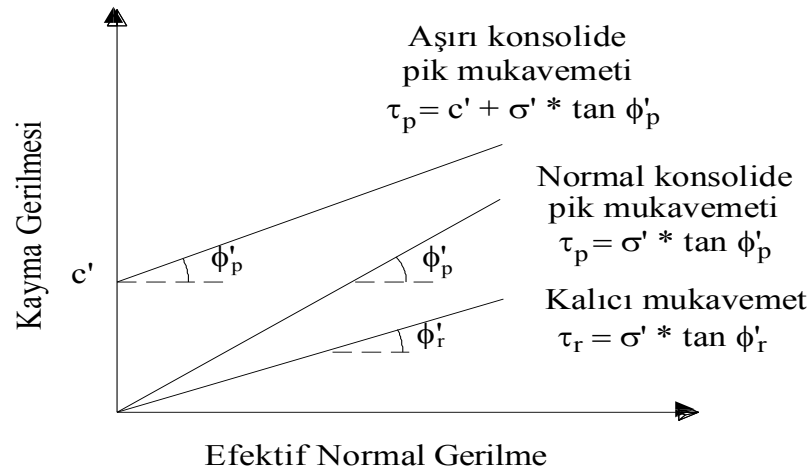
O halde düşük gerilme seviyelerinde kalıcı mukavemet açısını (ϕ_r') belirlemenin 2 yolu vardır.

1) Kalıcı göçme zarfına, problemimizle ilgili olan düşük gerilme aralığında doğrusal çizgi yaklaşımı yapmak. Bu durumda kalıcı kayma mukavemetinin denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\tau_r = c_r' + \sigma' \tan \phi_r' \quad (2.6)$$

Oysa ki, zeminlerin kalıcı kayma mukavemetlerinde kohezyonun etkisi yoktur. Çünkü, zeminler pik mukavemetlerine ulaştıktan sonra daneler arası bağlar etkinliğini yitirmeye başlar ve büyük deformasyonlar sonucu tamamen ortadan kalkarlar. Dolayısıyla kalıcı kayma mukavemeti, sadece daneler arası sürtünmeden kaynaklanır.

Şekil 2.10'da, killi zeminlerin drenajlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen tipik göçme zarfları verilmiştir. Şekildeki kalıcı göçme zarfı, zeminin aşırı veya normal konsolide olduğu durumlar için ayrı ayrı verilmemiştir. Çünkü, belirli bir zeminin kalıcı mukavemeti, bu zeminin aşırı konsolidasyon oranından etkilenmez (Bishop, 1971).



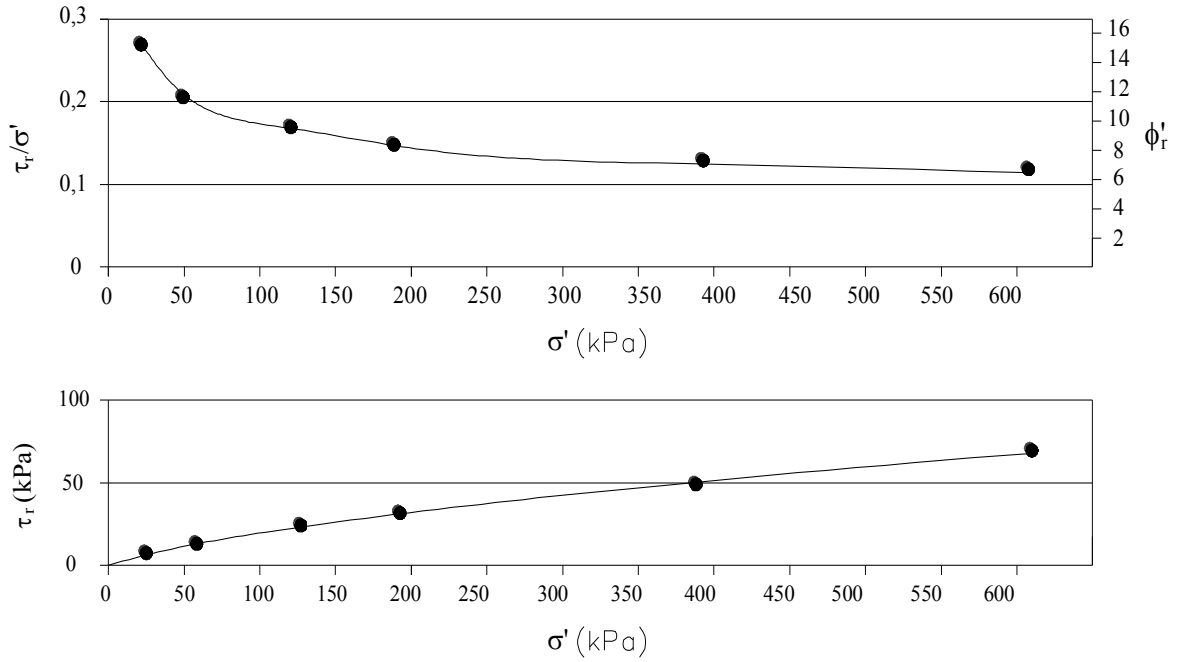
Şekil 2.10 Killi zeminlerin drenajlı pik ve kalıcı göçme zarfları (Bishop, 1971).

2) Kalıcı sürtünme katsayısı (τ_r/σ') ile efektif normal gerilme (σ') arasında çizilen grafikten istenilen gerilme değeri için kalıcı mukavemet açısını belirlemek. Bu grafiğe Hawkins ve Privett (1985) tarafından tamamlanmış göçme zarfı adı verilmiştir.

$$\tau_r = \sigma' \tan \phi_r' \quad (2.7)$$

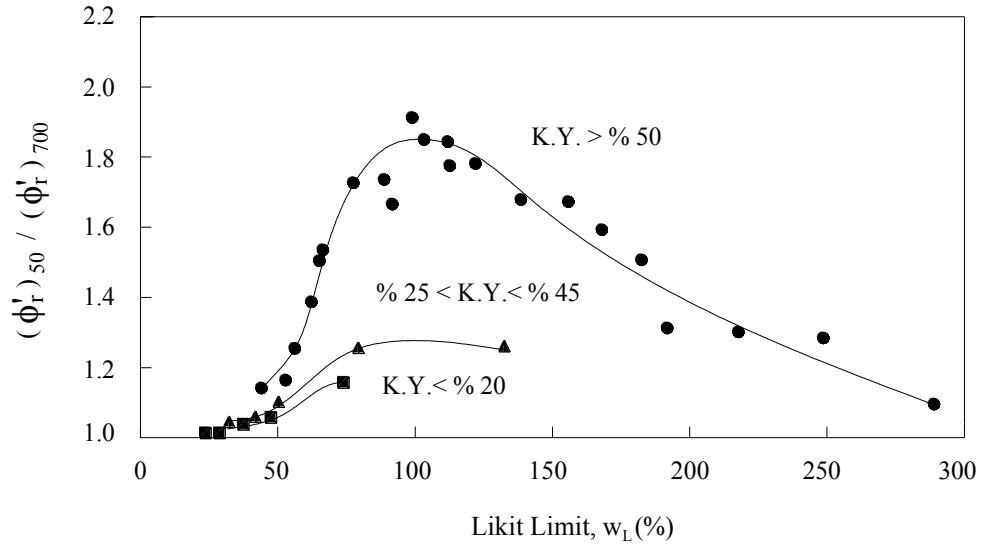
$$\phi_r' = \tan^{-1} (\tau_r / \sigma') \quad (2.8)$$

Şekil 2.11'de, Bromhead halka kesme aleti ile 0.0178 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılan kilce zengin numuneye (Kil yüzdesi = %73, w_L = %96, I_p = %60) ait kalıcı göçme zarfı ve tamamlanmış göçme zarfı gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Tamamlanmış göçme zarfı ve kalıcı göçme zarfı (Hawkins ve Privett,1985)

Stark (1994), 32 kil ve kil şeyl üzerinde, Bromhead halka kesme aleti ile yaptığı deneyler sonucunda, drenajlı kalıcı göçme zarfının doğrusal olmadığını ve bu doğrusalsızlığın hangi özelliklere sahip zeminlerde önemli olacağını saptamıştır. Şekil 2.12'de, incelenen 32 kohezyonlu zeminin 50 kPa ve 700 kPa değerlerindeki efektif normal gerilmelere karşılık gelen kalıcı kayma mukavemeti açıları oranının ($\phi_{r50}' / \phi_{r700}'$), bu zeminlerin likit limit ve kil yüzdeleri ile değişimleri verilmiştir.



Şekil 2.12 Kalıcı mukavemet açısının, 50 kPa ve 700 kPa değerindeki efektif normal gerilmelere karşılık gelen değerlerinin oranı (Stark, 1994)

Görüldüğü gibi, %45'den az kil yüzdesine sahip zeminlerde $(\phi_r')_{50} / (\phi_r')_{700}$ oranı, 1.30'dan daha azdır. %50'den daha fazla kil yüzdesine sahip zeminlerde, yaklaşık $w_L = 100\%$ için bu oran 1.85–1.90 arasında bir maksimum yapmakta ve artan likit limit ile azalarak $w_L = 288\%$ için 1.10 değerine ulaşmaktadır. Sonuç olarak, drenajlı kalıcı göçme zarfının doğrusalsızlığı, kil yüzdesi > %50 ve w_L değeri %60-220 arası olan kohezyonlu zeminler için önemlidir. %120'den az likit limit ve %45'den az kil yüzdesine sahip kohezyonlu zeminlerde bu doğrusalsızlığın çok önemli olmadığı söylenebilir. Dolayısıyla drenajlı kalıcı göçme zarfı doğrusal kabul edilebilir.

2.7 Kalıcı Kayma Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Belirli bir deney türü için zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkileyen başlıca faktörler; mineroloji, efektif normal gerilme seviyesi ve kesme hızı olarak verilebilir. Bunların kalıcı mukavemete etkisini incelemeden önce, zeminlerin pik mukavemetlerinde etkili olan zemin yapısının, kalıcı mukavemetteki rolü aşağıda açıklanmıştır.

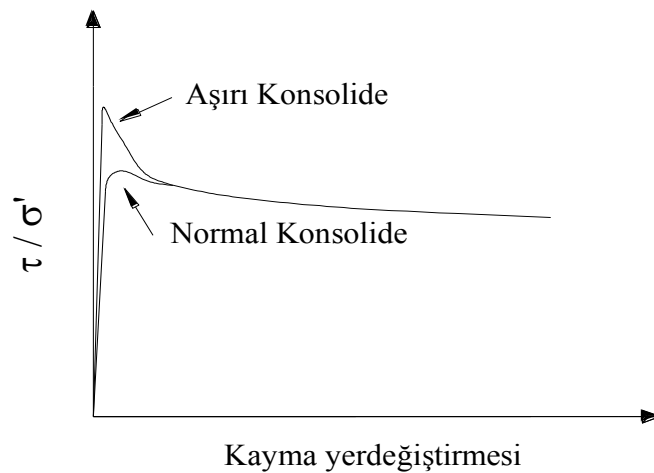
2.7.1 Zemin yapısının etkisi

Zemin yapısı ile kastedilen, zemin danelerinin geometrik dizilimleri (zemin dokusu) ve daneler arası kuvvetlerdir. İri daneli zeminlerde daneler arası kuvvetler, yerçekimi kuvveti yanında ihmal edilebilir düzeyde olduğundan yapı yerine doku (fabric)

ifadesi kullanılabilir. Ancak ince daneli zeminlerde yapı kavramının, doku kavramına ek bir anlam taşıdığı bilinmelidir.

La Gatta (1970), örselenmemiş ve yoğrulmuş numuneler üzerinde yaptığı deneylerde, numune hazırlamanın ve zeminin gerilme geçmişi drenajlı kalıcı kayma mukavemetinde etkili olmadığını belirlemiştir. Aynı şekilde, Garga (1970) ve Bishop (1971)'ta, aynı sonuca varmışlardır. Kalıcı durumda zeminin kayma mukavemetini, kayma düzlemine paralel olarak yönlendirilen yassı şekilli daneler arasındaki sürtünme direnci oluşturduğundan, zemin yapısının ($c_r \approx 0$) yani danelerin başlangıçtaki konumlarının kalıcı kayma mukavemetini etkilemediği söylenebilir (Bishop, 1971).

Şekil 2.13'ten görüldüğü gibi artan kayma yerdeğiştirmesi sonucu zeminin kayma mukavemeti, zemin ister normal konsolide olsun isterse aşırı konsolide olsun, neredeyse aynı kalıcı değere düşer. Dolayısıyla belirli bir zeminin, diğer tüm şartlar aynı kalmak şartıyla (kesme hızı, efektif normal gerilme v.b.), aşırı konsolidasyon oranının (AKO) zeminin kalıcı mukavemetine etkisi yok denilebilir. Ancak, özellikle fazla kil yüzdesine ($K.Y. > \%40$) sahip aşırı konsolide zeminlerde, mukavemetteki düşüş (pik mukavemeti ile kalıcı mukavemet arasındaki fark) oldukça büyüktür. O halde, özellikle bu tür zeminlerde kalıcı mukavemetin önemi daha fazladır. Ayrıca, belirli bir zemin için AKO arttıkça zeminin pik mukavemeti de artacağından, mukavemetindeki düşüşün büyüklüğü daha fazla olacaktır. Dolayısıyla, AKO arttıkça kalıcı mukavemet değeri değişmese de kullanımının önemi artacaktır.



Şekil 2.13 Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemetine etkisi

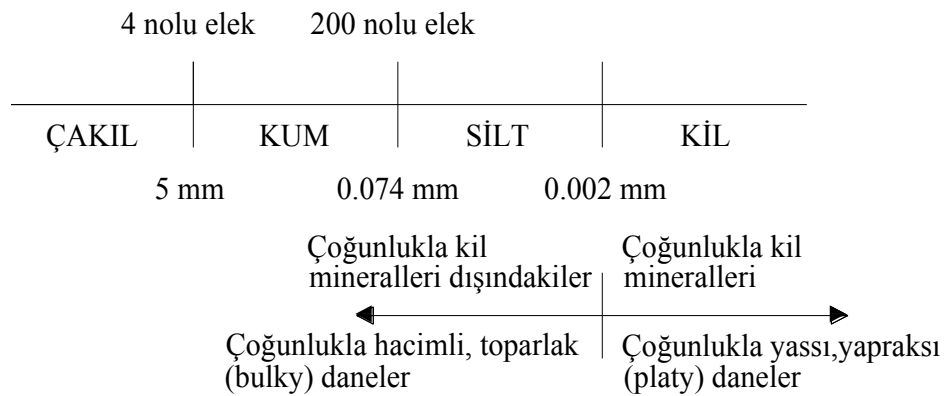
2.4.2 Minerolojinin etkisi

Dane boyutu azaldıkça yassılık (platyness) artar. Dane yassılığı arttıkça, daneler rastgele dizilmiş olsalar bile, baskın olan dane etkileşimi yüzey-yüzey etkileşimidir. Dolayısıyla zemindeki yassı şekilli dane miktarı arttıkça kalıcı mukavemet azalacaktır. Bu nedenle ϕ_r' ile genel kil mineralleri (kaolinit, illit, montmorillonit, klorit gibi) arasında bir ilişki vardır. Çünkü bu mineraller yassı şeklindedirler. Kil minerallerinin bir başka önemli özeliğide, su ile temas ettiklerinde plastiklik özelliği göstermeleridir. Dolayısıyla, ϕ_r' ile kil yüzdesi yada likit limit arasında bir bağıntı çıkarabilmek için, bunların ortak olabilecek veya olamayacak bazı temel özelliklerini tekrar etmek gerekir (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).

- **Kil yüzdesinin etkisi**

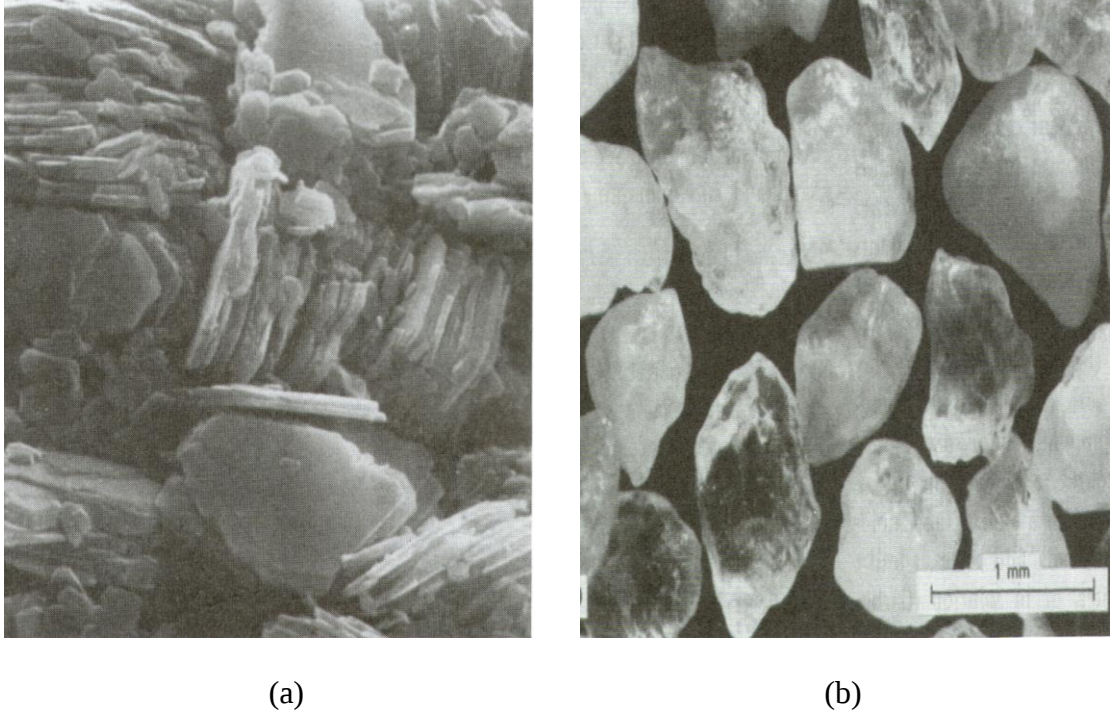
Bütün kil mineralleri 2 μm yani 0.002 mm'den daha küçük boyutta olmadıkları gibi, kil olmayan minerallerin hepsi de 2 μm 'dan daha büyük değillerdir. Yani 2 μm 'dan daha küçük boyutta olup da plastiklik özelliği göstermeyen daneler mevcut olabilir. Bu nedenle kil içeriği (clay content) ile kil yüzdesi (clay-size fraction) ifadelerinin ayrı anlamlar ifade ettikleri bilinmelidir. Kil içeriği ifadesi, dane boyutu gözetmeksizin zemindeki mevcut kil minerallerini ifade eder. Buna rağmen, kil minerallerinin zemindeki miktarı kil yüzdesiyle (2 μm 'dan daha küçük çaplı dane yüzdesiyle) verilir. Çünkü genellikle kil mineralleri 2 μm 'dan daha küçüktürler (Mitchell,1993).

Şekil 2.14'te dane çapı ile dane şekli arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.14 Dane çapı-dane şekli ilişkisi (Mitchell,1993)

Şekilden görüldüğü gibi, 2 μm 'dan küçük çaplı daneler genellikle kil mineralleri olup (plastiklik özelliği gösterip) yassı-yapraksı (platy) şekillidirler. 2 μm 'dan büyük çaplı daneler ise, genellikle kil mineralleri olmayıp hacimli, toparlak (bulky) danelerden oluşurlar. Şekil 2.15'de yassı kaolinit ve hacimli kuvars minerallerinin elektron mikroskopu altındaki görünüşleri verilmiştir (Mitchell, 1993).



Şekil 2.15 (a) Kaolinit minerallerinin elektron mikroskopu altındaki görünümü. Resim genişliği 17 μm 'dur. (b) Kuvars minerallerinin elektron mikroskopu altındaki görünümü (Mitchell, 1993).

Genel kil minerallerinin kalıcı mukavemetleri, pik mukavemetlerinden farklı olup efektif normal gerilme seviyesinden etkilenir. Montmorillonit, illit ve kaolinit gibi yassı ve 0.002 mm'den küçük kil minerallerinin efektif kalıcı mukavemet açıları sırasıyla yaklaşık 5°, 10° ve 15° civarındadır. Attapulgit, allophan ve halloysit gibi kil mineralleri ise, 0.002 mm'den daha küçük (kil boyutlu daneler) olmalarına rağmen yassı şekilli olmadıklarından çok daha yüksek ϕ_r' değerlerine sahiptirler. Bunlar, boru şekilli (tubular) veya iğnemsî şeklindeki (needle shaped) danelerden oluşurlar. Örneğin, iğnemsî şekilli olan attapulgit için ϕ_r' değeri 30° civarındadır. Kil mineralleri dışındaki minerallerin, kalıcı mukavemetleri pik mukavemetlerinden çok farklı değildir. Örneğin kuvars, feldispat ve kalsitin kalıcı mukavemet açıları

yaklaşık aynı değerdedir ($\phi_r' \approx 35^\circ$) ve efektif normal gerilmeden önemli ölçüde etkilenmez (Mitchell, 1993).

Sonuç olarak, kil yüzdesiyle yapılan korelasyonlarda aynı kil yüzdesine sahip zeminlerin farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip farklı kil minerallerinden oluşabileceği unutulmamalıdır (Hawkins ve Privett, 1985). Kil yüzdesi ile yassılık arasında bir ilişki varsa, bu ancak genel kil mineralleri (kaolinit, illit, montmorillonit gibi) için olan dane boyutu-yassılık ilişkisinden doğan dolaylı bir ilişki olabilir (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986)

- **Kıvam limitlerinin etkisi**

Likit limit, zemin bileşiminin suyu tutma kabiliyetinin ölçüsüdür. Zeminin likit limit değerinden daha fazla bir su muhtevası, zeminin bir sıvı gibi akmasına neden olur. Su, ya dane yüzeylerinin hidrasyonu (absorbe su), ya da yüzeyleri çevreleyen iyonların hidrasyonu (çift tabakalı su) tutulur.

Dane boyutu azalırken yani özgül yüzey artarken, likit limitin de artması beklenir. Bu yüzden likit limit ile kil minerolojisi arasında bir ilişki olması gerekir. Çünkü her ikisinde de dane büyüklüğü faktörü mevcuttur. Genel kil minerallerinin boyut-özgül yüzey değerleri Tablo 2.3'te verilmiştir (Bardet, 1997).

Tablo 2.3 Bazı kil minerallerinin ortalama kalınlık - çap ve özgül yüzey değerleri (Bardet, 1997)

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

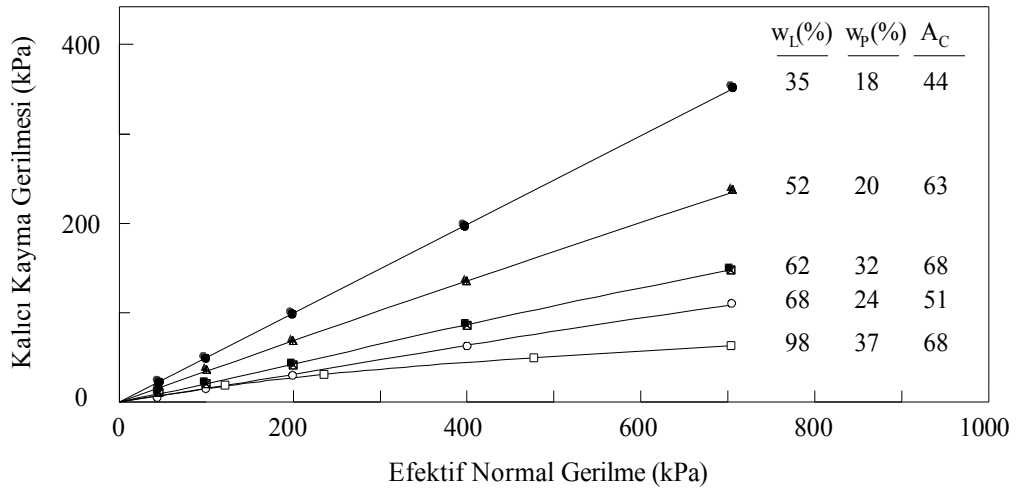
Özgül yüzey; yüzey alanının, hacim veya ağırlığa oranı olarak tanımlanır. Dolayısıyla boyut arttıkça özgül yüzey azalacaktır. Zemin danelerinin yüzeyleri belirli bir geometriye sahip olmadıklarından pratikte özgül yüzey hesabı yapılamamaktadır. Ancak aynı hacmi dolduran ince daneli zeminlerin özgül yüzeyi, iri danelilerden çok daha fazla olacaktır. Özgül yüzeyden hareketle, ince daneli zeminlerin doğal su içeriğinin, diğer tüm özellikler aynı olmak şartıyla iri danelilerden çok daha fazla olacağı açıktır.

Genelde kil mineralleri için, yassılık ve dane boyutu arasında bir bağıntı olmasına rağmen (dane boyutu arttıkça yassılık azalır) ve yassılığın danelerce absorbe edilmiş ve çift tabakalı suyu tutma yeteneğini artırmasına rağmen, dane şekli ve su tutma kapasitesi arasında bir bağıntı yoktur. Örneğin, iğnemsî şekilli attapulgitin likit limiti %345 olabilir (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986). Bazı kil minerallerinin likit limit, plastik limit ve aktivite A_c (plastisite indisi / kil yüzdesi) değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4 Kil minerallerinin, likit limit-plastik limit ve aktivitelerinin tipik değerleri (Das,2002)

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

Likit limit, plastik limit ve aktivitenin kalıcı mukavemete etkisi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Kil minerolojisinin kalıcı mukavemete etkisi (Stark,1994)

Şekilden görüldüğü gibi, artan likit limit ve aktivite ile kalıcı mukavemet azalmaktadır. Hem likit limit hem de aktivite kil mineralleri çeşidine birer göstergedirler ve bu yüzden dane boyutu ve şekli içinde birer gösterge halini alırlar (Stark, 1994).

Yapılan açıklamalardan görüldüğü üzere, her birinin dolaylı veya doğrudan olarak ya dane büyüklüğü ya yassılık ya da her ikisiyle ilişkisi olduğundan ϕ_r' ile kil yüzdesi veya ϕ_r' ile kıvam limitleri arasında bir bağıntı beklenir. Buna rağmen bu tip bir bağıntının genel olmasının gerekmediği açıktır (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).

2.7.3 Efektif normal gerilmenin etkisi

Birçok zemin için kalıcı mukavemet açısı, artan çevre basıncıyla düşer (Mitchell, 1993). Kilce zengin bir zeminde 1-2 metrelik yüzeysel kayma için bulunan ϕ_r' değeri, yüksek efektif normal gerilmeli kaymadan (derin kaymadan) yaklaşık 9° daha yüksek olabilir. Dolayısıyla göçme zarfı eğrilir. Bu yüzden kalıcı mukavemeti, kil yüzdesiyle ve/veya plastisite indisi gibi diğer parametrelerle ilişkilendiren bağıntılar, sadece aynı efektif normal gerilmede ele alınırsa ve bu gerilme düzeyi söz konusu olan problemle ilgili ise anlamlı olur (Hawkins ve Privett, 1985).

Eğriliğin nedeni tam olarak bilinmemekle beraber, montmorillonit gibi daha az ince kil içeriğine sahip zeminler daha büyük eğrilik gösterirler. Kil minerallerinin kimyası, hareket eden kayma yüzeyi boyunca sürekli olarak elektro - kimyasal bağların kopmasını ve yeniden oluşmasını etkiler. Daha yüksek normal gerilmede, kenar-yüzey etkileşimlerinden yüzey-yüzey etkileşimlerine dönüşümün daha fazla olduğu ve daha düz bir kayma bölgesi oluştuğu söylenebilir. Temas alanı arttığından, sürtünme gerilmeleri (kalıcı mukavemet) azalır ve dolayısıyla temas alanındaki bu fark doğrusal olmayan bir kalıcı göçme zarfına neden olur (Hawkins ve Privett, 1985).

Killer için ϕ_r' değerinin gerilmeye bağlı değişimini açıklayacak bir başka sav da, elastik birleşme teorisine (elastic junction theory) dayanır. Bu teoriye göre, kayma yüzeyleri arasındaki gerçek temas alanı, normal efektif gerilmedeki artıştan oransal olarak daha az artar. $\tan \phi_r'$ ile $(\sigma')^{-1/3}$ arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur ve 200 kPa değerine kadar olan gerilme seviyelerinde geçerlidir. Ancak daha yüksek gerilme değerlerinde, kalıcı kayma mukavemeti açısı efektif gerilmeden bağımsızdır. Kil mineralleri dışındaki minerallerin (kuvars, feldispat, kalsit gibi) kalıcı mukavemet açıları ise, efektif normal gerilmeden önemli ölçüde etkilenmez. (Mitchell, 1993).

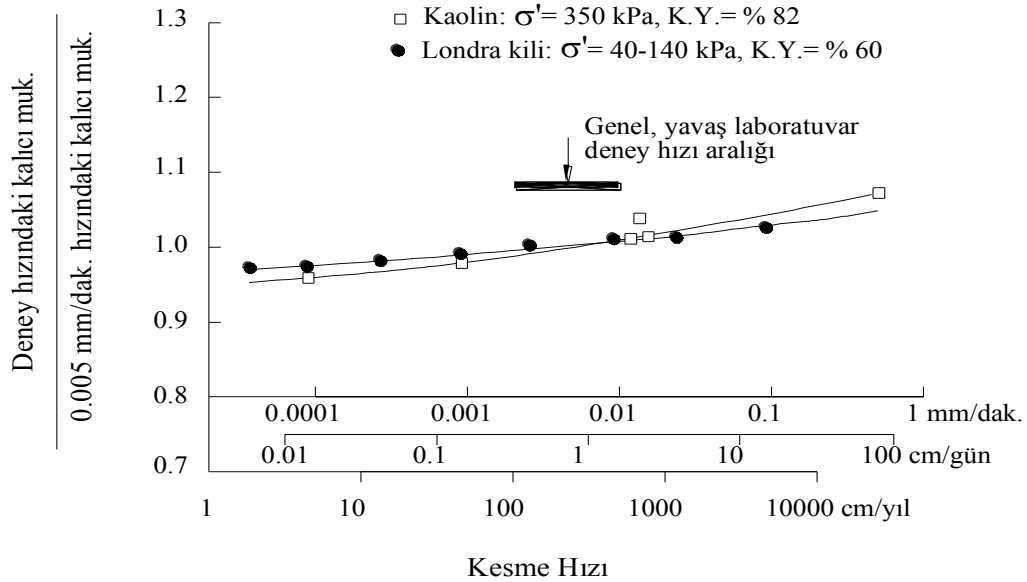
Kalıcı göçme zarfındaki eğrilik, özellikle kil yüzdesi %50'den fazla olan ve %60-220 arasında likit limite sahip zeminlerde söz konusudur (Stark, 1994).

2.7.4 Kesme hızının etkisi

Önceden varolan kayma yüzeylerindeki hızlar, yeniden aktif hale geçmiş heyelanlardaki çok yavaş hareketlerden, depremlerle uyarılan çok hızlı hareketlere kadar değişiklik gösterebilirler. Bu yüzden, kayma hızının etkisinin bilinmesi, kalıcı mukavemet çalışmalarının önemli bir parçasıdır. Aşağıda kesme hızının etkisi incelenmektedir.

- **Düşük hızlar**

Skempton (1985) tarafından iki ayrı kil numune üzerinde 0.0001 ile 1.0 mm/dak arasında değişen kesme hızlarında yapılan deney sonuçları Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17 Killerin kalıcı mukavemetlerinin yavaş kesme hızları ile değişimleri (Skempton, 1985)

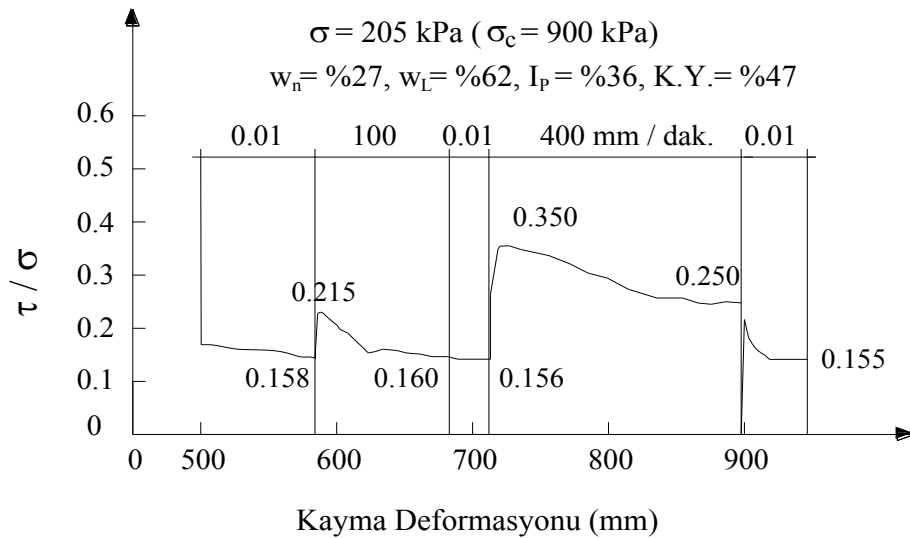
Görüldüğü gibi yavaş (0.002–0.01 mm/dak) laboratuvar deneylerindeki mukavemet değişimleri önemsizdir. Yeniden aktif hale geçen toprak kaymalarından, en yüksek ortalama hızın 50 cm/gün ve en düşük ortalama hızın 5 cm/yıl civarında olduğu bilinmektedir. Eğer standart laboratuvar hızı olarak 0.005 mm/dak alınırsa Tablo 2.5’den görüldüğü gibi tüm bu aralıktaki mukavemet sapmaları, -%3 ile +%5 arasındadır. Dolayısıyla, tüm bu aralıktaki değişen hızlardaki kalıcı mukavemet değeri olarak, yavaş laboratuvar hızı ile belirlenen mukavemet değeri alınabilir ve laboratuvar ile geri analiz mukavemetleri doğrudan kıyaslanabilir.

Tablo 2.5 Geri analiz ve laboratuvar kalıcı mukavemetlerinin karşılaştırılması (Skempton, 1985)

Hız Değişimi	Hız Değeri	Kalıcı 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

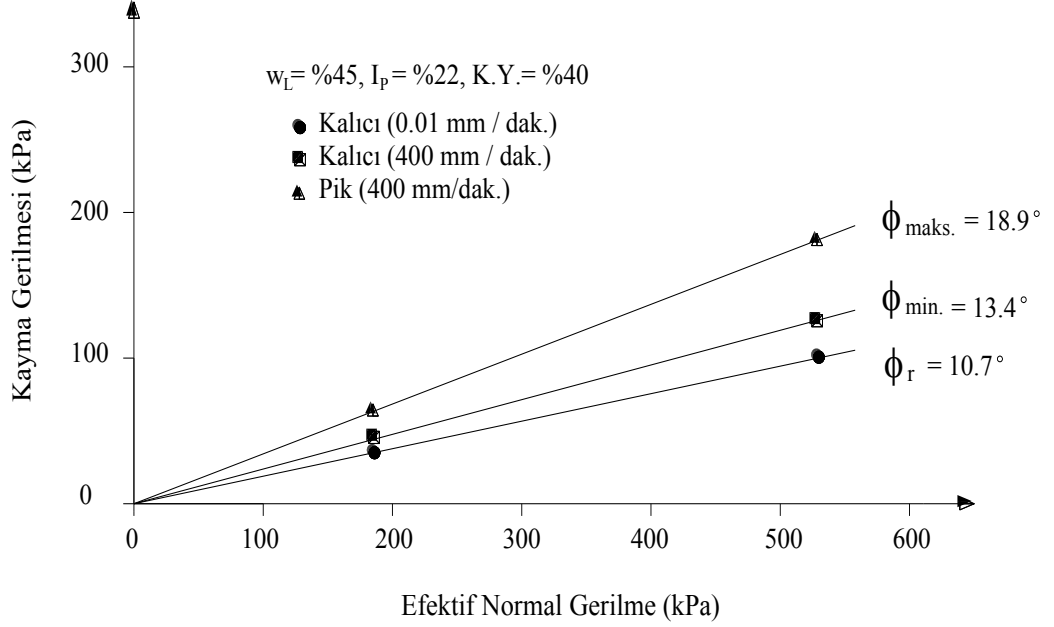
- Yüksek hızlar**

Yüksek kesme hızlarının kalıcı kayma mukavemetine etkisini incelemek için numuneler, plastik limite gelmesi için yoğrulmuş ve 900 kPa değerindeki gerilme altında konsolide edildikten sonra, 200 ile 500 kPa arasındaki gerilme değerleri altında, halka kesme aletinde deneye tabi tutulmuşlardır. Deneyler boyunca su muhtevası, plastik limit seviyesinde veya biraz aşağısında olmuştur. Yavaş hızdaki kalıcı mukavemet, ilk olarak 0.01 mm/dak'lık kesme hızıyla elde edilmiştir. Daha sonra hız 100 mm/dak'ya artırılmış ve düzgün bir konum elde edilinceye kadar tutulmuştur. Boşluk suyu basıncını yok etmek için yeterince bekledikten sonra 0.01 mm/dak'lık hız yeniden uygulanmıştır. Daha sonra hız yeniden başka bir yüksek hız değerine (400 mm/dak) artırılmıştır. Şekil 2.18'de hız etkisinin araştırılması amacıyla, yüksek kil yüzdeli (K.Y.= %47) bir numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi gösterilmiştir.

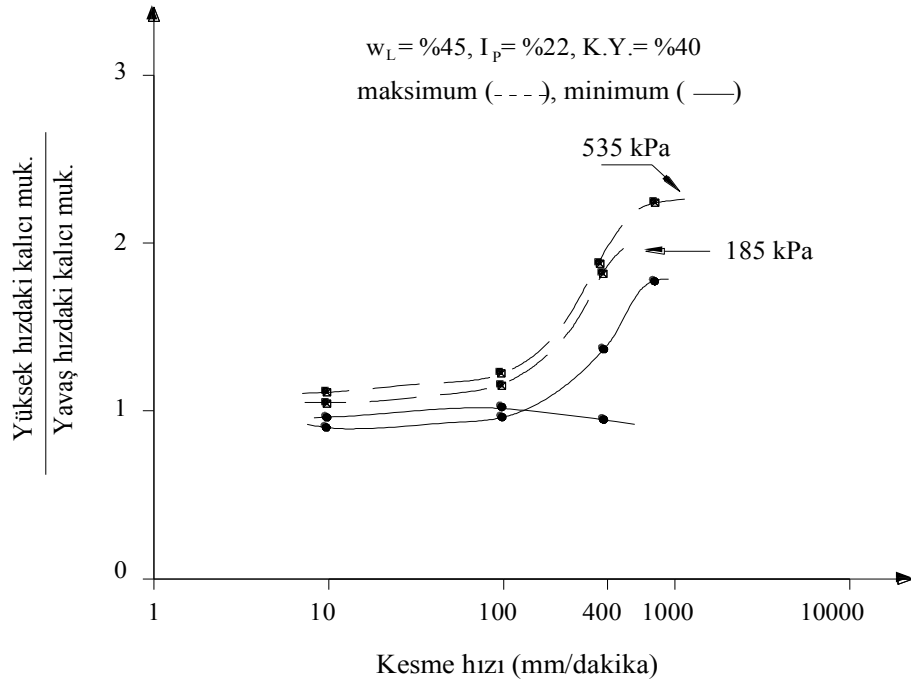


Şekil 2.18 Kil yüzdesi yüksek zeminlerde, yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985)

Kil yüzdesi yüksek zeminlerde, kalıcı mukavemette kayda değer bir değişme, 100 mm/dak'yı aşan hızlarda görülmüştür. Şekil 2.19 ve Şekil 2.20'de, farklı iki normal gerilme altında yapılan halka kesme deneyleri ile elde edilen göçme zarfları ve yüksek hızlarda elde edilen mukavemetlerin, yavaş kalıcı mukavemete oranlarının kesme hızı ile değişimi gösterilmiştir.

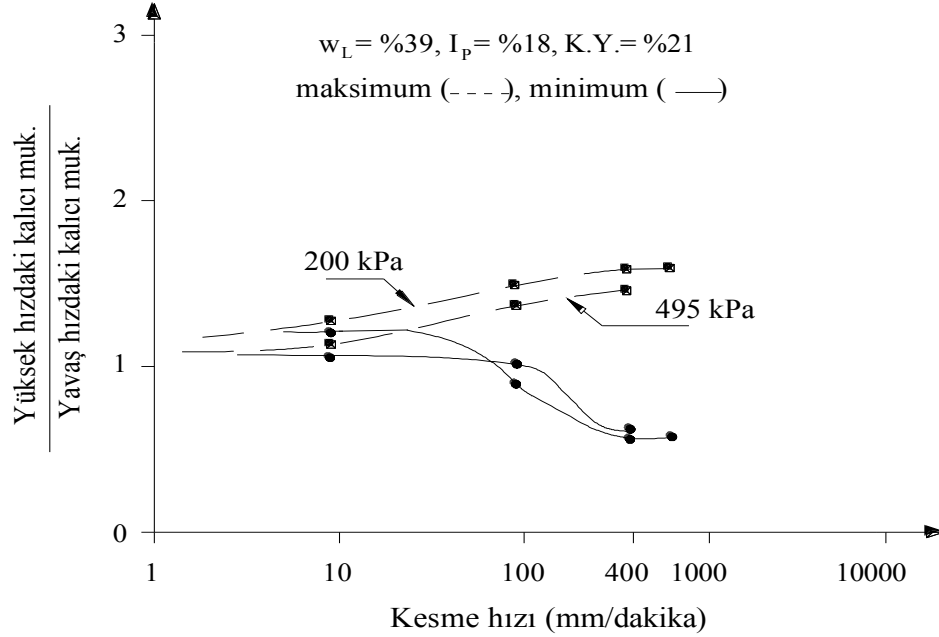


Şekil 2.19 Halka kesme deneyleri ile elde edilen göçme zarfları (Skempton, 1985)



Şekil 2.20 Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985)

Farklı iki gerilme altındaki silt taşlarında (K.Y.=%21), yüksek kesme hızının kalıcı mukavemete etkisi, yapılan halka kesme deneyleri ile Şekil 2.21’de gösterilmektedir. Ayrıca düşük kil yüzdeli silt taşlarında (K.Y.=%3), 800 mm/dak’lık hızlarda bile kalıcı mukavemet açısından önemli bir değişikliğin olmadığı görülmüştür.

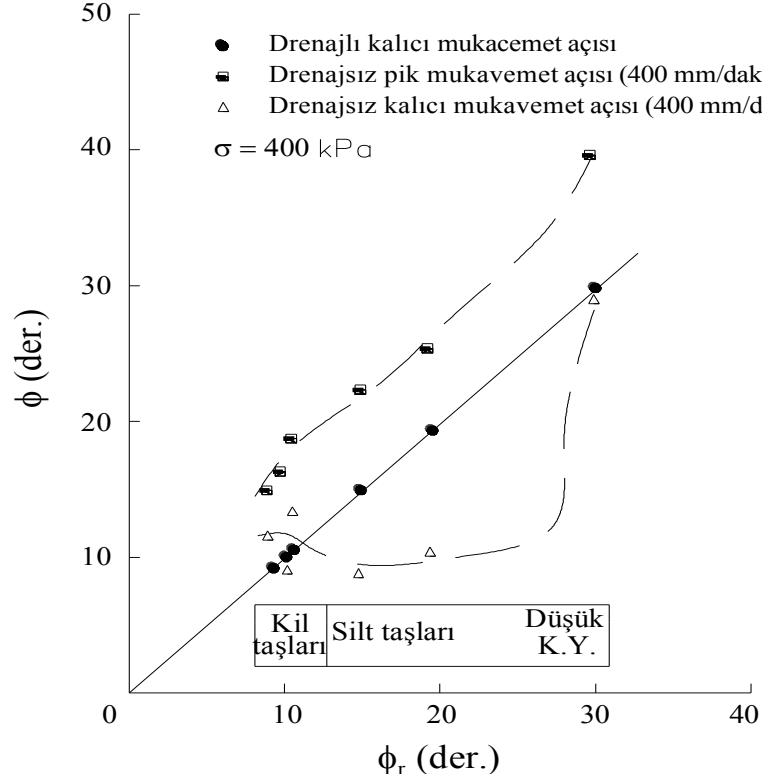


Şekil 2.21 Yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985)

Lemos (1985), farklı kil yüzdeli zeminlerde yaptığı halka kesme deneylerinde, yüksek kesme hızlarının kalıcı mukavemete etkisini incelemiş ve kesme hızının, kil yüzdesine bağlı olarak üç farklı etki gösterdiğini belirlemiştir. Bu sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- %50’den daha fazla kil yüzdesine sahip zeminlerde, kesme hızı arttıkça, kalıcı mukavemet açısı artar (pozitif hız etkisi) veya azalır (negatif hız etkisi).
- %25-50 arasında kil yüzdesine sahip zeminlerde, kesme hızı arttıkça, kalıcı mukavemet açısı azalmaktadır (negatif hız etkisi).
- %25’den daha az kil yüzdesine sahip zeminlerde, kesme hızı arttıkça, kalıcı mukavemet açısı azalır (negatif hız etkisi) veya değişmez (nötr hız etkisi). %25’den daha az kil yüzdesine sahip bazı zeminlerde ise, normal gerilme seviyesine bağlı olarak, her iki etkide görülebilir.

Hızın kil yüzdesi ile olan ilişkisi, 400 kPa değerindeki normal gerilme altında ve 400 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılan halka kesme deneyleri ile Şekil 2.22’de gösterilmiştir (Skempton, 1985).



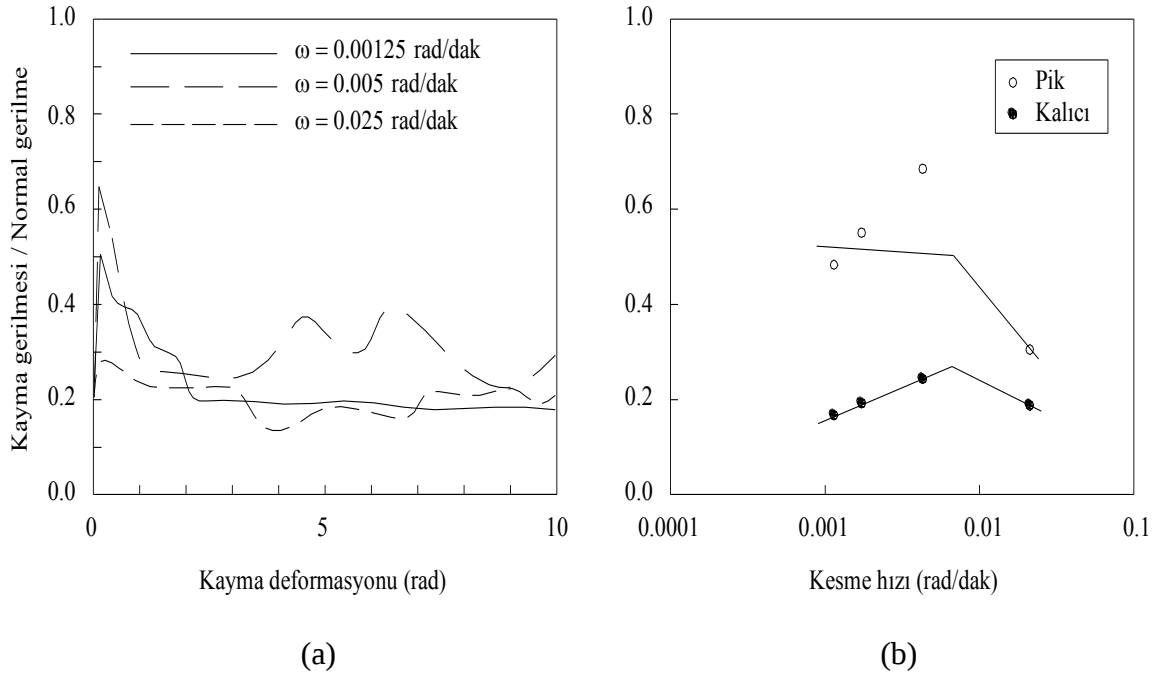
Şekil 2.22 400 mm/dak değerindeki kesme hızının kalıcı mukavemete etkisi (Skempton, 1985)

Suzuki (2001), kaolin ve çamurtaşı numunelerinde, 0.02 ile 2 mm/dak arasında değişen kesme hızlarında yaptığı halka kesme deneyleri ile hızın, kalıcı mukavemete etkisini incelemiştir. 176 kPa değerindeki normal gerilme altında bir gün süre ile konsolide edilerek hazırlanan numuneler, halka kesme deneyinde 196 kPa değerindeki normal gerilme altında kesilmiştirler. 196 kPa değerindeki düşey gerilme altında numunelerin konsolidasyonlarını tamamlamaları için yeteri süre beklenilmiştir. Numunelerin geoteknik özellikleri ve halka kesme deney sonuçları Tablo 2.6’da verilmiştir.

Tablo 2.6 Kaolin ve çamurtaşı numunelerinin halka kesme sonuçları (Suzuki,2001)

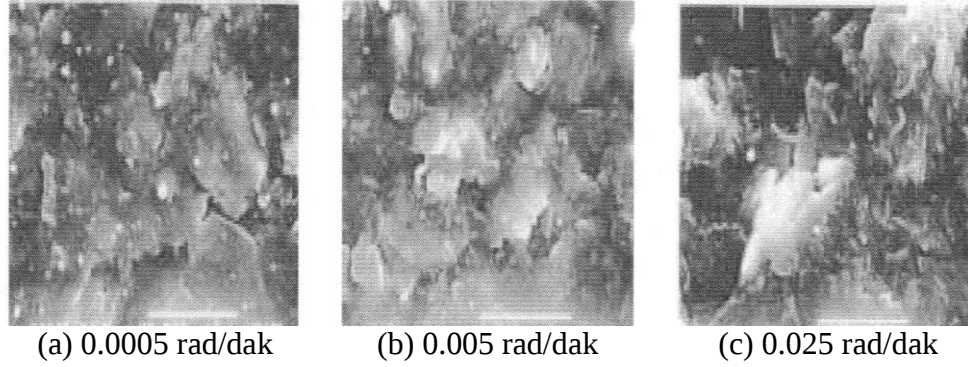
Numune	K.Y.	I _p (%)	w _L (%)	ω (rad/dak)	V (mm/dak)	τ_p (kPa)	τ_r (kPa)
Kaolin	35.3	21.8	62.0	0.0005	0.02	98.5	33.6
				0.0025	0.10	97.8	35.8
				0.005	0.20	100.2	40.2
				0.025	1.00	99.0	43.0
				0.05	2.00	87.8	42.5
Çamurtaşı	24.0	25.5	63.0	0.0013	0.05	91.6	31.2
				0.0025	0.10	99.5	38.1
				0.005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

Şekil 2.23, çamurtaşı numunesi için halka kesme deneylerinden elde edilen τ/σ oranı ile açısıl kayma deformasyonu ve açısıl kesme hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Suzuki, 2001).



Şekil 2.23 (a) Çamurtaşı için τ/σ oranı ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki
(b) Çamurtaşı için τ/σ oranı ile açısıl hız arasındaki ilişki (Suzuki, 2001)

Kaolin numunesinin, 0.0005-0.005 ve 0.025 rad/dak değerlerindeki kesme hızlarında elde edilen kalıcı durumları sonucunda elektron mikroskopu altındaki görünüşleri Şekil 2.24'te verilmiştir.



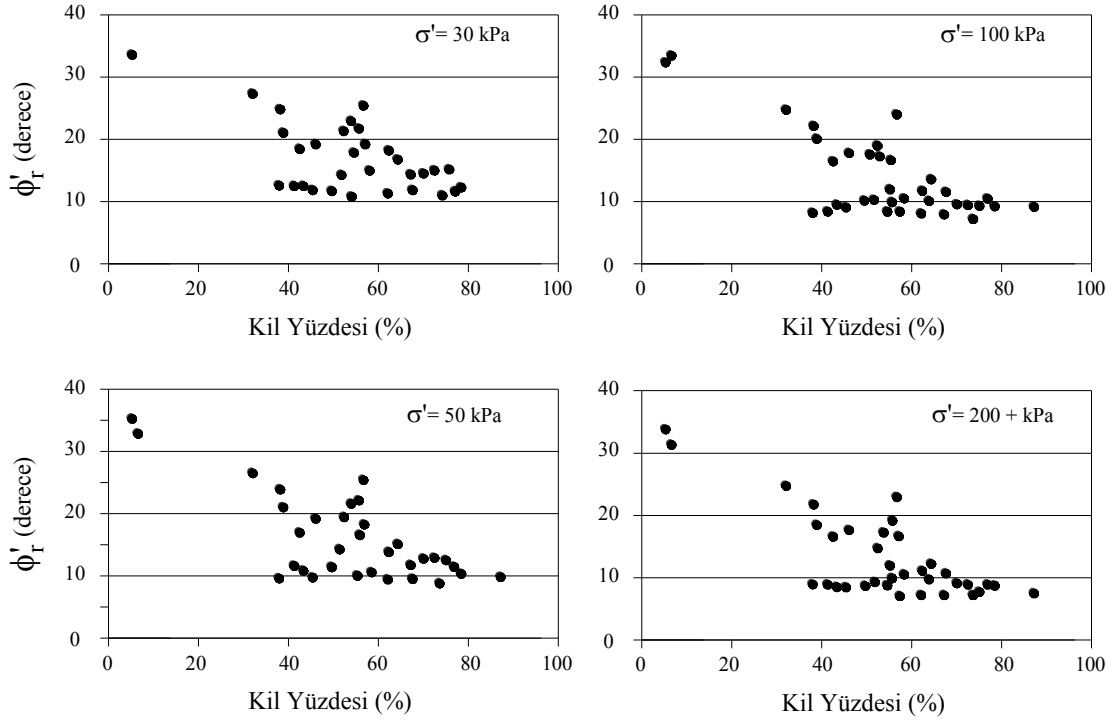
Şekil 2.24 Kaolinin farklı kesme hızlarında elde edilen kalıcı durumları için elektron mikroskopu altındaki görünüşleri

Şekillerden görüldüğü gibi, hız arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Dolayısıyla, kalıcı mukavemetin kesme hızı ile değişimi, kayma yüzeyinin pürüzlülüğü ile ilgili görülmektedir.

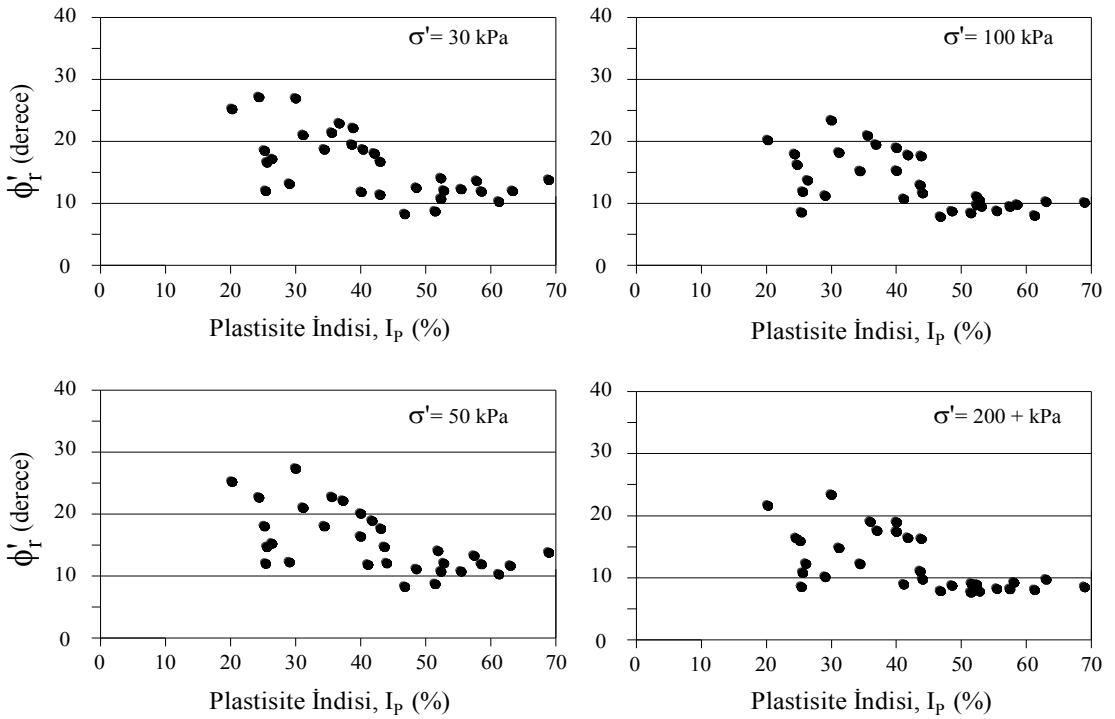
2.8 Kalıcı Mukavemet Açısı ile Endeks Özellikleri Arasındaki İlişkiler

Zeminlerin drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısı (ϕ_r') ile kil yüzdesi ve/veya kıvam limitleri arasında birçok ilişkilendirmeler yapılmıştır. Bunlardan ilki, Skempton tarafından 1964 yılında yapılmıştır. Bunu daha sonraları birçokları takip etmiştir. Lupini (1981), Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), Stark (1994) ve Wesley (2003) bu amaçlı araştırma yapanların ileri gelenlerindendirler. Aşağıda bu araştırmalar özet olarak verilmiştir.

Skempton (1964), dört farklı efektif normal gerilme için ϕ_r' değerinin, kil yüzdesi ve plastisite indisiyle değişimini sırasıyla Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da incelemiştir. Üzerinde deney yapılan numunelerin çoğu kilce zengin ve plastisite indisleri %20'den daha büyüktür.



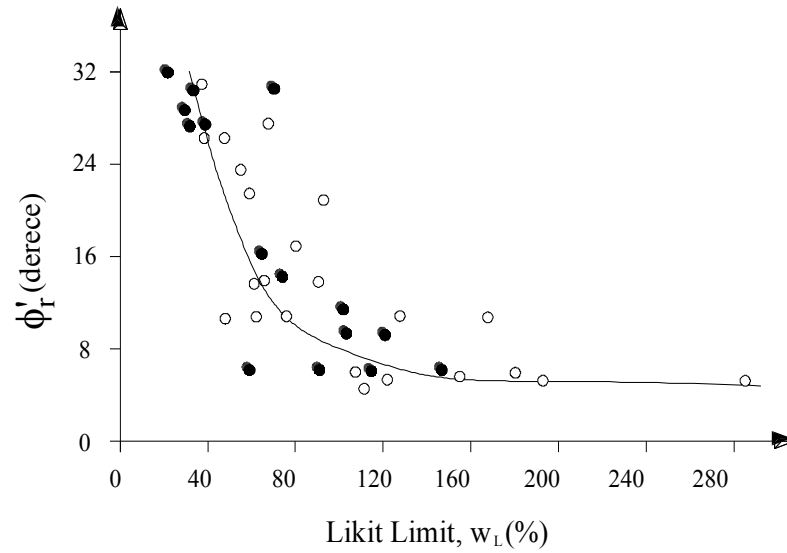
Şekil 2.25 Kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesiyle değişimi (Skempton,1964)



Şekil 2.26 Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisiyle değişimi (Skempton, 1964)

Şekillerden görüldüğü gibi, %60'dan fazla kil yüzdesine veya %45'den büyük plastisite indisine sahip zeminlerin düşük kalıcı mukavemetleri vardır ve genellikle az bir dağılım gösterirler. Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan zeminlerin çoğu %35-60 arası kil yüzdesine ve/veya %25-45 arası plastisite indisine sahiptirler. Böyle zeminler geniş bir kalıcı mukavemet dağılımı gösterirler. Dolayısıyla bu tür zeminlerde korelasyonların uygun olmadığı sonucu çıkarılabilir.

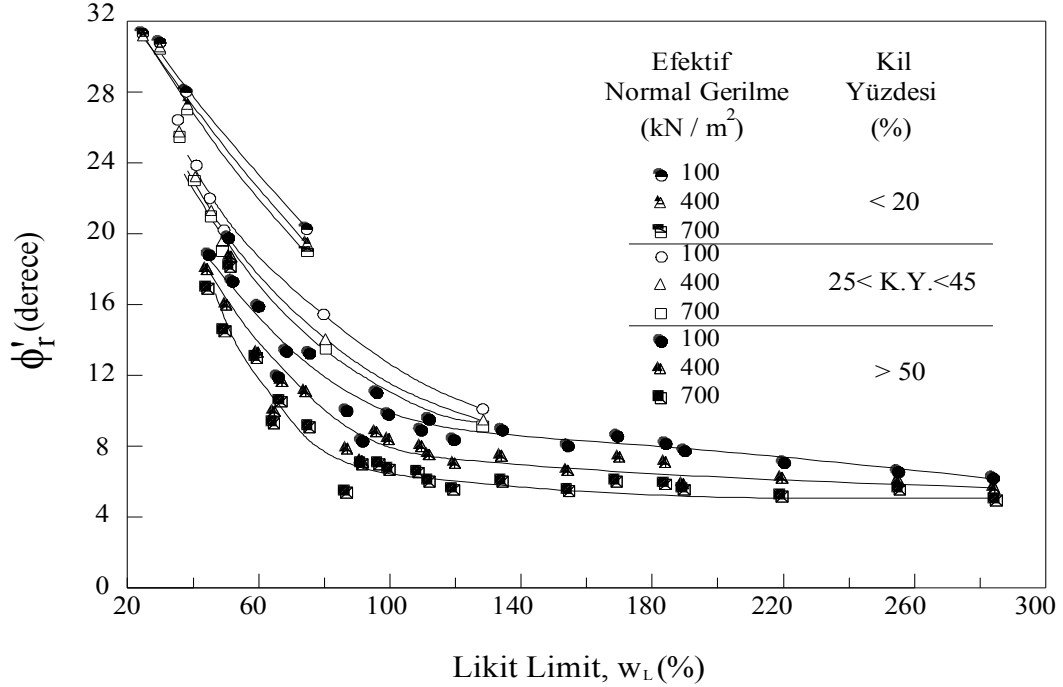
Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), aşırı konsolide kil şeyller üzerinde, 0.0005 mm/dak'lık kesme hızında tekrarlı kesme kutusu deneyleri yaparak, kalıcı mukavemet açısı ile likit limit arasında Şekil 2.27'de gösterilen ilişkiyi elde etmişlerdir.



Şekil 2.27 Kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimi (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986)

Şekilden görüldüğü gibi artan likit limit ile kalıcı mukavemet açısı azalmakta ve likit limit değerinin %160'dan daha büyük olması kalıcı mukavemet açısında önemli bir azalmaya neden olmamaktadır (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).

T.D.Stark (1994), 0.018 mm/dak'lık kesme hızında halka kesme deneyleri yaparak, kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit, kil yüzdesi ve efektif normal gerilme arasında yeni bir ilişki geliştirmiştir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile w_L , K.Y. ve σ' arasındaki ilişki (Stark, 1994)

Belirli bir efektif normal gerilme değeri için kohezyonlu zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açıları, likit limit-kil yüzdesi ve Şekil 2.28'deki eğrilerin enterpolasyonu ile belirlenebilir. Ayrıca bu şekilden, 100-400 ve 700 kPa değerlerindeki efektif normal gerilmelerdeki ϕ'_r değerleri belirlenerek, bu değerlere karşılık gelen kayma gerilmeleri belirlenebilir. Böylece kayma gerilmesi-normal gerilme grafiği çizilerek doğrusal olmayan kalıcı göçme zarfı tahmin edilebilir.

Stark (1994), drenajlı kalıcı kayma mukavemeti açısı hesaplanırken likit limit ve kil yüzdesinin birlikte kullanılmasının önemini açıklamak için, varolan korelasyonları Gardiner Dam (Kanada'nın batısında) ve Portuguese Bend (Los Angeles, Calif yakınlarında) heyelanlarına uygulayarak, Tablo 2.7'de bu korelasyonların bir karşılaştırmasını yapmıştır. Gardiner Dam ve Portuguese Bend heyelanları için yapılan halka kesme deney sonuçlarından güvenlik sayıları sırasıyla 1.01 ve 1.02 olarak belirlenmiştir.

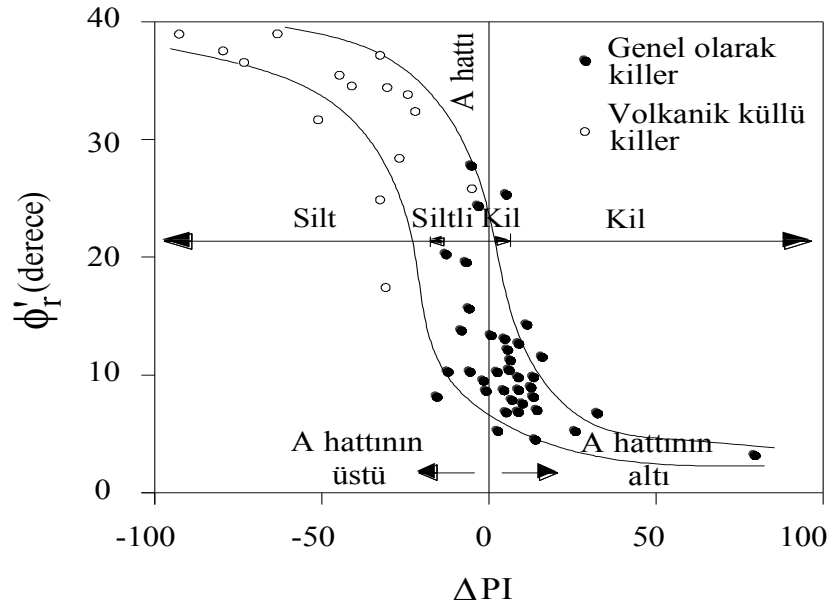
Tablo 2.7 Drenajlı kalıcı kayma mukavemeti için mevcut deneysel korelasyonların karşılaştırılması (Stark, 1994)

Kullanılan Endeks Özellikleri	Kaynak	Gardiner Dam $w_L = \%128$, $I_p = \%27$ ve Kil Yüzdesi $=\%43$		Portuguese Bend $w_L = \%98$, $I_p = \%37$ ve Kil Yüzdesi $=\%68$	
		ϕ_r' (der.)	Güvenlik Sayısı	ϕ_r' (der.)	Güvenlik Sayısı
Likit Limit ve Kil Yüzdesi	Stark (1994)	9.8	1.02	6.9	1.04
Kil Yüzdesi	Skempton (1964)	18.0	1.91	12.3	1.67
	Borowicka (1965)	7.5	0.77	7.5	1.12
	Binnie (1967)	15.2	1.61	11.5	1.58
	Blondeau ve Josseume (1976)	12.6	1.31	7.0	1.06
	Lupini (1981)	13.4	1.41	4.9	0.81
	Skempton (1985)	-	-	11.1	1.53
	Collotta (1989)	11.8	1.23	7.8	1.15
Plastisite İndisi	Fleischer (1972)	9.1	0.94	9.1	1.30
	Voight (1973)	6.3	0.65	9.8	1.38
	Kanji (1974)	6.0	0.61	7.5	1.12
	Bucher (1975)	-	-	-	-
	Mitchell (1976)	10.9	1.13	11.6	1.59
	Seycek (1978)	7.8	0.81	9.6	1.36
	Vaughan (1978)	-	-	-	-
	Lambe (1985)	-	-	-	-
	Clemente (1992)	11.6	1.21	11.6	1.59
Likit Limit	Haefeli (1951)	-	-	-	-
	Mitchell (1976)	13.0	1.36	13.0	1.75
	Mesri&Cepeda (1986)	9.4	0.97	8.0	1.18

* Söz konusu korelasyonlar, bu endeks özelliklerine sahip zeminlerde uygulanamaz.

L.D.Wesley (2003), kohezyonlu zeminlerin özelliklerinin, likit limit yada plastisite indisinden herhangi birinin olmadığı bir ilişkiyle ifade edilemeyeceğini belirterek, önceki araştırmalara bir eleştiri getirmiştir. Bu görüşünü de, Casagrande tarafından oluşturulan ve ince daneli zeminlerin benzer mühendislik özelliklerine göre sınıflandırılmasında kullanılan plastisite tablosunu örnek göstererek savunmuştur. Bu tablodan, aynı likit limit ya da aynı plastisite indisine sahip zeminlerin çok farklı özellikler gösterebileceği, dolayısıyla farklı gruplarda yer alabileceği buna karşın farklı plastisite indisi ve farklı likit limit değerine sahip zeminlerin aynı gruba dahil olabileceği bilinmektedir. Wesley, kalıcı mukavemet içinde genel korelasyonlara götürenin, zeminin plastisite tablosundaki yeri olduğunu ifade eder.

Wesley, likit limit değeri 50'nin üstündeki zeminler için ϕ_r' değerinin, plastisite kartındaki A çizgisiyle ilişkili olduğunu görmüş ve A hattının altındaki ve üstündeki mesafeye (ΔPI) karşı ϕ_r' değerlerinin değişimini incelemiştir (Şekil 2.29). Burada, $\Delta PI = PI - 0.73 (LL-20)$ değerindedir.



Şekil 2.29 Kalıcı kayma mukavemeti açısının ΔPI ile değişimi (Wesley, 2003)

Bu grafikteki kil ve silt gibi terimler dane boyutuna göre değil, kil veya silt özelliği gösteren zeminler için kullanılmıştır. Bu şekilden, A çizgisinin çok üstünde kalan zeminlerin çok düşük kalıcı mukavemet açısına sahip olmaları, A çizgisinin çok altında kalanların ise çok yüksek ϕ_r' değerine sahip olmaları beklenebilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için farklı kil yüzdesine sahip numuneler üzerinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına kesme hızının etkisini incelemek amacıyla halka kesme deneyleri beş değişik kesme hızında (25, 50, 100, 200 ve 400 mm/dak) tekrarlanmıştır. Aynı numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri de yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Gerek halka kesme gerekse kesme kutusu deneyleri, hazırlanmış numuneler üzerinde 200, 300 ve 400 kPa normal gerilme değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Her gerilme altında numuneler iki gün konsolidasyona bırakılmış ve belirlenen kesme hızında kesilmiştir. Bu çalışma kapsamında, her setin üç deney içerdiği 18 set halka kesme ve 4 set tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Aşağıda deneysel çalışmada kullanılan deney yöntemleri ve deneylerde kullanılan numunelerin özellikleri verilmiştir.

3.1 Halka Kesme Deney Aleti

Halka kesme deneyi, zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemede kullanılan en uygun laboratuvar deney yöntemidir (Bishop, 1971; Lupini, 1981). Bu çalışmada ağırlıklı olarak İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.1’de gösterilen Seiken inco./DTC-138 model halka kesme aleti kullanılmıştır. Bu deney yönteminde, verilen bir normal gerilme altında, yatay düzlem üzerindeki halka şeklindeki numune, aletin alt yarısının sabit olan üst yarısına göre döndürülmesiyle, numunenin 2 yarısı arasındaki kayma yerdeğiştirmesinin büyüklüğünde hiçbir sınır olmaksızın kesilmektedir. Şekil 3.1’de gösterilen halka kesme aletinin minimum kesme hızı 20 mm/dak ve maksimum hızı 2000 mm/dak olup, kesme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçme olanağı bulunmamaktadır (Seiken inco.,1994). Deney sisteminde; dış çapı 150 mm, iç çapı 100 mm ve kalınlığı 20 mm olan halka şeklindeki numuneler kullanılmaktadır. Numune kesit alanı 98.17 cm^2 dir.

Deney sırasında açısız deplasmana göre, kesme kuvveti, düşey sürtünme kuvveti, düşey deplasman ve düşey gerilme sürekli olarak 4 kanallı amplifikatörden okunabilmektedir.

Numuneye uygulanabilecek en büyük düşey gerilme değeri 500 kPa değerindedir. Kesme kuvveti yük hücresinin kapasitesi 2 kN olup, numune üzerinde oluşan en büyük kayma gerilmesi yaklaşık 650 kPa değerindedir. Sistemin algılayabileceği en büyük düşey sürtünme kuvveti değeri ise 1 kN'dur.



Şekil 3.1 İ.T.Ü. halka kesme deney aleti

3.2 Kesme Kutusu Deney Aleti

Zeminlerin kayma mukavemetlerini belirlemede kullanılan laboratuvar deney yöntemleri içerisinde en eski olanı, doğrudan kesme kutusu deneyidir. Sabit düşey yük altında konsolide edilen numune, sabit bir kesme deformasyonu hızı ile ortasından geçen düzlem boyunca kesilmeye zorlanır. Farklı düşey yükler altında bu işlem tekrarlanarak zeminin göçme zarfı elde edilir. Bu çalışmada, kalıcı mukavemeti belirlemek amacıyla 60 mm x 60 mm en kesitli kesme kutusu kullanılmıştır. Kesme işlemi 0.035 mm/dak değerindeki sabit deformasyon hızı ile

gerçekleştirilmiştir. Kalıcı mukavemeti belirlemek amacıyla, kesme işlemi 12 mm yerdeğiştirme sonucu tamamlandığından, kesme kutusu geri çekilerek aynı yönde numune yeniden kesilmiştir. Bu çalışmada tekrarlı yapılan kesme kutusu deneylerinde 3. çevrimler sonucu elde edilen kayma gerilmeleri dikkate alınarak kalıcı kayma mukavemeti açısı belirlenmiştir. Her çevrim sonunda, numune etkisi altındaki düşey gerilmeye bir gün süre ile bekletilmiştir.

3.3 Deney Numunelerinin Geoteknik Özellikleri

Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılan numunelerin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla numuneler üzerinde ıslak elek ve hidrometre analizleri, likit ve plastik limit deneyleri, dane birim hacim ağırlığı deneyleri, standart kompaksiyon deneyleri, konsolidasyon deneyleri ve relatif sıkılık deneyi yapılmıştır. Yapılan sınıflandırma deneyleri sonucunda, numunelerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sisteminde yer aldığı gruplar belirlenmiştir.

Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılan kohezyonlu numunelerin (N-1, N-2 ve N-3) geoteknik özellikleri Tablo 3.1’de, iri daneli (N-4) numuneye ait geoteknik özellikler ise Tablo 3.2’de verilmiştir. Ayrıca, bu geoteknik özellikleri belirlemek amacıyla yapılan deneylere ait grafik ve hesaplamalar EK-A’da verilmiştir.

Tablo 3.1 Kohezyonlu numunelerin geoteknik özellikleri

Numune No.	N-1	N-2	N-3
Çakıl Yüzdesi	0	0	0
Kum Yüzdesi	11	3	7
Silt Yüzdesi	71	75	60
Kil Yüzdesi	17	22	33
Plastik Limit (%)	17	22	26
Likit Limit (%)	40	57	74
Plastisite İndisi (%)	23	35	48
Zemin Sınıfı	CL	CH	CH
Dane Özgül Ağırlığı	2.68	2.70	2.73
Optimum Su Muhtevası (%)	20	23	25
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı, $\gamma_{kmaks}(kN/m^3)$	16.3	15.8	14.9

Tablo 3.2 İri daneli numunenin geoteknik özellikleri

Numune No	N-4
Çakıl Yüzdesi	0
Kum Yüzdesi	100
Silt Yüzdesi	0
Kil Yüzdesi	0
Zemin Sınıfı	SP
Dane Özgöl Ağırlığı, G_s	2.64
e_{maks}	0.8
e_{min}	0.6

3.4 Deney Numunelerinin Hazırlanışı

Etüvde kurutularak 4 No'lu (A.S.T.M.) elekten elenen kohezyonlu deney numunelerinin optimum su muhtevaları, Standart Proctor deneyi ile belirlendikten sonra, bu su muhtevalarındaki numuneler, Standart Proctor enerjisi kullanılarak modifiye Proctor kalıbında hazırlanmışlardır. Standart Proctor enerjisini (594 kN-m/m³), modifiye Proctor kalıbında elde edebilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$E_{standart} = (M.H.L.N) / V \quad (3.1)$$

Bu formüldeki semboller aşağıda belirtildiği gibidir.

- E : Enerji
M : Tokmak ağırlığı
H : Tokmanın düşüş yüksekliği
L : Tabaka sayısı
N : Her tabakaya yapılan vuruş sayısı
V : Proktor kalıbının hacmi

Standart Proctor enerjisi; modifiye Proctor kalıbında, 3 tabaka ve her tabakaya standart Proctor tokmağı ile yapılan 56 vuruş sonucunda elde edilmiştir.

İri daneli numune (N-4) ise, %50 relatif sıkılıkta hazırlanmıştır.

Aşağıda, modifiye Proctor kalıbında sıkıştırılan numunelerin, halka kesme deneyinde kullanılmak üzere halka şekline getirilişi anlatılmıştır.

1) Modifiye Proctor kalıbından çıkarılan numune, bir ağırlık yardımıyla, 150 mm çapında ve 40 mm yüksekliğindeki numune hazırlama dış ringine batırılır (Şekil 3.2a). Tel testere yardımıyla, ringin dışında kalan numune kesilir (Şekil 3.2b). Böylece dış ring içerisinde, yüksekliği 40 mm olan numune kalır (Şekil 3.2c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.2 Numunenin kalıptan çıkarılması ve dış ringe alınması

2) Ring içerisindeki bu zeminin, alttan ve üstten 10 mm yüksekliğindeki kısımları kesilerek atılır. Bunun nedeni, sıkıştırma esnasında oluşturulan tabaka yüzeylerinin, deneyde kullanılacak numune içerisinde yer almamasını sağlamaktır. Bunun için, 150 mm çapında ve 10 mm yüksekliğindeki içi dolu dairesel metal parça dış ring içerisine geçirilir. Böylece zeminin 10 mm yüksekliğindeki kısmı dışarı çıkarılır (Şekil 3.3a) ve tel testere yardımıyla, kesilerek atılır (Şekil 3.3b). Bu yüzey düzleştirildikten sonra, aynı işlem ringin diğer yüzeyine de uygulanır. Böylece dış ring içerisinde, yüksekliği 20 mm olan numune kalır (Şekil 3.3c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3 Numunenin gerçek yüksekliğine getirilmesi

3) Dış ring içerisinde kalan numuneyi, dış çapı 150 mm ve iç çapı 100 mm olan halka şeklinde hazırlamak için, halkasal metal parça dış ring içerisine yerleştirilerek zeminin oyulacak olan iç kısmı belirlenir. Daha sonra, 100 mm çapındaki iç ring, zemine biraz batırılır (Şekil 3.4a). Çıkarılacak zeminin orta kısmı, bir tornavida yardımıyla oyularak atılır (Şekil 3.4b).



(a)



(b)

Şekil 3.4 Numunenin halka şekline getirilmesi

4) 100 mm çaplı iç ring zemine tamamen batırılarak 100 mm çaplı iç kısım çıkarılır (Şekil 3.5a). Zeminin 100 mm çapındaki iç kısmı oyularak çıkarıldıktan sonra, önce halkasal metal parça, daha sonra iç ring çıkarılır. Böylece dış ring içerisinde, iç çapı 100 mm ve dış çapı 150 mm olan halka şeklinde numune kalacaktır (Şekil 3.5b).



(a)

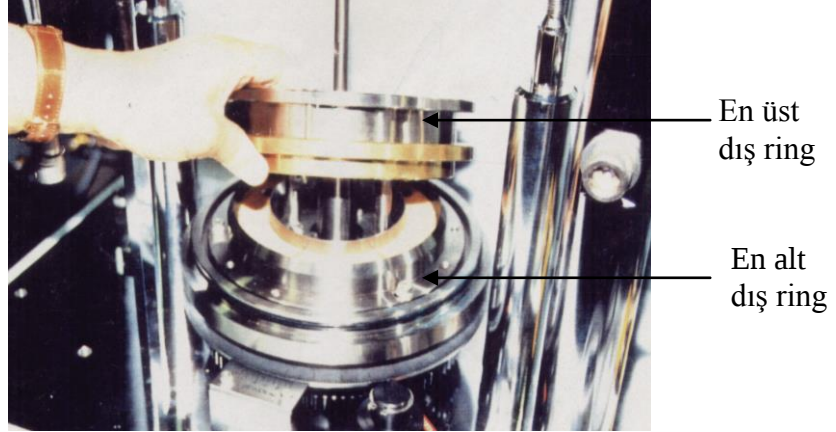


(b)

Şekil 3.5 Numunenin deneye hazır durumu

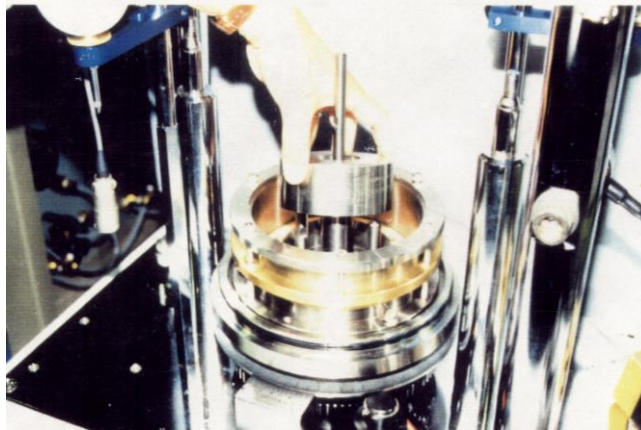
3.5 Deney Aletinin Montajı ve Deneyin Yapılışı

- 1) En üst dış ring ve sarı renkli (kılavuz) ring, sarı vidalarla (3 tane) birbirine tutturulur ve Şekil 3.6’da görüldüğü gibi en alt dış ring üzerine yerleştirilir.



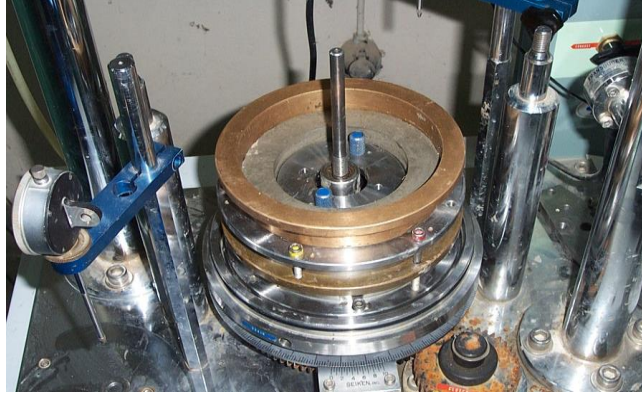
Şekil 3.6 En üst dış ve kılavuz ringlerin montajı

- 2) Şekil 3.7’de gösterilen parça, mavi renkli noktaların deliklerine mavi renkli pimler (2 tane) sokularak, iç kısma monte edilir. En üst dış ringteki deliklerin 3 tanesi kırmızı, 3 tanesi sarı ve 2 tanesi renksizdir. En üst dış ringteki renksiz 2 delik ile bu parçada bulunan diğer 2 delik aynı doğrultuda olacak şekilde, birbirine sarı vidalar ile sabitlenen en üst dış ring ve sarı renkli ring döndürülür. Daha sonra, en üst dış ring, sarı renkli ring ve en alt dış ring, kırmızı renkli vidalarla (3 tane) birbirine tutturulur. Eğer en alt dış ringteki delikler, kırmızı vida delikleriyle alt alta gelmemişse, en üst dış ring ve sarı renkli ring, 180 derece döndürülür. Böylece, hem 4 delik yine aynı doğrultuya gelmiş olacaktır, hem de en alt dış ringteki vida delikleri, kırmızı işaretli vida delikleriyle alt alta hizalanacaktır.

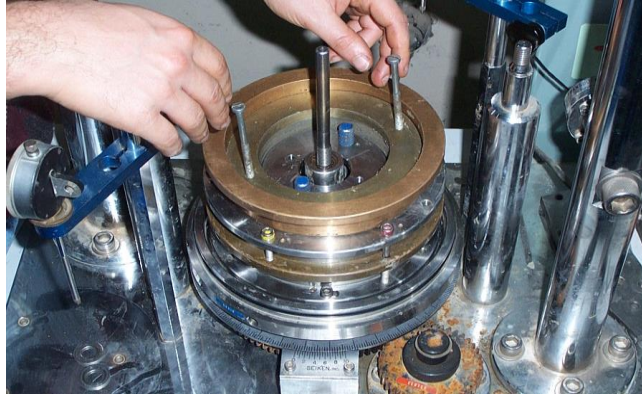


Şekil 3.7 İç ringin montajı

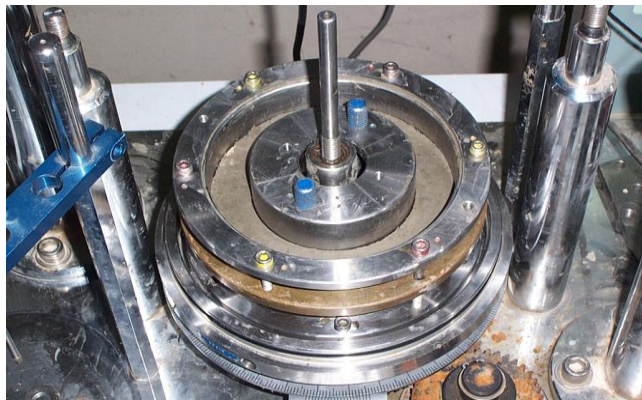
3) Numunenin yerleştirileceği bölümün yan yüzeylerini vazelinledikten ve bu kısma ıslatılmış poroz kağıt yerleştirdikten sonra, halka şeklinde kesilip hazırlanan numunenin bulunduğu ring, en üst dış ring üzerine yerleştirilir (Şekil 3.8a). Bu ring içerisindeki numune, halka şeklindeki metal parça yardımıyla itilerek halka kesme hücresine yerleştirilir (Şekil 3.8b). Numunenin üst kısmına da, daha önce su içinde bekletilerek doyurulmuş poroz kağıt konulmalıdır (Şekil 3.8c).



(a)



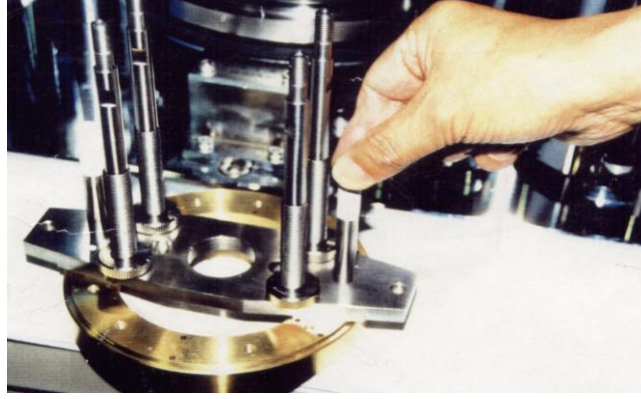
(b)



(c)

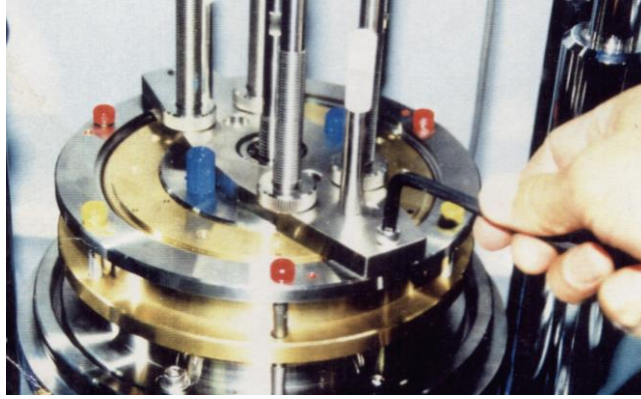
Şekil 3.8 Numunenin halka kesme deney aletine yerleştirilmesi

4) En üst iç ring ve çekme metali, beyaz renkli vidalarla birbirlerine tutturulur. Daha sonra çekme çubukları, somunlarla birlikte çekme metaline takılır (Şekil 3.9).



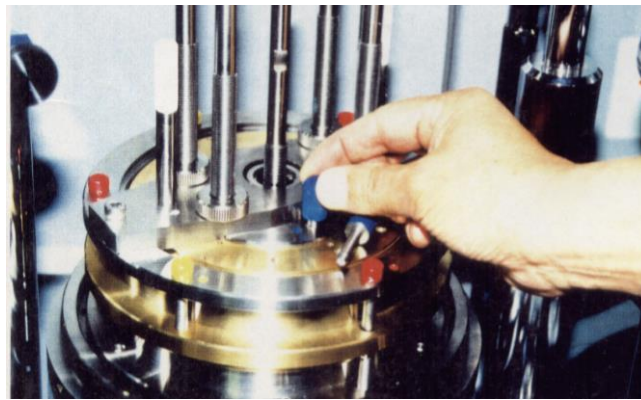
Şekil 3.9 En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının montajı

5) En üst iç ring ve çekme metali, 4 vida ile sisteme sabitlenir (Şekil 3.10).



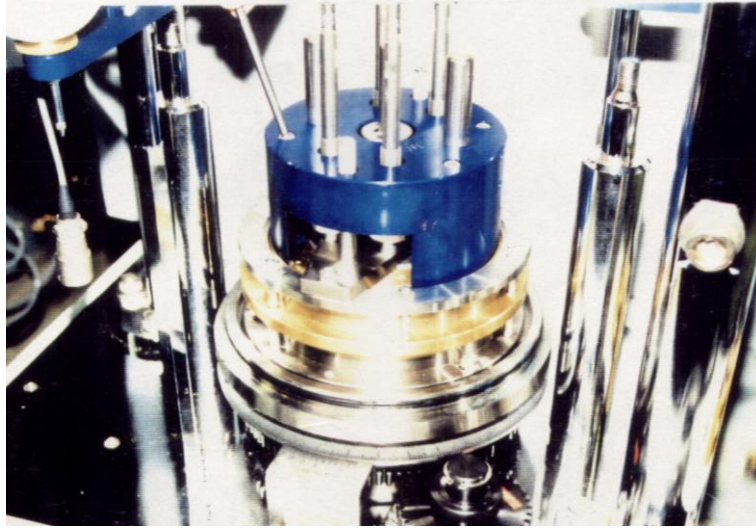
Şekil 3.10 En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının deney aletine montajı

6) 2 mavi pim çekilerek çıkarılır (Şekil 3.11).



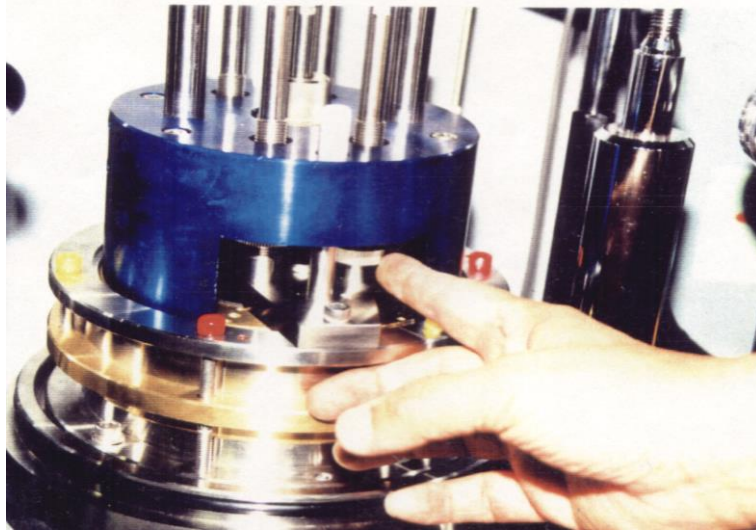
Şekil 3.11 Mavi renkli pimlerin çıkarılması

7) Mavi renkli basınç plakası yerleştirilerek, 4 vida ile sıkıştırılır (Şekil 3.12).



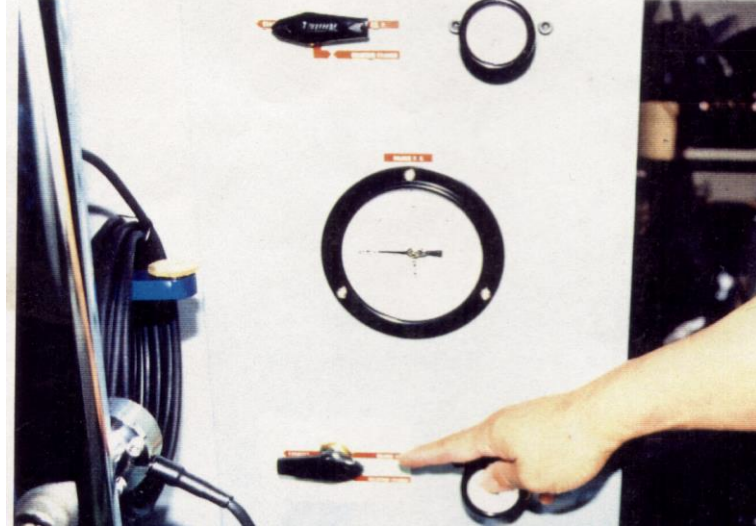
Şekil 3.12 Basınç plakasının montajı

8) Çekme çubuklarında bulunan 4 somun, sağa doğru çevrilerek mavi basınç plakasına değdirilir (Şekil 3.13).



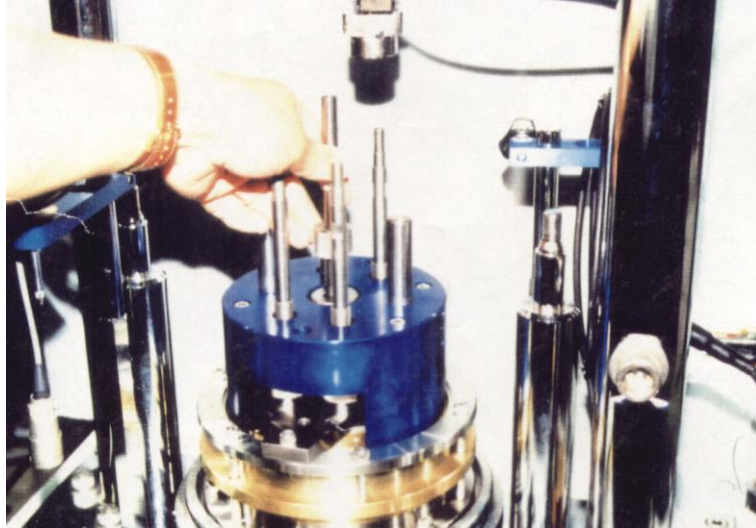
Şekil 3.13 Somunların basınç plakasına sabitlenmesi

9) Basınç uygulama panelindeki dengeleme basıncı (balancing pressure) bölümünden 0.2 kg/cm^2 değerinde basınç uygulayarak, exhaust yönündeki basınç vanası sağa çevrilir. Bu işlem sonunda mavi renkli basınç plakasının ortasındaki metal şaft (düşey yük uygulama şaftı) yukarı doğru hareket eder (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Dengeleme basıncının uygulanması

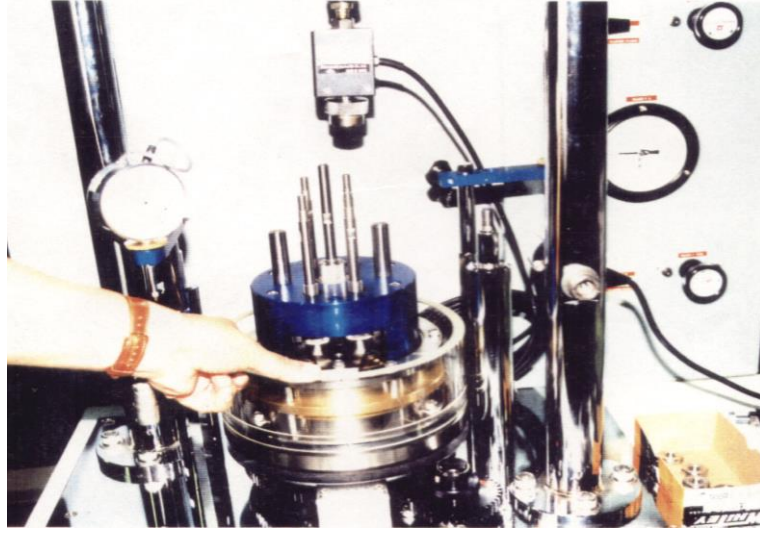
10) Şekil 3.15’de görüldüğü gibi düşey yük uygulama şaftına ve çekme metallerine (4 adet) somunlar takılır.



Şekil 3.15 Düşey yük uygulama şaftının yerleştirilmesi

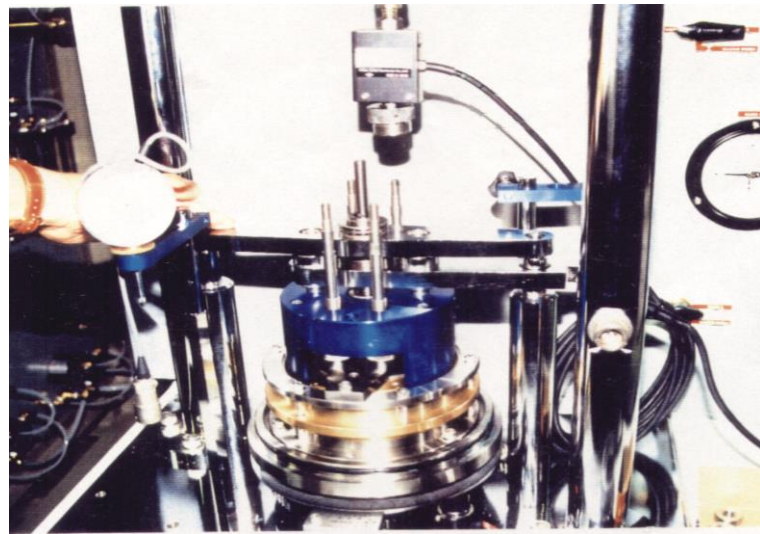
11) Dengeleme basıncı (balancing pressure) vanası sola (exhaust yönüne) çevrilir. Bu işlemden sonra ortadaki yukarı doğru hareket etmiş olan şaft, aşağı doğru inerek eski konumunu alır. Böylece ona takılan somun, mavi renkli basınç plakasına değmiş olacaktır.

12) Numuneyi doyurmak amacıyla konulacak suyu tutmaya yarayan su yatağı yerleştirilir (Şekil 3.16).



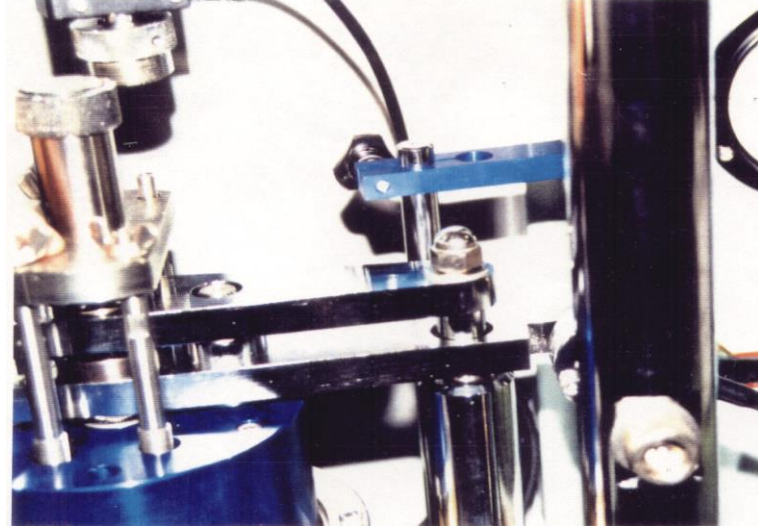
Şekil 3.16 Su yatağının yerleştirilmesi

13) Tork kolu yavaşça sisteme yerleştirilerek, uç kısımlarından somunlarla sıkıştırılır. Eğer mavi renkli basınç plakasındaki 2 metal çubuk ile tork kolunun sabitleneceği uç kısımlar aynı doğrultuda değilse, yani tork kolu yerleştirilemiyorsa, çarklar döndürülerek bunların aynı doğrultuya gelmesi sağlanır ve tork kolu yerleştirilir. Tork kolu yerleştirilirken çok dikkatli olunmalıdır. Yerleştirme esnasında mavi basınç plakası sarsılmamalı ve tork kolu mavi basınç plakası üzerindeyken çarklar ile oynanılmamalıdır (Şekil 3.17).



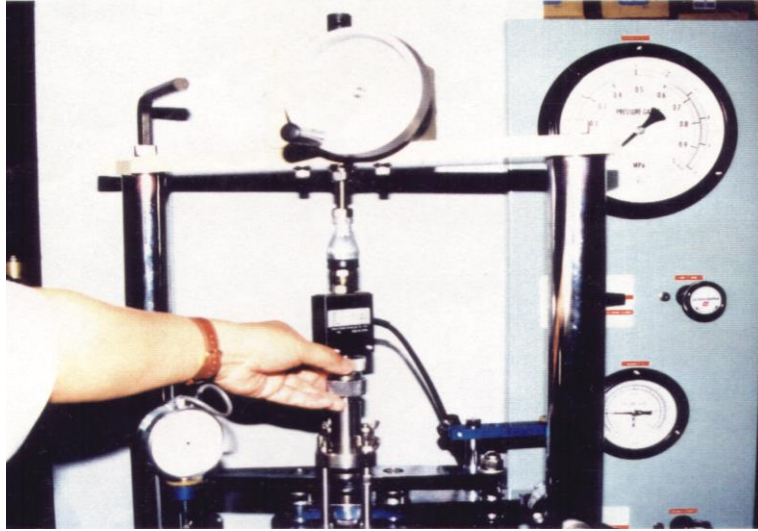
Şekil 3.17 Tork kolunun yerleştirilmesi

14) Ring çekme metali yerleştirilerek, 4 kelebek somun ile sabitlenir (Şekil 3.18).



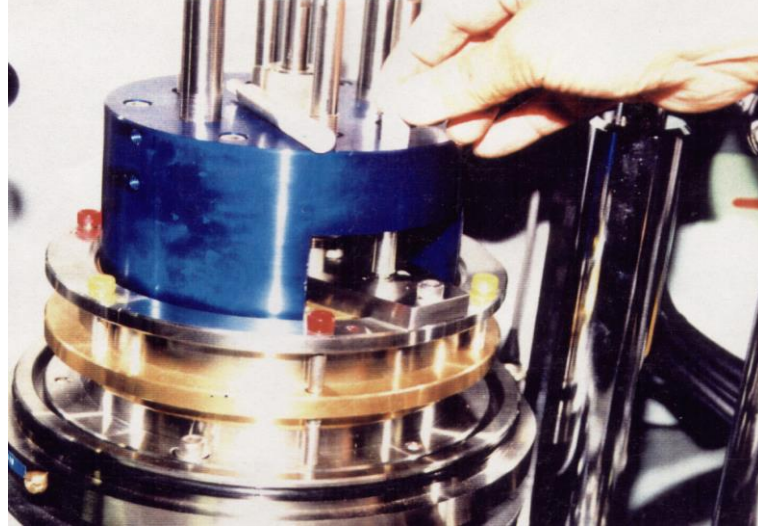
Şekil 3.18 Ring çekme metalinin yerleştirilmesi

15) Düşey yüzey sürtünmesini ölçen alıcı, krikonun sağa doğru çevrilmesiyle, ring çekme metaline değdirildikten sonra ring çekme metali ile sabitlenir (Şekil 3.19).



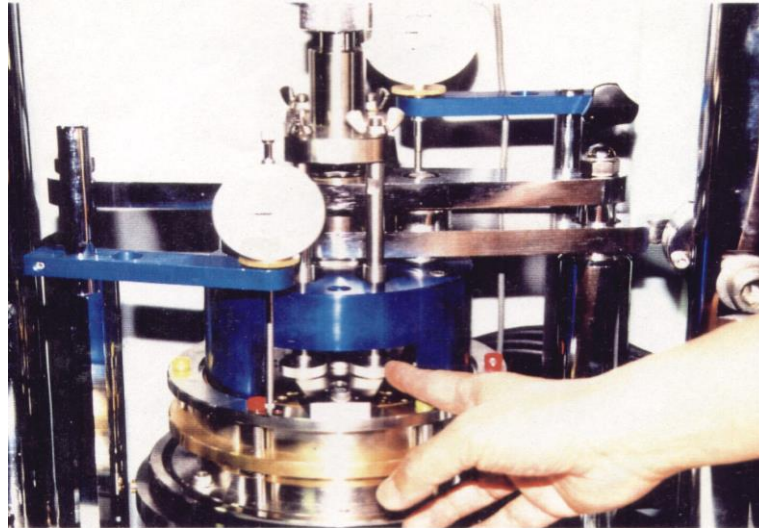
Şekil 3.19 Sürtünme yükü alıcısının montajı

16) Mavi basınç plakasındaki beyaz renkli kalın vidalar çıkarılır (Şekil 3.20).



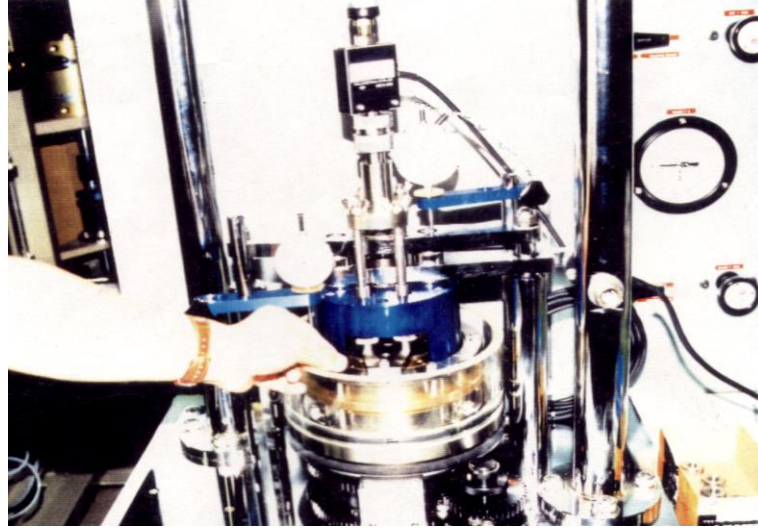
Şekil 3.20 Beyaz renkli vidaların çıkarılması

17) Mavi basınç plakasının alt yüzeyine değdirilmiş 4 somun sola doğru çevrilerek aşağı indirilir. Öndeki somunlar aynı anda, arkadaki somunlar aynı anda gevşetilmelidir. Böylece, sistemde sıkışmaların oluşması önlenmiş olacaktır. Bu işlem sonucunda tork kolu vidası, kesme kuvveti alıcısını ortalayacaktır. Tork kolunun, kesme kuvveti alıcısı ile temasını sağlayan vidanın, alıcıyla teması sağlanarak sabitlenir (Şekil 3.21).



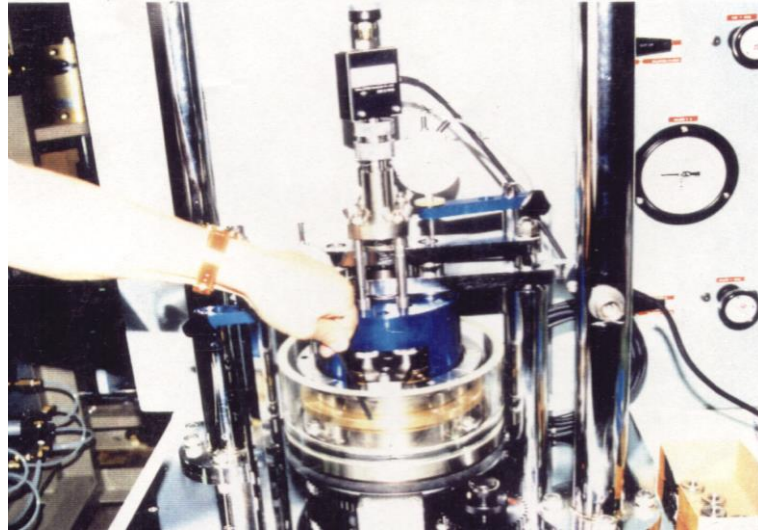
Şekil 3.21 Somunların gevşetilmesi

18) En üst dış ringteki sarı ve kırmızı renkli vidalar çıkarılır (Şekil 3.22).



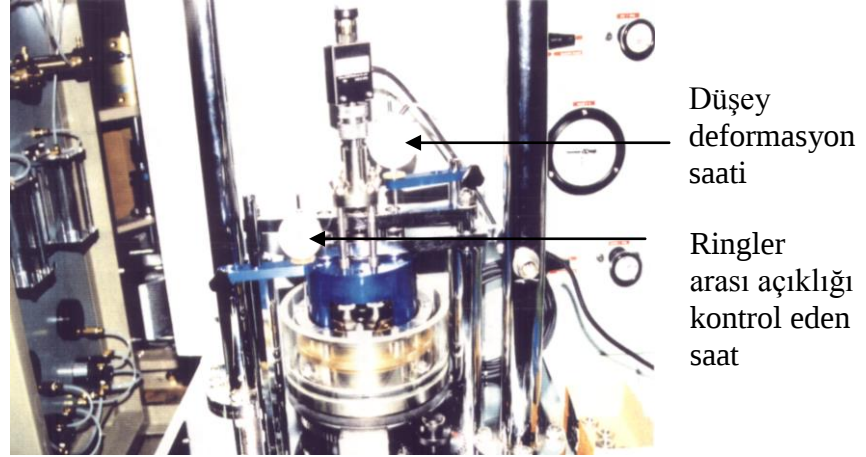
Şekil 3.22 Sarı ve kırmızı renkli vidaların çıkarılması

19) Sarı renkli ring, kesme yüzeyini oluşturmak için aşağı indirilir. Bu ringin itilerek en alt dış ringe değdirildiğinden emin olunmalıdır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 Sarı renkli ringin aşağı indirilmesi

20) Düşey deformasyon saati, mavi renkli basınç plakasına ve en üst dış ring (sarı ve kırmızı renkli noktaların olduğu ring) ile en alt dış ring arasındaki açıklığı belirlememizi sağlayan saatte, en üst dış ringe degecek şekilde sabitlenir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 Deformasyon saati ve ringler arası açıklık saatinin yerleştirilmesi

21) Şekil 3.25’de gösterilen amplifikatör, Tablo 3.3’te verilen değerlere göre ayarlanır. Tabloda verilen değerler, deneylerden önce yapılan kalibrasyon çalışmalarından elde edilmiştir.

Tablo 3.3 Amplifikatörün deney başlangıç değerleri

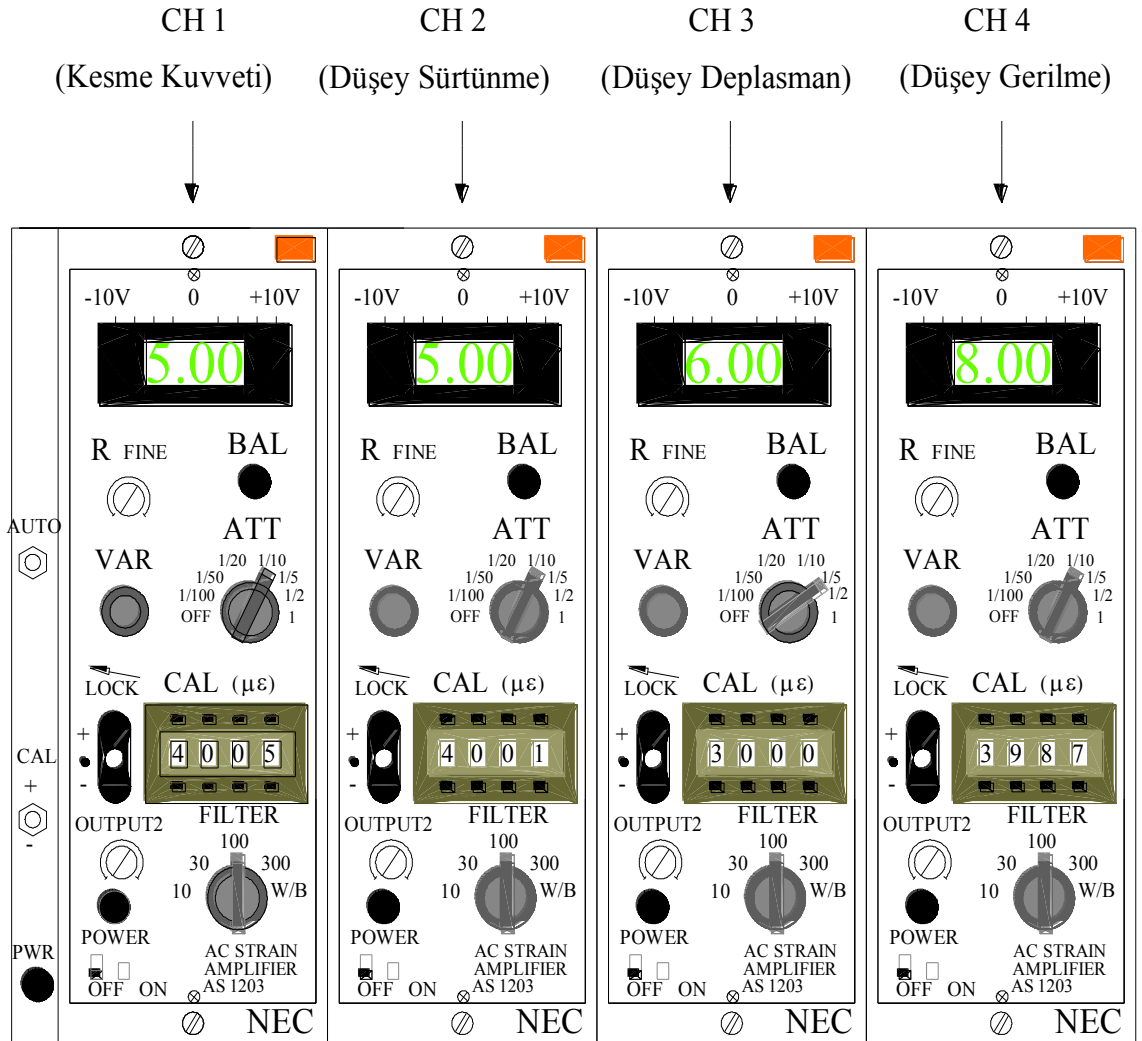
ÖZELLİKLER	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4
	Kesme yük hücresine gelen kesme kuvveti	Düşey sürtünme kuvveti	Numunedeki düşey deformasyon	Numune üzerindeki düşey gerilme
Kapasite	2000 N	1000 N	20 mm	5000 kPa
Cal.	4005	4001	3000	3987
Att.	1/10	1/10	1/5	1/10
Range (Volt)	5	5	6	8

Bunun için, amplifikatör açılmadan önce,

- CAL düğmesi ve tüm kanallardaki LOCK düğmeleri kapalı olmalıdır (• pozisyonunda).
- ATT düğmesi, kapalı pozisyonda olmalıdır (off).
- CAL bölümüne, her kanal için tabloda (veya şekilde) verilen değerler (4005, 4001 gibi) girilmiş olmalıdır.

Daha sonra her kanaldaki POWER düğmesine basılarak veya tüm kanalların açılmasını sağlayan POWER düğmesine basılarak amplifikatör çalıştırılır. En az 10 dakika bekledikten sonra,

- ATT düğmesi, her kanal için tabloda (veya şekilde) gösterilen değere (1/10, 1/5 gibi) getirilir.
- Her kanalda, BAL düğmesine basılarak amplifikatörden okunan volt değerleri sıfırlanır.
- Her kanaldaki LOCK düğmesi yukarı kaldırılır (+ pozisyonunda).
- VAR düğmesi ile, her kanalda okunan volt değerleri tablodaki (veya şekildeki) değerlere (5 V, 6 V, 8 V gibi) getirilir. Daha hassas ayarlama için FINE bölümü kullanılabilir.
- Amplifikatörden okunan volt değerleri istenen değerlere ayarlandıktan sonra, her kanalda BAL düğmesine basılarak sıfırlama yapılır.



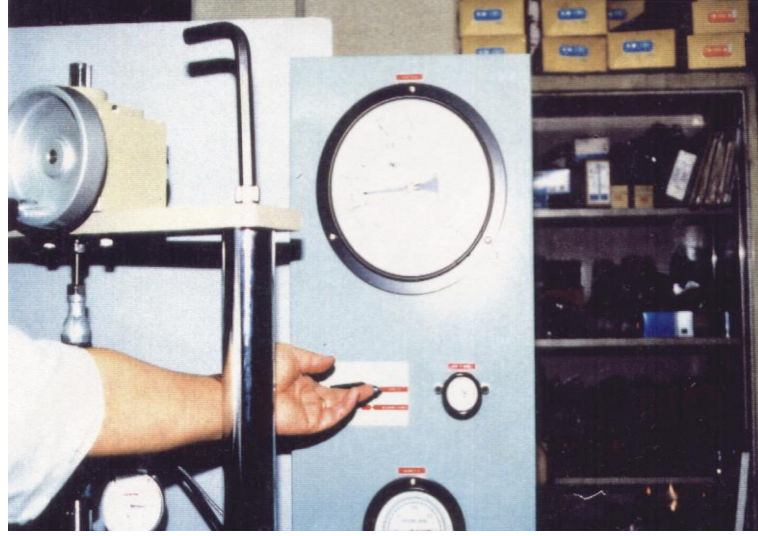
Şekil 3.25 Amplifikatör

22) Basınç panelinden uygulanacak düşey yük değeri ayarlanarak basınç vanası sağa çevrilir (Şekil 3.26). Bellofram ile numune kesit alanları eşit olmadığından, uygulanan düşey gerilme numuneye aynen iletilmez. Dolayısıyla uygulanan düşey gerilme numune üzerine azaltılarak iletilecektir (Seiken,1994).

Kesit alanları oranı=Bel. kesit alanı/Num. kesit alanı= $67.5 \text{ cm}^2/98.17 \text{ cm}^2=0.69$

Numunu üzerindeki düşey gerilme, $\sigma=0.69 \times (\text{Uygulanan gerilme})$ (3.2)

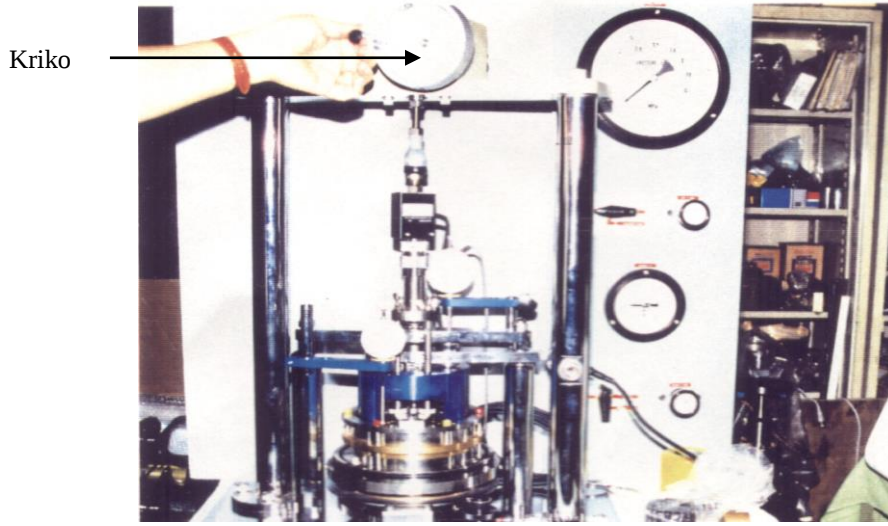
O halde, numune üzerinde 100 kPa değerinde normal gerilme elde etmek için, basınç panelinden uygulanması gereken gerilme; $100/0.69=145 \text{ kPa}$ değerinde olmalıdır.



Şekil 3.26 Normal gerilmenin uygulanması

23) Düşey basınç uygulandıktan sonra, hücre su ile doldurulur ve zeminin konsolidasyonunu tamamlaması için beklenilir. Bu çalışmadaki deneylerde, numuneler 200, 300 ve 400 kPa değerlerindeki normal gerilmeler altında, 2 gün süre ile konsolidasyona bırakılmışlardır.

24) Kriko, sola doğru döndürülerek ringler arasında yeterli açıklık bırakılır (Şekil 3.27). Açıklığın miktarı, en üst dış ringe değdirilerek sabitlenmiş olan ölçü saatinden okunabilir. Açıklığın miktarı, sistemde minimum düşey sürtünme (side friction) oluşacak şekilde seçilir. Ancak, açıklığın artmasının deney esnasında daha fazla zemin kaybına neden olacağı dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, ringler arası mesafe ortalama 0.4 mm olarak alınmıştır.

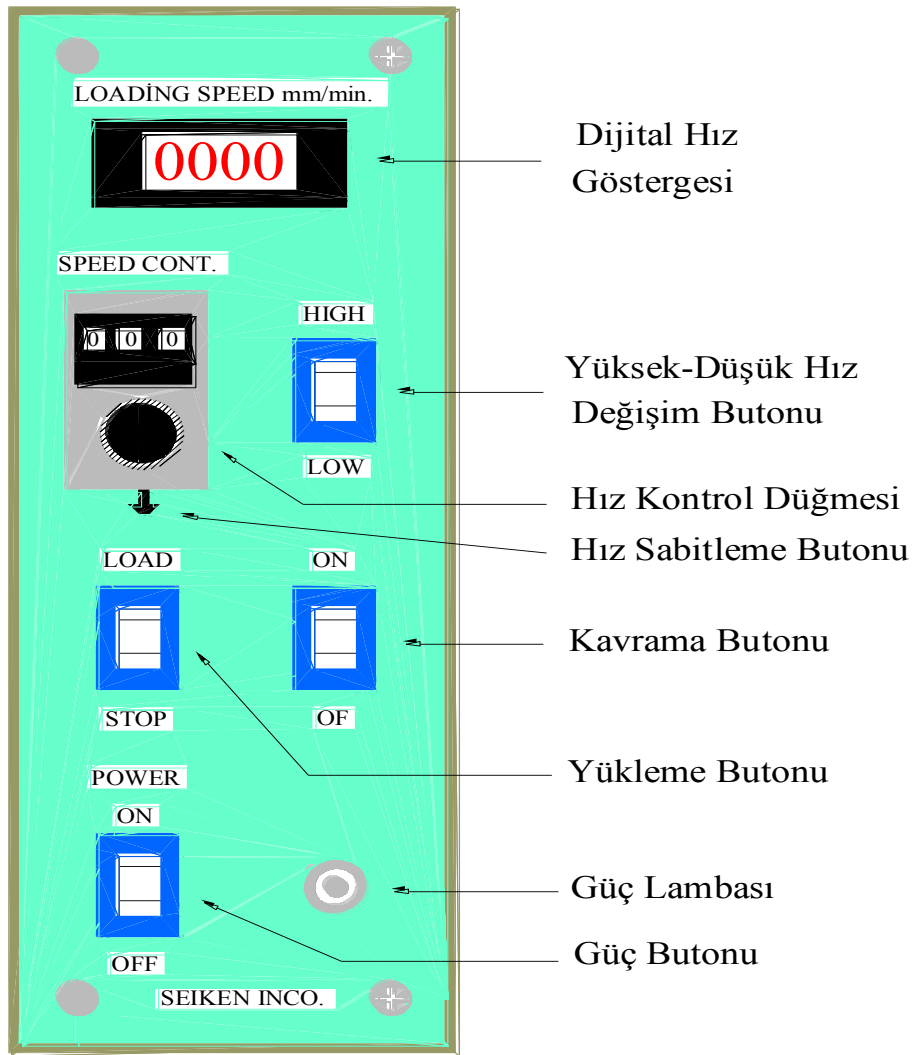


Şekil 3.27 Ringler arasında açıklığın bırakılması

25) Şekil 3.28’de gösterilen hız kontrol kutusundan, kesme hızı (20 mm/dak-2000 mm/dak) belirlenip, kesme işlemi başlatılır. Bunun için:

- Güç butonu, ‘ON’ konumuna getirilir.
- Yükleme butonu, ‘LOAD’ konumuna getirilir.
- Hız butonu, ‘HIGH’ veya ‘LOW’ konumuna getirilir. ‘HIGH’ konumunda, hız kontrol düğmesi ile seçilebilecek minimum hız 200 mm/dak. ve maksimum hız 2000 mm/dak. olacaktır. ‘LOW’ konumunda ise, seçilebilecek minimum hız 20 mm/dak. ve maksimum hız 200 mm/dak. değerinde olacaktır. Numunenin kesilme hızı ise (Numune kalınlığının ortasındaki, $D_{ort}=125$ mm için hız değeri), ayarlanan bu hız değerinden yaklaşık 10 mm/dak. daha fazla olacaktır.

- Hız kontrol düğmesi çevrilerek, hız yukarıda belirtilen aralıklardan birinde (20 ile 200 mm/dak. veya 200 ile 2000 mm/dak.) istenilen değere getirilir. Belirlenen bu hız değeri, dijital gösterge tarafından gösterilir. Hız sabitleme butonu sağa doğru çekilerek, hız kontrol düğmesinin etkinliği ortadan kaldırılır.
- Daha sonra, kavrama butonu 'ON' konumuna getirilerek kesme işlemi başlatılır.



Şekil 3.28 Hız kontrol kutusu

26) Deney tamamlandığında, önce drenaj deliği açılarak su boşaltılmalı, daha sonra numune üzerindeki düşey yük kaldırılmalıdır. Deney sonucu kesilmiş numunelerin görünümüne bir örnek Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29 Deney sonrası kesilmiş numunenin görünümü

3.6 Hesaplamalar

Tablo 3.3'te gösterilen değerler (Cal., Att. ve Range değerleri) amplifikatörden ayarlanıp kesme işlemi başlatıldığında, amplifikatörden yapılan volt birimli okumalar, mühendislik birimlerine dönüştürülebilir. Bunun için, aşağıda verilen denklemler kullanılmalıdır. Ayrıca, amplifikatör kanallarının kalibrasyon grafikleri EK-C'de verilmiştir.

$$\text{CH 1 : Kesme kuvveti (N) = 404.11 x Okuma} \quad (3.3)$$

$$\text{CH 2 : Düşey sürtünme kuvveti (N) = 202.38 x Okuma} \quad (3.4)$$

$$\text{CH 3 : Düşey deplasman (mm) = 5 x Okuma} \quad (3.5)$$

$$\text{CH 4 : Panelden uygulanan düşey gerilme (kPa) = 95.76 x Okuma} \quad (3.6)$$

- **Kayma gerilmelerinin hesaplanması**

Deney numunesi, dış çapı ($D_{\text{dış}}$) 150 mm, iç çapı ($D_{\text{iç}}$) 100 mm ve yüksekliği 20 mm olan halka şeklindedir. Bu sebeple, numunenin ortasındaki ($D=125$ mm) kayma gerilmeleri hesaplanacaktır.

Kesme esnasında, amplifikatörün CH1 kanalından okunan volt birimli değere neden olan kesme kuvveti alıcısındaki kuvvetin değeri T' ise, numune ortasındaki bir noktada oluşan kesme kuvveti (T), dönme merkezine göre alınan momentlerin eşitliğinden hesaplanır.

$$T' \times L = T \times R \quad (3.7)$$

Burada,

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

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

Numune ortasındaki bir noktada oluşan kayma gerilmesi, τ

$$\tau = T/A \quad (3.8)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Burada,

A: Numune kesit alanı olup, $\pi (D_{dış}/2)^2 - \pi (D_{iç}/2)^2 = \pi (7.5^2 - 5^2) \approx 98.2 \text{ cm}^2$ değerindedir.

O halde, amplifikatörden okunan değere karşılık gelen T' (kg) kesme kuvveti için, numunenin ortasındaki bir noktada oluşan kayma gerilmesi, τ (kg/cm²)

$$\tau = (T' \times 20)/(6.25 \times 98.2) \quad (3.9)$$

$$\tau = T'/30.68 \quad (3.10)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Sonuç olarak, amplifikatörün CH 1 kanalından deney esnasında okunan bir değer in ifade ettiği kayma gerilmesi, aşağıdaki ifade ile belirlenecektir.

$$\tau \text{ (kg/cm}^2\text{)} = (40.411 \times \text{Okuma})/30,68 \quad (3.11)$$

$$\tau \text{ (kPa)} = 131.72 \times \text{Okuma} \quad (3.12)$$

- **Düşey sürtünme kuvvetinin hesaplanması**

Gerek ringler arası açıldığında, gerekse numunenin kesilmesi esnasında, en üst dış ringin iç yan yüzeyi ile numunenin üstten sabitlenmesini sağlayarak numunenin kesilmesini sağlayan ringin dış yan yüzeyleri arasında sürtünme oluşmaktadır. Bu sürtünmenin değeri sabit olmayıp, deney süresince değişmektedir. Bu kuvvetin değeri Denklem 3.14 ile belirlenip numuneye uygulanan düşey gerilmeden çıkarılmalıdır.

$$\text{Düşey sürtünme kuvveti, } F(N) = 202.38 \times (\text{CH 2'den yapılan okuma}) \quad (3.13)$$

$$\text{Düşey sürtünme gerilmesi, } \sigma_f \text{ (kPa)} = F/A = 20.61 \times \text{Okuma} \quad (3.14)$$

Burada A, numune kesit alanı olup 98.17 cm² değerindedir.

- **Düşey deformasyonun hesaplanması**

Deformasyon miktarı, üst ve alt iç ringlerin numuneye geçme miktarını da içerdiğinden, numunenin gerçek deformasyon miktarı, amplifikatörün CH3 kanalından okunan deformasyon miktarından yaklaşık 1.5~2.0 mm daha az olacaktır.

$$\text{Düşey deformasyon (mm)} = 5 \times \text{CH 3 kanalından yapılan okuma} \quad (3.15)$$

- **Numune üzerindeki normal gerilmenin hesaplanması**

Bellofram ile numune kesit alanları aynı olmadığından, basınç panelinden uygulanan yük, numuneye azaltılarak iletilecektir.

$$\text{Panelden uygulanan gerilme (kPa)} = 95.76 \times (\text{CH 4'den yapılan okuma}) \quad (3.16)$$

$$\text{Numunu üzerindeki gerilme} = 0.69 \times (\text{Panelden uyg. düşey gerilme}) \quad (3.17)$$

$$\text{Numune üzerindeki normal gerilme, } \sigma \text{ (kPa)} = 65.84 \times \text{Okuma} \quad (3.18)$$

Düşey sürtünme nedeniyle, numune üzerindeki gerilme azalacaktır.

$$\text{Numune üzerindeki net normal gerilme, } \sigma_{\text{net}} = \sigma - \sigma_f \quad (3.19)$$

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, genel geoteknik özellikleri bir önceki bölümde verilen numuneler kullanılarak yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinin sonuçlarına yer verilmiştir.

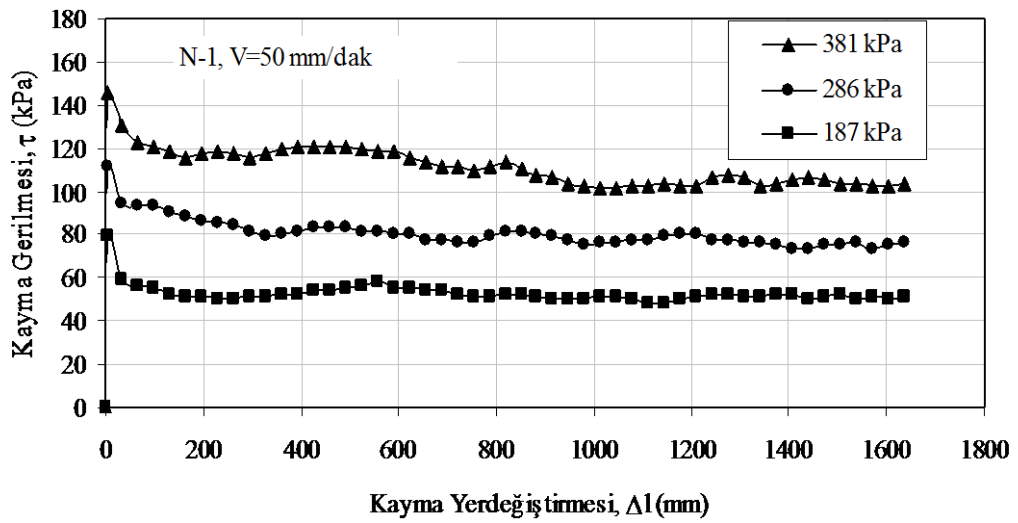
Killi numuneler üzerinde 5 farklı kesme hızında (25, 50, 100, 200 ve 400 mm/dak) ve 3 farklı düşey gerilme (200, 300, 400 kPa) altında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Kum numune üzerinde ise, 3 farklı kesme hızında (25, 100 ve 400 mm/dak) ve 3 farklı düşey gerilme (200, 300, 400 kPa) altında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, yüksek kesme hızlarında yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet parametrelerini düşük hızlarda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen mukavemet parametreleri ile karşılaştırmak amacıyla tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri, 0.035 mm/dak değerindeki kesme hızında ve 200, 300 ve 400 kPa değerlerindeki normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Numuneler, etkisinde kaldıkları düşey gerilmeler altında 2 gün süre ile konsolidasyona bırakılmışlardır. Bu süreden daha erken yapılan halka kesme deneylerinde, düzgün bir kesme yüzeyi elde edilememiş ve bu deney sonuçları değerlendirmeye alınmamıştır.

Halka kesme ve kesme kutusu deneylerinde, yaklaşık sabit bir kayma gerilmesi değeri elde edinceye kadar kesme işlemine devam edilmiştir. Bu amaçla, halka kesme deneylerine, kohezyonlu numunelerde yaklaşık 1600 mm kayma yerdeğiştirmesine kadar, kum numunede ise yaklaşık 500 mm kayma yerdeğiştirmesine kadar devam edilmiştir. Ringler arasına verilen açıklıktan dolayı, kesme esnasında numune kayıpları yaşanmaktadır. Bu nedenle, numune üzerinde yapılan kayma yerdeğiştirmesi miktarı arttıkça numune kayıpları da artmaktadır. Bu durum, numunede farklı bir yüzeyin kesilmesine ve kayma gerilmesi değerlerinde anormal değişikliklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Kohezyonlu numuneler üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinde, 3. çevrim sonucu elde edilen kayma gerilmeleri, kalıcı değer olarak alınmıştır. İri daneli numunede (N-4) ise tek bir çevrim sonucu kalıcı mukavemet değerine ulaşılmıştır.

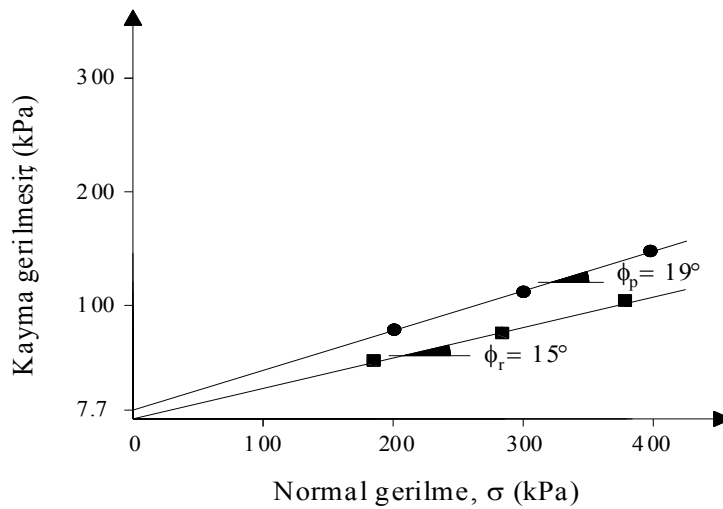
Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri, göçme zarflarına uygulanan doğrusal yaklaşım sonucu belirlenmiştir. Aşağıda, yapılan deneylerin sonuçlarına ait örnekler verilmiş ve tüm deney sonuçları tablolarda özetlenmiştir.

- **Halka kesme deneyleri**

Halka kesme deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrilerinin ve göçme zarflarının tipik bir örneği, plastisite indisi %23 olan N-1 numunesi için Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 N-1 numunesine ait halka kesme deney sonucu (V=50 mm/dak)



Şekil 4.2 N-1 numunesine ait göçme zarfları (V=50 mm/dak)

Gerek ringler arasına açıklık verildiğinde, gerekse kesme sırasında, sistemde düşey sürtünme oluşmaktadır. Bu nedenle kalıcı durumda, numune üzerindeki toplam düşey gerilme başlangıçtaki değerinden daha küçük olmaktadır.

Halka kesme deneylerinde, hem pik hemde kalıcı kayma gerilmeleri kullanılarak kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Pik kayma gerilmelerine göre bulunan kayma mukavemeti parametrelerinde kohezyon terimi bulunmasına karşılık, kalıcı duruma ulaşıldığında kayma mukavemeti üzerinde kohezyonun etkisi görülmemiştir ($c_r \approx 0$).

Tüm numunler üzerinde yapılan halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı ve pik mukavemet parametreleri sırasıyla Tablo 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Ayrıca, numunelere ait kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi eğrileri ile göçme zarfları EK-B’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Halka kesme deney sonuçları (kalıcı mukavemet parametresi)

Numune No	Kesme Hızı (mm/dak)				
	25	50	100	200	400
	ϕ_r (°)				
N-1	15	15	14	13	12
N-2	12	12	11	11	10
N-3	10	10	9	8	8
N-4	24	-*	24	-*	24

* N-4 (Kum) numunesi için bu hız değerinde halka kesme deneyi yapılmamıştır.

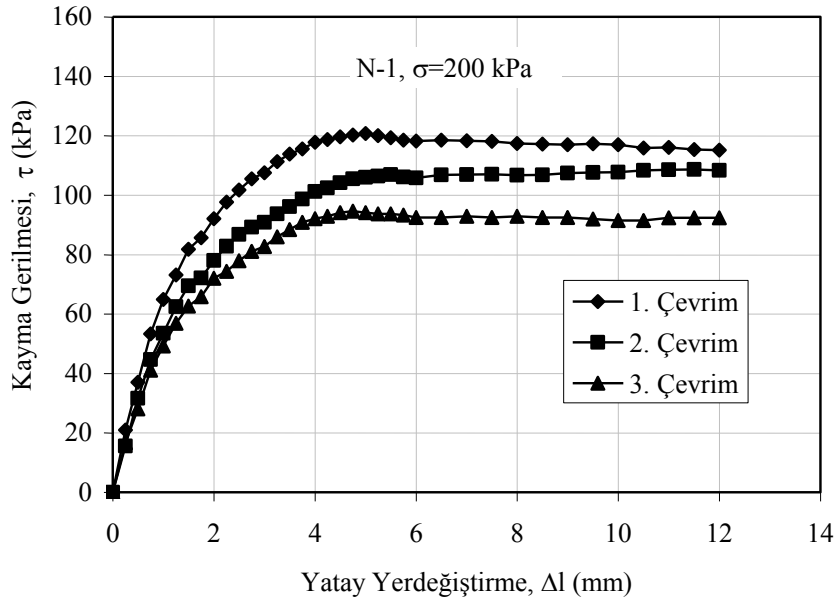
Tablo 4.2 Halka kesme deney sonuçları (pik mukavemet parametreleri)

Numune No	Kesme Hızı (mm/dak)									
	25		50		100		200		400	
	Pik mukavemet parametreleri									
	ϕ_p (°)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)	c_p (kPa)	ϕ_p (°)	c_p (kPa)
N-1	19	7.7	19	7.7	18	14.4	17	17.8	18	10.4
N-2	15	13.7	17	7.5	16	12.5	16	8.3	14	12.7
N-3	14	19.4	15	15.6	13	22.7	13	20.0	12	24.4
N-4	28	0	-*	-*	28	0	-*	-*	28	0

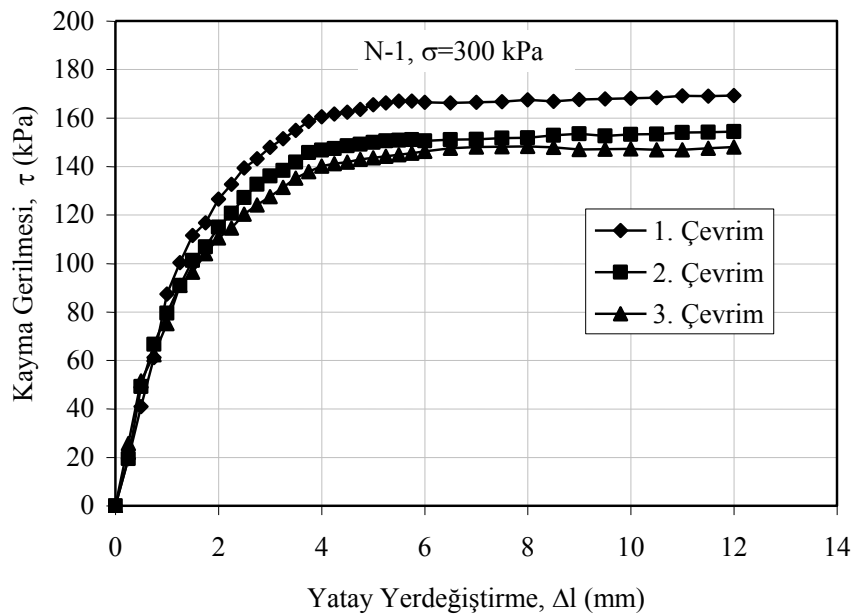
* Kum (N-4) numunesi için bu hız değerinde halka kesme deneyi yapılmamıştır.

- Tekrarlı kesme kutusu deneyleri

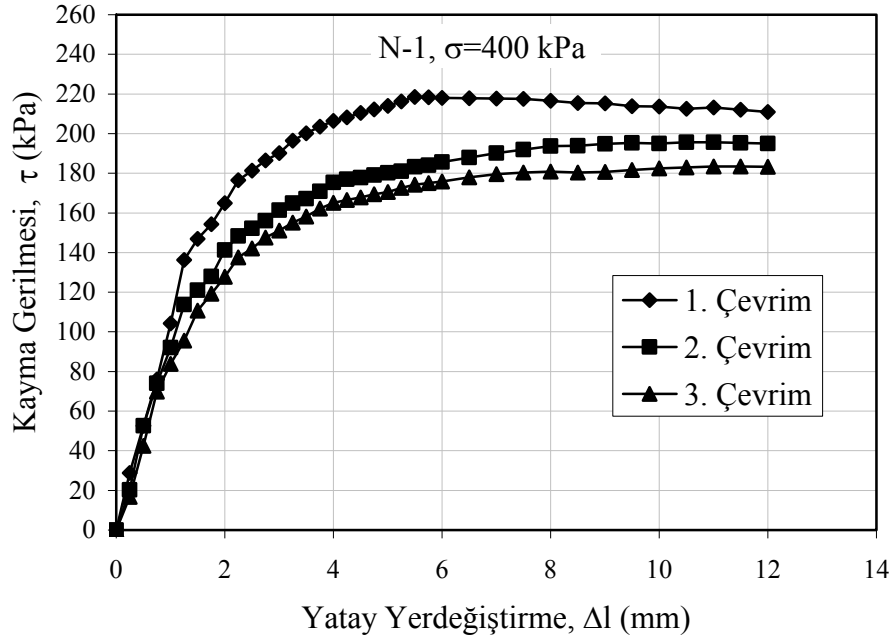
0.035 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinden, her çevrim sonucu elde edilen kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirme eğrilerine birer örnek, N-1 numunesi için sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Bu numuneye ait pik ve kalıcı göçme zarfları ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Ayrıca, tüm numuneler üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı ve pik mukavemet parametreleri Tablo 4.3'te verilmiştir.



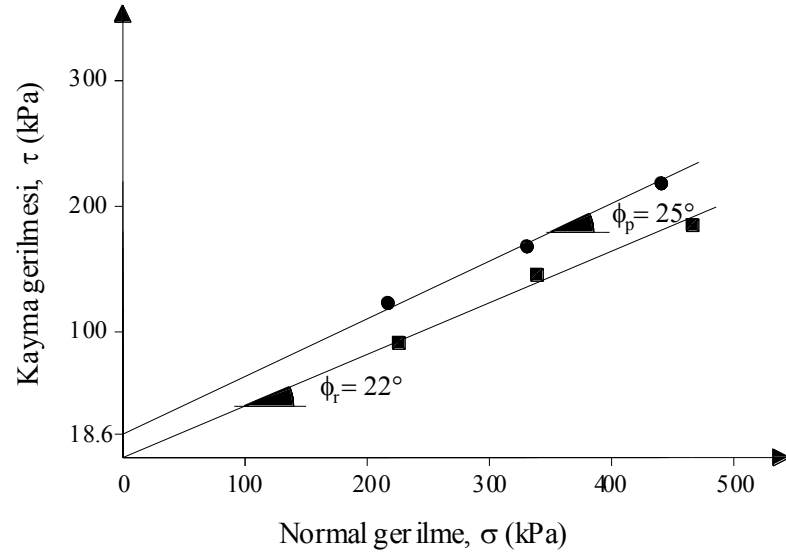
Şekil 4.3 N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (1.çevrim)



Şekil 4.4 N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (2.çevrim)



Şekil 4.5 N-1 numunesine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi (3.çevrim)



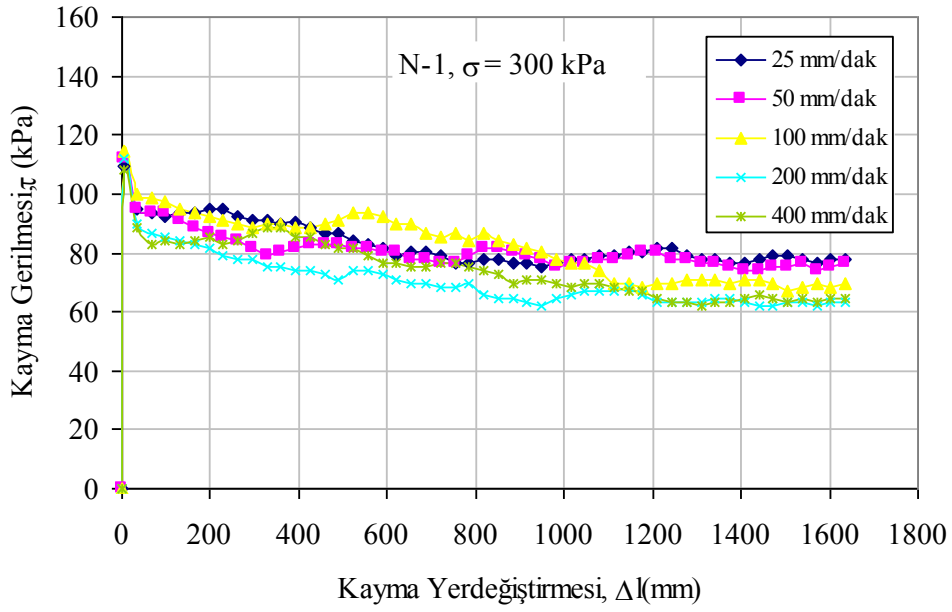
Şekil 4.6 N-1 numunesine ait göçme zarfları ($V=0.035$ mm/dak)

Tablo 4.3 Tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları

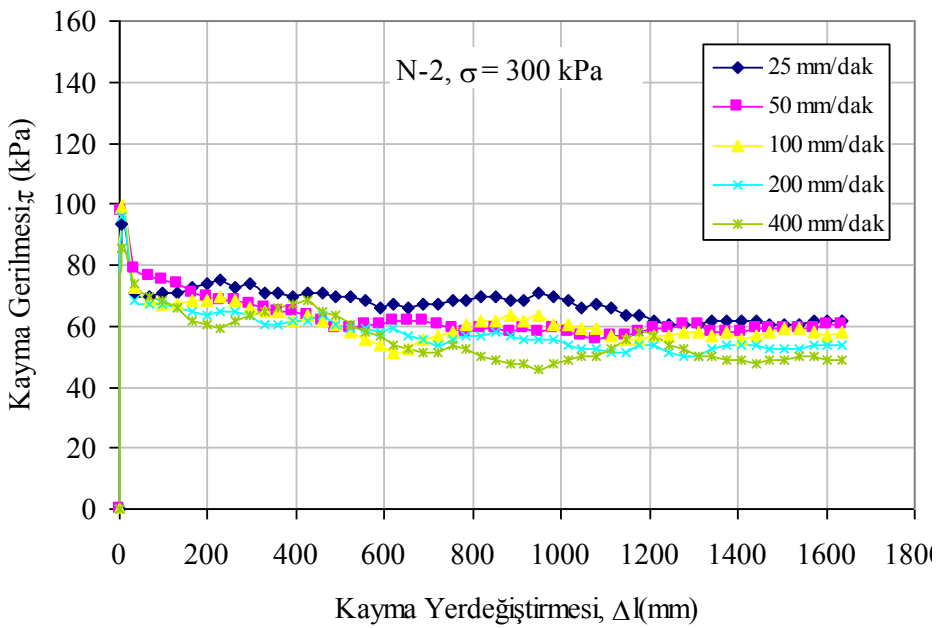
Numune No	Kesme Hızı (0.035 mm/dak)			
	Pik mukavemet parametreleri		Kalıcı mukavemet parametreleri	
	$\phi_p' (^\circ)$	$c_p' (kPa)$	$\phi_r' (^\circ)$	$c_r' (kPa)$
N-1	25	18.6	22	0
N-2	22	27.2	19	0
N-3	18	29.0	13	0
N-4	38	0	32	0

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

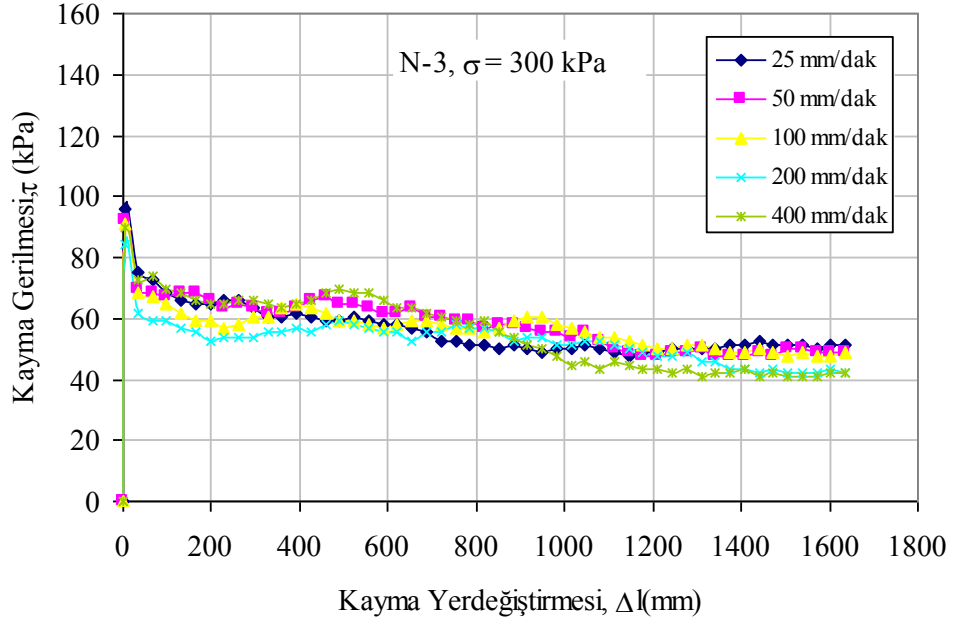
Halka kesme deneyleri sonucunda, yüksek kesme hızlarının kayma mukavemetine etkisi, 300 kPa düşey gerilme altındaki numuneler için Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4'te gösterilmiştir.



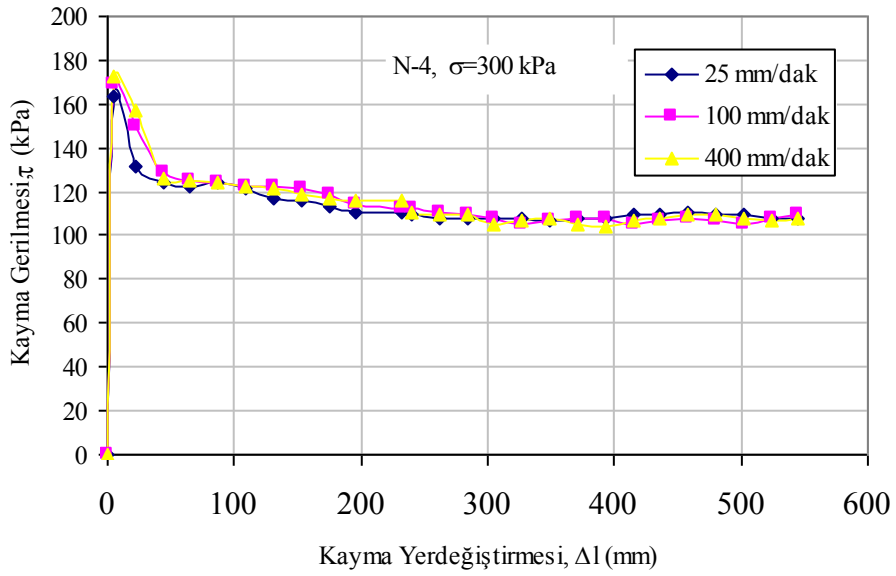
Şekil 5.1 N-1 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi



Şekil 5.2 N-2 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi



Şekil 5.3 N-3 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi

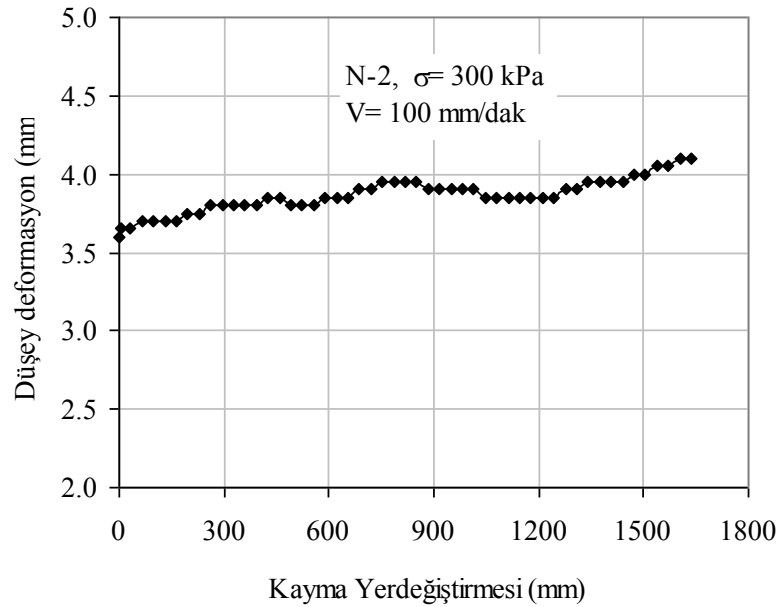


Şekil 5.4 N-4 numunesi için kesme hızının kayma mukavemetine etkisi

Şekillerden görüleceği gibi, killi numunelerde (N-1, N-2, N-3) hız değışimleri kayma gerilmelerini etkilemektedir. Örneğin N-1 numunesinde, 100 mm/dak değeriindeki kesme hızında elde edilen kayma gerilmeleri, 800 mm'lik kayma yerdeğiştirmelerine kadar diğer kesme hızlarından daha yüksektir. Buna rağmen, 1000 mm'lik kayma yerdeğiştirmesinden sonra, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi mukavemeti diğerlerine göre

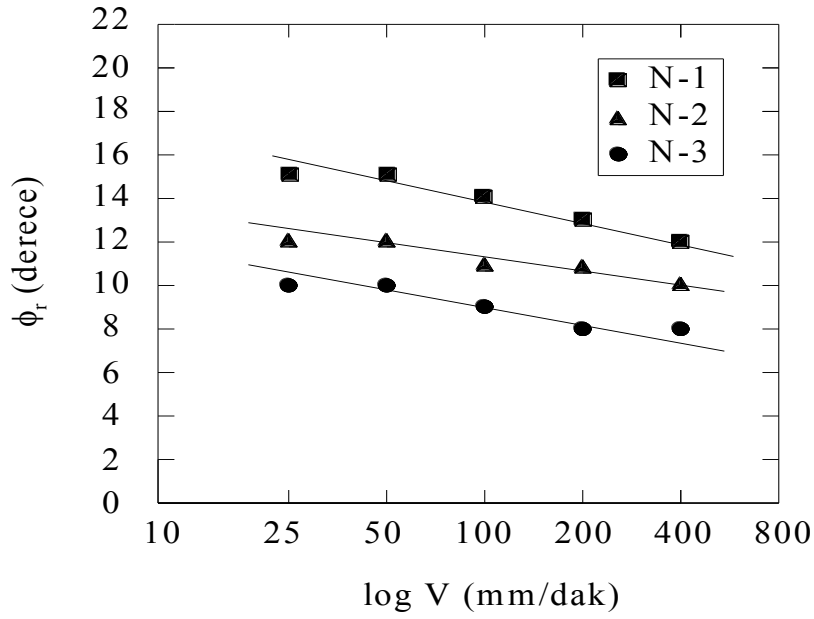
daha fazla azalmaktadır. Buna rağmen N-4 (K.Y.= %0) numunesinde, artan kesme hızının, kayma gerilmelerini etkilemediği söylenebilir (Şekil 5.4).

Killi numunelerin kayma gerilmelerindeki bu değişim, kesme esnasında kayma yüzeyinde oluşan boşluk suyu basıncı değişimlerine bağlanmıştır. Yüksek kesme hızından dolayı, numunede suyun geçişine (hacim değişimine) izin verilmemektedir. Dolayısıyla kesme yüzeyi boyunca boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Buna rağmen halka kesme ve kesme kutusu deneylerinde, tam anlamıyla suyun geçişinin önleneyeceği söylenemez. Ayrıca, numunelerin kompaksiyon yöntemiyle hazırlanmış olmaları, kesme yüzeyinde sadece boşluk suyu basıncının değil aynı zamanda hava basıncının oluşabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 5.5'te, halka kesme deneylerinden elde edilen tipik düşey deformasyon-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi verilmektedir. Numunedeki sıkışmanın nedeni, artan kayma yerdeğiştirmesiyle birlikte, ringler arası açıklıktan dolayı numune kayıplarının yaşanmasıdır. Kayma gerilmelerindeki değişimin bir diğer nedeni ise, deney esnasında birden fazla yüzeyin kesilebilmesidir.



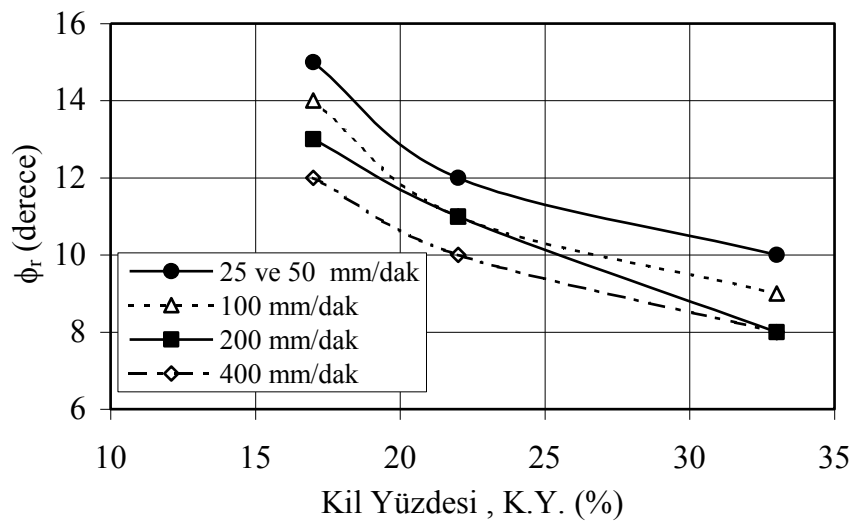
Şekil 5.5 Düşey deformasyonun kayma yerdeğiştirmesi ile değişimi

Şekil 5.6'da, farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı mukavemet açılarının, kesme hızının logaritması ile değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, artan kesme kesme hızı ile birlikte kalıcı mukavemet açısı, N-1 numunesinde 3°, N-2 ve N-3 numunelerinde 2° azaltmaktadır. N-4 (K.Y.= %0) numunesinde ise, kalıcı mukavemet açısı artan hız ile değişmemiştir.



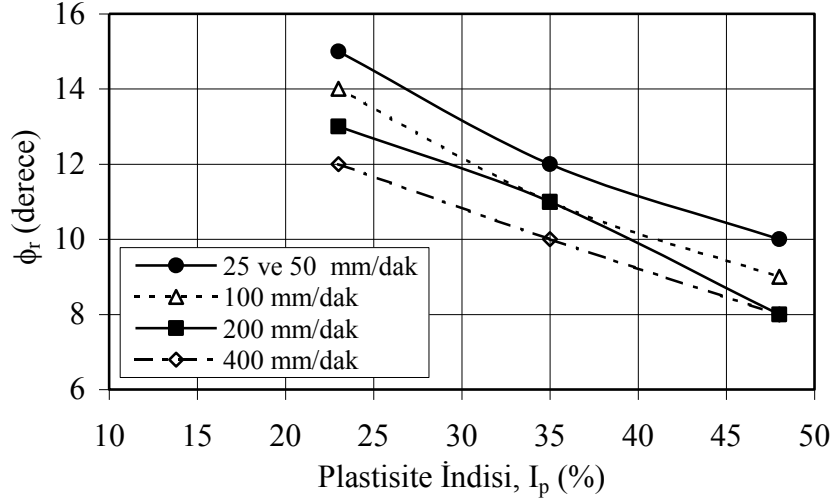
Şekil 5.6 Kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi

Kil yüzdesinin ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına (ϕ_r) etkisi Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde kullanılan numunelerin kil yüzdeleri, hidrometre deneyleri ile belirlenmiştir. Şekilden görüleceği gibi, kesme hızının 25 mm/dak'dan 400 mm/dak değerine yükselmesi, killi numunelerde mukavemet açısını yaklaşık 2° azaltmaktadır. Buna karşılık, kil yüzdesinin %17'den %33'e yükselmesi, kalıcı mukavemet açısını yaklaşık 5° azaltmıştır. Dolayısıyla kalıcı mukavemet açısı üzerinde, kil yüzdesinin kesme hızından daha etkili olduğu söylenebilir.



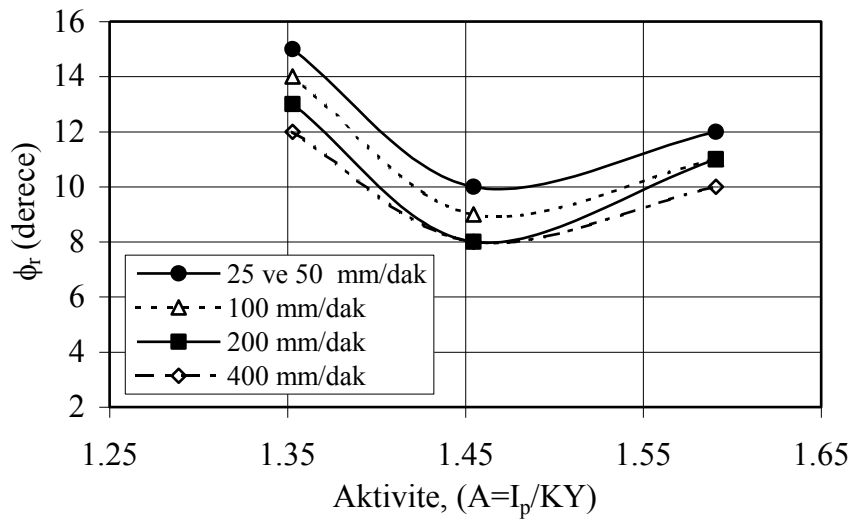
Şekil 5.7 Kil yüzdesi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi

Halka kesme deney aleti ile farklı kesme hızlarında belirlenen kalıcı mukavemet açılarının plastisite indisi ile değişimi Şekil 5.8’de verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi, kil yüzdesi ile ϕ_r arasındaki değişime benzer bir ilişki, ϕ_r ile I_p arasında mevcuttur. Kalıcı mukavemet açısı, artan plastisite indisi ile azalmaktadır.



Şekil 5.8 Plastisite indisi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi

Hem aktivite hemde likit limit, kil mineralleri çeşidine birer göstergelerdir. Bu nedenle dane boyutu ve şekli içinde birer gösterge halini alırlar. Artan aktivite ve likit limit ile birlikte kalıcı mukavemet açısının azalması beklenir (Stark, 1994). Şekil 5.9’da, halka kesme deneylerinde uygulanan farklı kesme hızları neticesinde elde edilen kalıcı mukavemet açılarının aktivite ile değişimi gösterilmiştir.

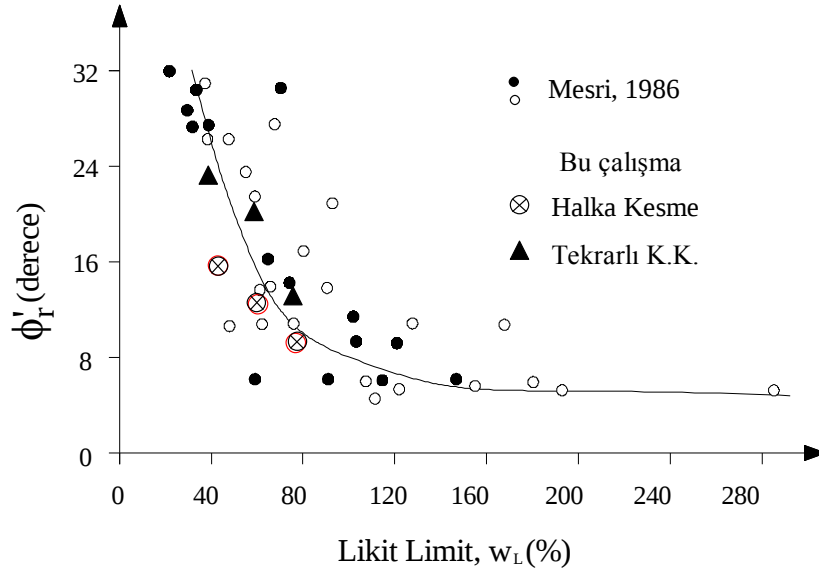


Şekil 5.9 Aktivite ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi

Deneyleerde kullanılan numunelerin aktiviteleri çok dar bir alanda değişim gösterdiğinden, artan aktivite ile kalıcı mukavemet açısındaki düşüş tam anlamıyla gözlenememiştir. Bu nedenle, değişik aktiviteye sahip daha fazla numune üzerinde deneye ihtiyaç vardır.

Dane boyutu azalırken yani özgül yüzey artarken, likit limitin de artması beklenir. Bu yüzden likit limit ile kil minerolojisi arasında bir ilişki olması gerekir. Çünkü her ikisinde de dane büyüklüğü faktörü mevcuttur (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).

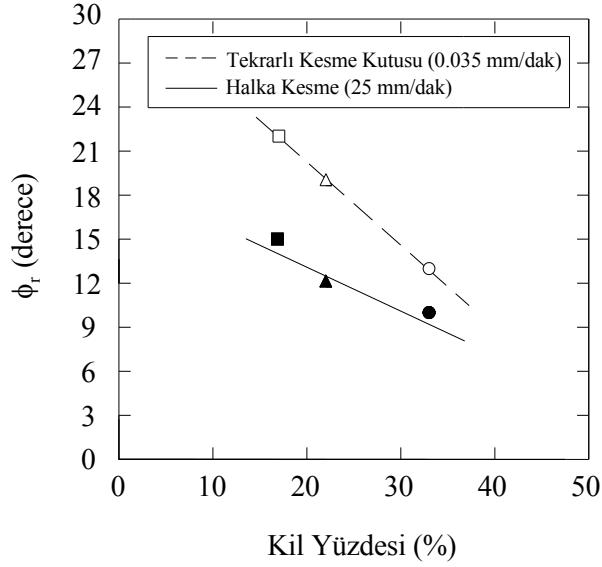
Şekil 5.10'da, 25 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılan halka kesme deneyleri ile 0.035 mm/dak'lık kesme hızında yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet açılarının likit limit ile değişimi verilmiştir. Bu sonuçlar, 1986 yılında Mesri ve Cepeda-Diaz tarafından ortaya konulan $\phi_r'-w_L$ arasındaki ilişki üzerinde gösterilmiştir. Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) tarafından ortaya konulan bu ilişki, 0.0005 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilmiştir.



Şekil 5.10 Likit limitin kalıcı mukavemet açısına etkisi

Şekilden de görüldüğü gibi artan likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı azalmaktadır. Ayrıca, halka kesme deneylerinde uygulanan kesme hızının çok yüksek olmasına rağmen elde edilen sonuçların, Mesri ve Cepeda-Diaz (1986) tarafından geliştirilen $\phi_r'-w_L$ ilişkisi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet açısı değerleri karşılaştırılacak olursa, Şekil 5.11'deki ilişki elde edilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, tekrarlı kesme kutusu deneyleri, halka kesme deneylerine göre daha yüksek kalıcı mukavemet açısı vermektedir.



Şekil 5.11 Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması

N-4 (K.Y.= %0) numunesine ait kalıcı mukavemet açısı, halka kesme ve kesme kutusu deneylerinden sırasıyla 24° ve 32° olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, kil yüzdesi arttıkça, iki deney türünden elde edilen kalıcı mukavemet açıları arasındaki farkın azaldığı söylenebilir.

Yeniden aktif hale geçmiş heyelanlardaki en düşük kayma hızının 5 cm/yıl (0.0001 mm/dak) ve en yüksek kayma hızının 50 cm/gün (0.35 mm/dak) olduğu göz önüne alınacak olursa, halka kesme deneylerinde kullanılan kesme hızlarının, uygulama ile uyuşmadığı görülmektedir. Aynı düşük hızlarda yapılan, halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen ϕ_r değerlerinin yaklaşık aynı olduğu ve bunların geri analizden elde edilen değerler ile uyum içinde olduğu literatürden bilinmektedir. Dolayısıyla, yüksek hızlarda yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet açısının (ϕ_r) gerçeğinden daha küçük olduğu söylenebilir. Fakat, tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen ϕ_r' değerlerinin, 3.çevrim sonundaki kalıcı kayma gerilmelerinden elde edildiği (çevrim sayısını artırmanın kalıcı gerilmeler üzerindeki etkisi) ve her çevrim sonunda bir gün beklenildiği unutulmamalıdır.

6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Zeminlerde, deformasyonla değişmeyen ve sabit olarak kalan en küçük kayma gerilmesinin değerine kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti, büyük deformasyonlar sonucu oluştuğundan (bazen metreye varan hareket gerekebilir), önceden büyük kayma hareketlerinin yaşanmış olduğu göçme yüzeyleri içeren şevlerin stabilitesi ve fisürlü kil şevlerde görülen mukavemetin zamanla azalması sonucu oluşan ani göçme gibi problemlerde kullanılmaktadır.

Kalıcı kayma mukavemetini belirlemede kullanılan en yaygın deney yöntemleri; halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleridir. Halka kesme deneyi, tek yönde büyük kayma yerdeğiştirmelerine izin vermesi açısından, kalıcı kayma mukavemetini belirlemede, tekrarlı kesme kutusu deneyinden daha kolay ve daha hızlıdır. Ayrıca, kohezyonlu zeminlerde görülen dairesel şev kaymalarını modellemesi yönünden de, kalıcı kayma mukavemetini belirlemede daha uygundur. Belirli bir deney türü için; minerolojik yapı, normal gerilme seviyesi ve kesme hızı, zeminlerin kalıcı mukavemetini etkileyen başlıca faktörlerdir.

Bu çalışmada, zeminlerin kalıcı mukavemet parametrelerini belirlemek amacıyla halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri, standart proktor sıkılığında hazırlanmış, farklı kil yüzdesine ve plastisite indisine sahip numuneler üzerinde yapılmıştır. Tüm deneylerde kullanılan numuneler, 200-300 ve 400 kPa değerlerindeki düşey gerilmeler altında, iki gün süre ile su altında konsolidasyona bırakılmışlardır. Ayrıca, %50 relatif sıkılıkta hazırlanan kum numunesi üzerinde, aynı düşey gerilmeler altında halka kesme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Halka kesme deneylerinde, yüksek kesme hızlarından dolayı oluşan boşluk basınçlarındaki değişimi ölçme olanağı bulunmadığından, toplam gerilmelere göre çalışılmıştır.

Dört farklı kil yüzdeli numune üzerinde, 25, 50, 100, 200 ve 400 mm/dak değerlerindeki kesme hızlarında yapılan halka kesme ve 0.035 mm/dak değerindeki kesme hızında yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri neticesinde, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Kohezyonlu numuneler üzerinde yapılan yüksek hızlı halka kesme deneylerinde, kesme hızı arttıkça kalıcı mukavemet açısı (ϕ_r), yaklaşık 2~3° azalmaktadır. İri daneli zeminde ise, artan hız ile ϕ_r değişmemektedir.
2. Artan kil yüzdesi, likit limit, ve plastisite indisi ile kalıcı mukavemet açısı azalmaktadır.
3. Halka kesme deneylerinden elde edilen sonuçlar neticesinde; kalıcı mukavemet açısı üzerinde, kil yüzdesinin-plastisite indisinin yada likit limitin kesme hızından daha etkili olduğu görülmüştür.
4. Tekrarlı kesme kutusu deneyleri, halka kesme deneylerine göre daha yüksek mukavemet parametreleri vermektedir.
5. Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı mukavemet açısı değerleri arasındaki fark, artan kil yüzdesi ve plastisite indisi ile azalmaktadır.

Kil yüzdesi yüksek zeminlerde (K.Y.>%33), hızın kalıcı mukavemete etkisini incelemek için daha fazla deneye ihtiyaç vardır. Halka kesme deneylerinde uygulanan kesme hızının, heyelanlarda görülen kayma hızlarından çok yüksek olması ve deney esnasında oluşan boşluk suyu basıncı değişimlerini ölçme olanağı bulunmamasından dolayı, halka kesme deney aletinin hızı düşürülmelidir.

KAYNAKLAR

- ASTM, D 6467.**, 2000. "Standard test method for torsional ring shear test to 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.**, 1979. "A simple ring shear apparatus", *Ground Engineering*, 12(5), 40-44.
- 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*", Fifth Edition, Brooks/Cole, Thomson Learning, USA.
- FEARON, R.**, 1999. "Effect of displacement rate on residual shear strength of soils", <http://cvfeller.cv.ic.ac.uk/ruth.html>
- GIBO, S., EGASHIRA, K., OHTSUBO, M. and NAKAMURA, S.**, 2002. "Strength recovery from residual state in reactivated landslides", *Geotechnique*, Vol.52, No.9, 683-686.
- HAWKINS,A.B. and PRIVETT,K.D.**, 1985. "Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils", *Ground Engineering*, page 22-29.
- LEMOES, L.J.L.**, 1985. "Shear behaviour of pre-existing shear zones under fast loading-insights on the landslide motion", web page address: <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.**, 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.
- SEIKEN INC.**, 1994. "*Ring Shearing Test Apparatus Instruction Manual*", Model: DTA-138.
- SKEMPTON, A.W.**, 1964. "Long -term stability of clay slopes", *Geotechnique*, Vol. 14, No.2, 75-101.
- SKEMPTON, A.W.**, 1970. "First time slides in overconsolidated clays", *Geotechnique*, Vol.20, No.3.
- SKEMPTON, A.W.**, 1985. "Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory", *Geotechnique*, Vol. 35, No.1, 3-18.
- 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 HISANAGA, K.**, 2001. "Variation in residual strength of clay with shearing speed", <http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/521/06.pdf>
- TOWNSEND, F.C., GILBERT, P.A.**, 1973. "Tests to measure residual strength of some clay shales", *Geotechnique*, Vol. 23, 267-271.
- WANG, G. and SASSA, K.**, 2000. "Undrained shear behavior of silty soils in ring shear tests", <http://lib.jzit.edu.cn/geoeng/PAPERS/SNES/SNES0803.PDF>
- WEDAGE, A.M.P., MORGENSTERN, N.R. and CHAN, D.H.**, 1998. "A strain rate dependent constitutive model for clays at residual strength", *Canadian Geotechnical Journal*, 35-2, page 364-373.
- WESLEY, L.D.**, 1977. "Shear strength properties of halloysite and allophane 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.

EK A

A.1 Elek ve Hidrometre Analizleri

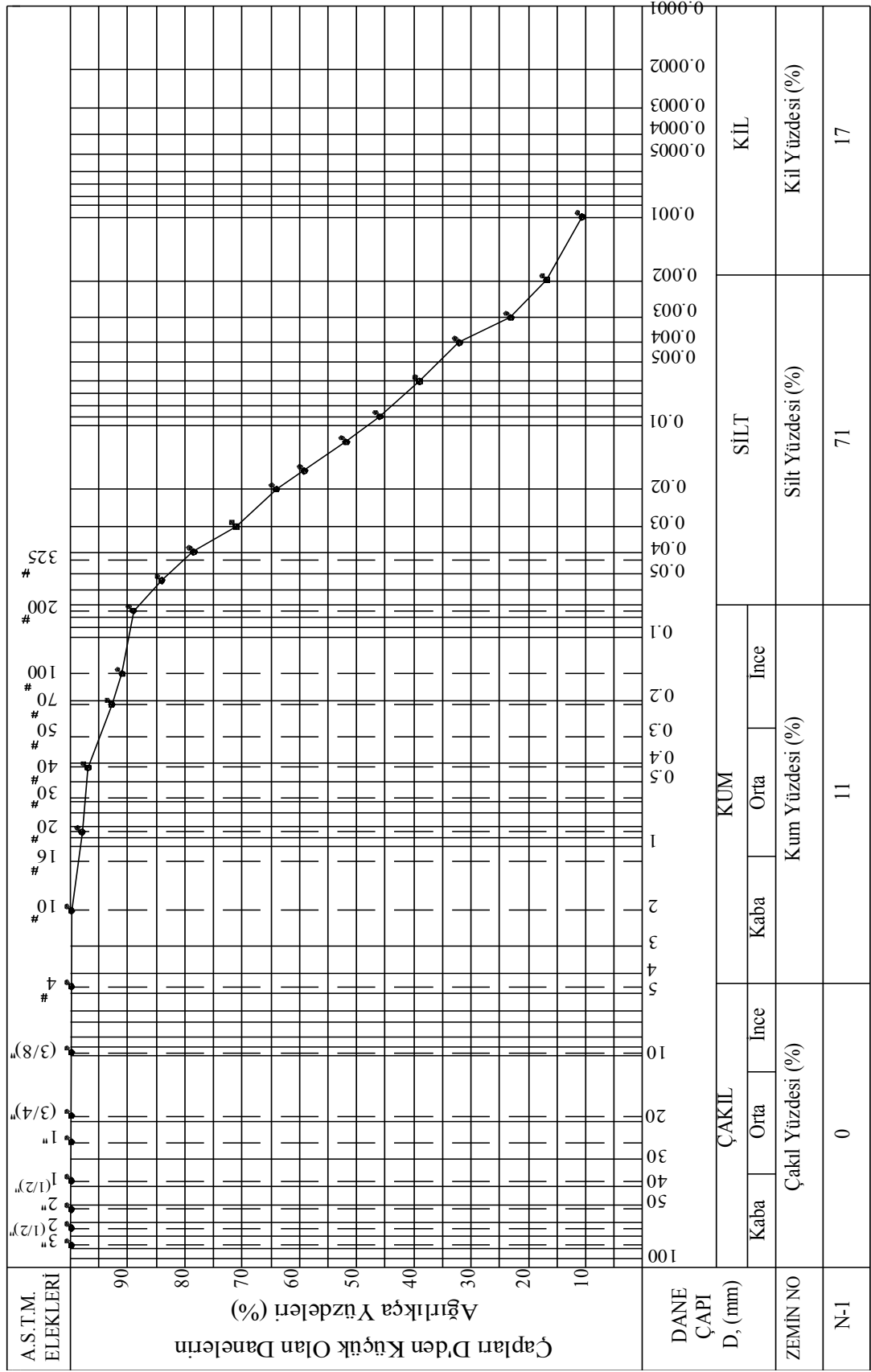
A.1.1 N-1 numaralı numunenin elek ve hidrometre analizi

Tablo A.1 Elek analizi

Elek no	Delik çapı (mm)	Elek üstünde kalan miktar (gr)	Elekten geçen miktar	
			gr	%
3/4	19.50	0	593.0	100
3/8	9.53	0	593.0	100
4	4.75	0	593.0	100
10	2.00	0	593.0	100
20	0.85	10.2	582.8	98
40	0.425	8.5	574.3	97
70	0.21	20.2	554.1	93
100	0.15	13.4	540.7	91
200	0.075	12.5	528.2	89

Tablo A.2 Hidrometre analizi

t (dakika)	R _h	R _h	R	H _e	D (mm)	P' (%)	P (%)
0.25	52	53	50	7.69	0.074	100	89
0.5	49	50	47	8.18	0.054	94	84
1	46	47	44	8.66	0.039	88	78
2	42	43	40	9.31	0.029	80	71
4	38	39	36	9.96	0.021	72	64
8	35	36	33	10.45	0.015	66	59
15	31	32	29	11.10	0.012	58	52
30	28	29	26	11.59	0.008	52	46
60	24	25	22	12.24	0.006	44	39
120	20	21	18	12.89	0.004	36	32
240	15	16	13	13.70	0.003	26	23
480	11	12	9	14.35	0.002	18	17
1440	8	9	6	14.84	0.001	12	11



Şekil A.1 N-1 numunesine ait dane dağılımı eğrisi

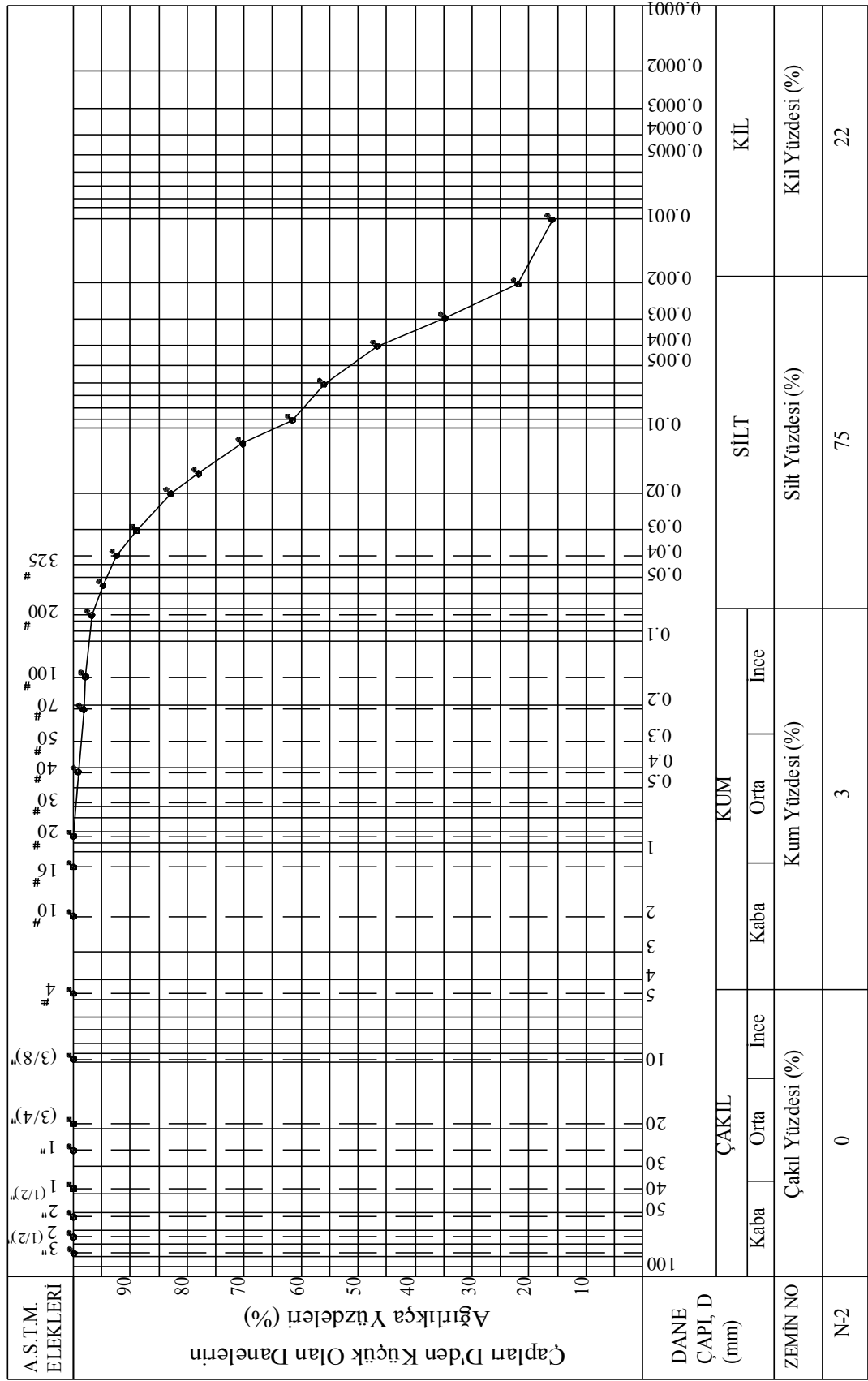
A.1.2 N-2 numaralı numunenin elek ve hidrometre analizi

Tablo A.3 Elek analizi

Elek no	Delik çapı (mm)	Elek üstünde kalan miktar (gr)	Elekten geçen miktar	
			gr	%
3/4	19.50	0	556.0	100
3/8	9.53	0	556.0	100
4	4.75	0	556.0	100
10	2.00	0	556.0	100
20	0.85	0	556.0	100
40	0.425	5.5	550.5	99
70	0.21	3.4	547.1	98
100	0.15	2.0	545.1	98
200	0.075	6.0	539.1	97

Tablo A.4 Hidrometre analizi

t (dakika)	R _h	R'	R	H _e	D (mm)	P' (%)	P (%)
0.25	52	53	50	7.69	0.074	100	97
0.5	51	52	49	7.85	0.053	98	95
1	50	51	48	8.01	0.038	96	93
2	48	49	46	8.34	0.027	92	89
4	45	46	43	8.83	0.020	86	83
8	42	43	40	9.31	0.014	80	78
15	38	39	36	9.96	0.011	72	70
30	34	35	32	10.61	0.008	64	62
60	31	32	29	11.10	0.006	58	56
120	26	27	24	11.91	0.004	48	47
240	20	21	18	12.89	0.003	36	35
480	14	15	12	13.86	0.002	24	22
1440	10	11	8	14.51	0.001	16	16



Şekil A.1 N-2 numunesine ait dane dağılımı eğrisi

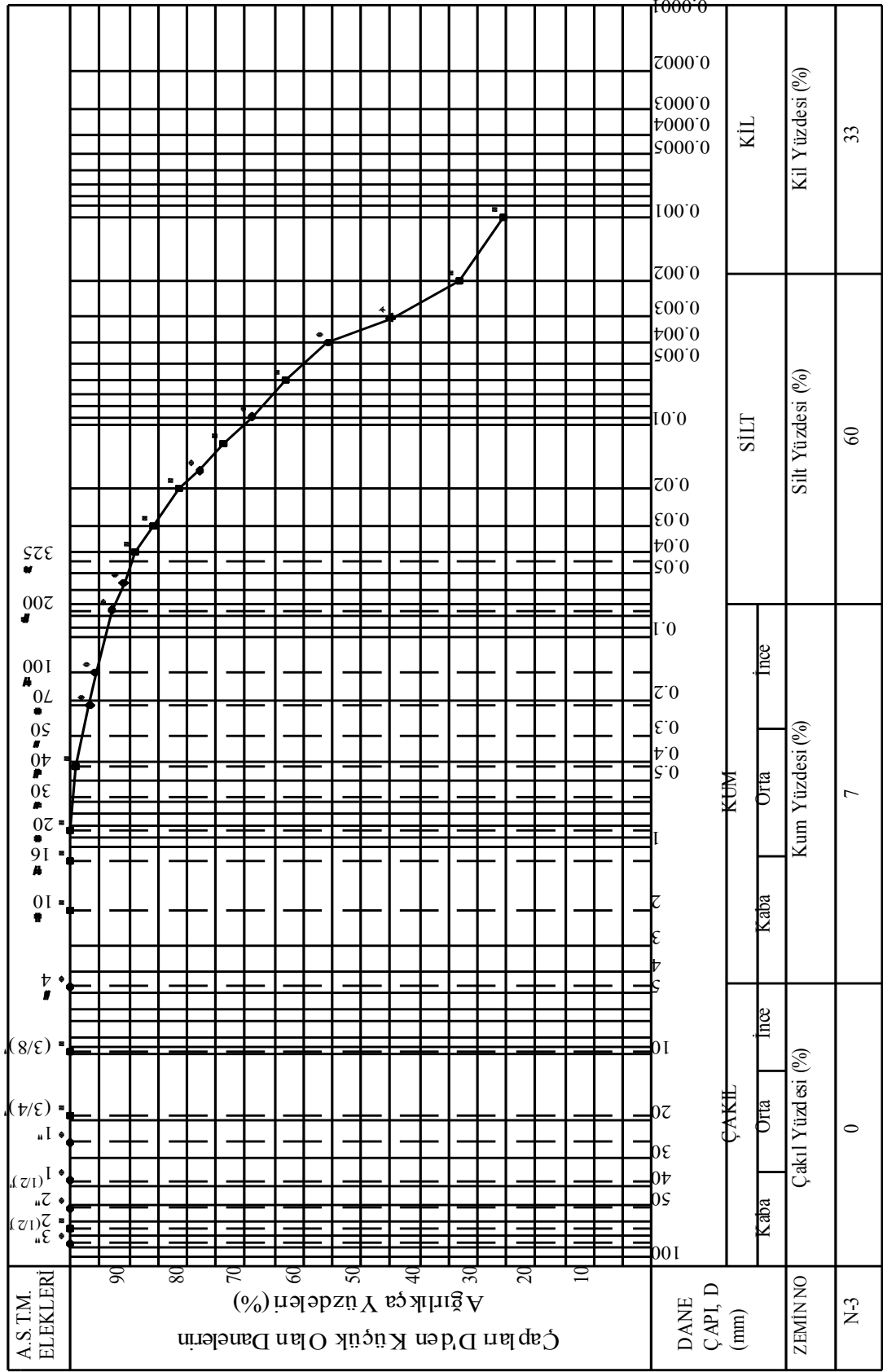
A.1.3 N-3 numaralı numunenin elek ve hidrometre analizi

Tablo A.5 Elek analizi

Elek no	Delik çapı (mm)	Elek üstünde kalan miktar (gr)	Elekten geçen miktar	
			gr	%
3/4	19.50	0	582.0	100
3/8	9.53	0	582.0	100
4	4.75	0	582.0	100
10	2.00	0	582.0	100
20	0.85	0	582.0	100
40	0.425	7.2	574.8	99
70	0.21	8.8	566.0	97
100	0.15	7.0	559.0	96
200	0.075	17.8	541.2	93

Tablo A.6 Hidrometre analizi

t (dakika)	R _h	R'	R	H _e	D (mm)	P' (%)	P (%)
0.25	52	53	50	7.69	0.074	100	93
0.5	51	52	49	7.85	0.053	98	91
1	50	51	48	8.01	0.038	96	89
2	48	49	46	8.34	0.027	92	86
4	46	47	44	8.66	0.020	88	82
8	44	45	42	8.99	0.014	84	78
15	42	43	40	9.31	0.011	80	74
30	39	40	37	9.80	0.008	74	69
60	36	37	34	10.29	0.006	68	63
120	31	33	30	10.94	0.004	60	56
240	26	27	24	11.91	0.003	48	45
480	20	21	18	12.89	0.002	36	33
1440	16	17	14	13.54	0.001	28	26



A.2 Likit ve Plastik Limit Deneyleri

A.2.1 N-1 numaralı numunenin plastik ve likit limit değerlerinin belirlenmesi

Tablo A.7 Plastik limit deneyi

Plastik Limit Deneyi		
Kap no	59	57
Islak num.+dara ağı. (gr)	44.6	46.3
Kuru num.+dara ağı. (gr)	41.7	43.6
Su miktarı (gr)	2.9	2.7
Dara ağırlığı (gr)	24.6	26.7
Kuru zemin ağı.(gr)	17.1	16.9
Su muhtevası, w (%)	17	16
Plastik limit, w_p (%)	17	

Tablo A.8 Likit limit deneyi

Likit Limit Deneyi			
Kap no	48	75	13
Vuruş sayısı	50	31	15
Islak num.+dara ağı. (gr)	93.8	76.6	90.8
Kuru num.+dara ağı. (gr)	75.6	61.5	70.5
Su miktarı (gr)	18.2	15.1	20.3
Dara ağırlığı (gr)	26.4	22.8	23.3
Kuru zemin ağı.(gr)	49.2	38.7	47.2
Su muhtevası, w (%)	37	39	43

A.2.2 N-2 numaralı numunenin plastik ve likit limit değerlerinin belirlenmesi

Tablo A.9 Plastik limit deneyi

Plastik Limit Deneyi		
Kap no	63	22
Islak num.+dara ağı. (gr)	41.8	41.8
Kuru num.+dara ağı. (gr)	38.5	38.3
Su miktarı (gr)	3.3	3.5
Dara ağırlığı (gr)	23.3	22.0
Kuru zemin ağı.(gr)	15.2	16.3
Su muhtevası, w (%)	22	21
Plastik limit, w_p (%)	22	

Tablo A.10 Likit limit deneyi

Likit Limit Deneyi			
Kap no	17	77	31
Vuruş sayısı	31	20	8
Islak num.+dara ağ. (gr)	66.0	62.5	91.4
Kuru num.+dara ağ. (gr)	51.5	48.6	65.5
Su miktarı (gr)	14.5	13.9	25.9
Dara ağırlığı (gr)	25.5	25.1	24.0
Kuru zemin ağ.(gr)	26.0	23.5	41.5
Su muhtevası, w (%)	56	59	62

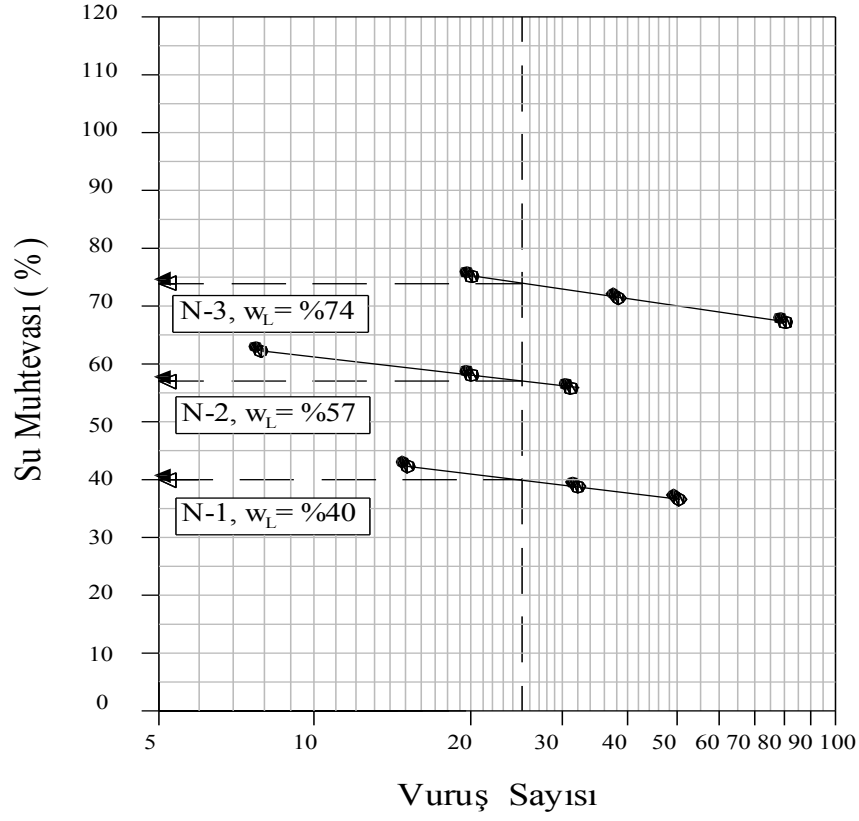
A.2.3 N-3 numaralı numunenin plastik ve likit limit değerlerinin belirlenmesi

Tablo A.11 Plastik limit deneyi

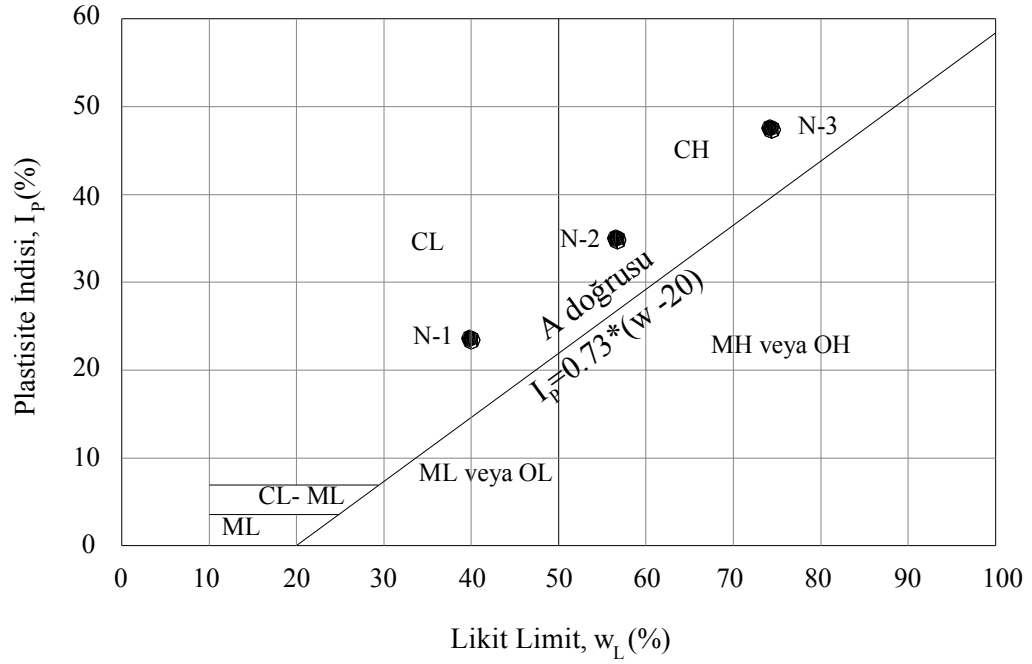
Plastik Limit Deneyi		
Kap no	70	52
Islak num.+dara ağ. (gr)	37.9	42.0
Kuru num.+dara ağ. (gr)	34.8	38.4
Su miktarı (gr)	3.1	3.6
Dara ağırlığı (gr)	23.0	24.7
Kuru zemin ağ.(gr)	11.8	13.7
Su muhtevası, w (%)	26	26
Plastik limit, w_p (%)	26	

Tablo A.12 Likit limit deneyi

Likit Limit Deneyi			
Kap no	57	85	43
Vuruş sayısı	80	38	20
Islak num.+dara ağ. (gr)	63.8	54.5	99.6
Kuru num.+dara ağ. (gr)	48.7	39.8	66.9
Su miktarı (gr)	15.1	14.7	32.7
Dara ağırlığı (gr)	26.5	19.5	23.2
Kuru zemin ağ.(gr)	22.2	20.3	43.7
Su muhtevası, w (%)	68	72	75



Şekil A.4 Vuruş sayısının su muhtevası ile değişimi



Şekil A.5 Plastisite kartı

A.3 Dane Birim Hacim Ağırlığının Belirlenmesi

A.3.1 N-1 numaralı numunenin dane birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Tablo A.13 Dane birim hacim ağırlığı deneyi

Piknometre No.	2	3
Kuru zemin ağırlığı, W_1 (gr)	50	50
Su + Piknometre ağırlığı, W_2 (gr)	419.94	392.28
W_1+W_2	469.94	442.28
Su + Piknometre – Zemin ağı., W_3 (gr)	451.21	423.62
$W_1+W_2-W_3$	18.73	18.66
$G_s = (W_1) / (W_1+W_2-W_3)$	2.67	2.68
G_s	2.68	

A.3.2 N-2 numaralı numunenin dane birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Tablo A.14 Dane birim hacim ağırlığı deneyi

Piknometre No.	2	3
Kuru zemin ağırlığı, W_1 (gr)	50	50
Su + Piknometre ağırlığı, W_2 (gr)	419.94	392.28
W_1+W_2	469.94	442.28
Su + Piknometre – Zemin ağı., W_3 (gr)	451.28	423.95
$W_1+W_2-W_3$	18.66	18.38
$G_s = (W_1) / (W_1+W_2-W_3)$	2.68	2.72
G_s	2.70	

A.3.3 N-3 numaralı numunenin dane birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Tablo A.15 Dane birim hacim ağırlığı deneyi

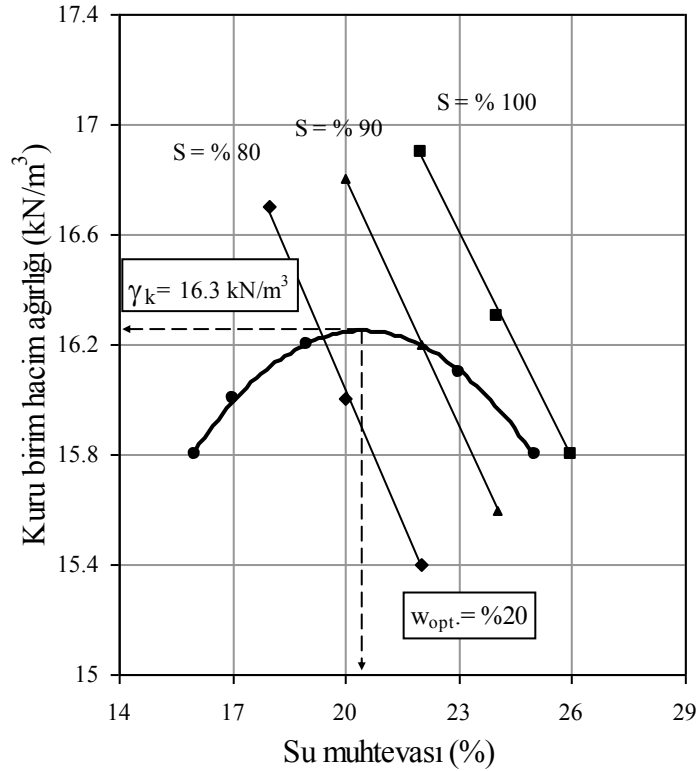
Piknometre No.	2	3
Kuru zemin ağırlığı, W_1 (gr)	50	50
Su + Piknometre ağırlığı, W_2 (gr)	419.94	392.28
W_1+W_2	469.94	442.28
Su + Piknometre – Zemin ağı., W_3 (gr)	451.56	424.03
$W_1+W_2-W_3$	18.38	18.25
$G_s = (W_1) / (W_1+W_2-W_3)$	2.72	2.74
G_s	2.73	

A.4 Standart Kompaksiyon Deneyleri

A.4.1 N-1 numaralı numunenin standart kompaksiyon deneyi

Tablo A.16 Standart kompaksiyon deneyi

Deney numarası	1		2		3		4		5	
Kalıp hacmi (cm ³)	948		948		948		948		948	
Kalıp ağırlığı (gr)	2120		2120		2120		2120		2120	
Yaş numune+kalıp ağırlığı (gr)	3850		3885		3940		3990		3990	
Yaş numune ağırlığı (gr)	1730		1765		1820		1870		1870	
Birim hacim ağırlığı, γ (gr/cm ³)	1.83		1.87		1.93		1.98		1.98	
Kap numarası	88	13	81	50	59	56	39	43	11	57
Kap ağırlığı (gr)	25.4	23.3	26.2	24.9	24.6	25.5	24.0	23.2	22.7	26.7
Yaş numune+kap ağırlığı (gr)	95.9	86.4	70.9	75.8	75.3	70.7	62.0	67.1	64.2	62.2
Kuru numune+kap ağırlığı (gr)	86.7	77.7	64.4	68.4	67.2	63.8	54.9	58.9	55.9	55.1
Su miktarı (gr)	9.2	8.7	6.5	7.4	8.1	6.9	7.1	8.2	8.3	7.1
Kuru numune miktarı (gr)	61.3	54.4	38.2	43.5	42.6	38.3	30.9	35.7	33.2	28.4
Su muhtevası (%)	15	16	17	17	19	18	23	23	25	25
Ortalama su muhtevası, w (%)	16		17		19		23		25	
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_k (kN/m ³)	15.8		16.0		16.2		16.1		15.8	

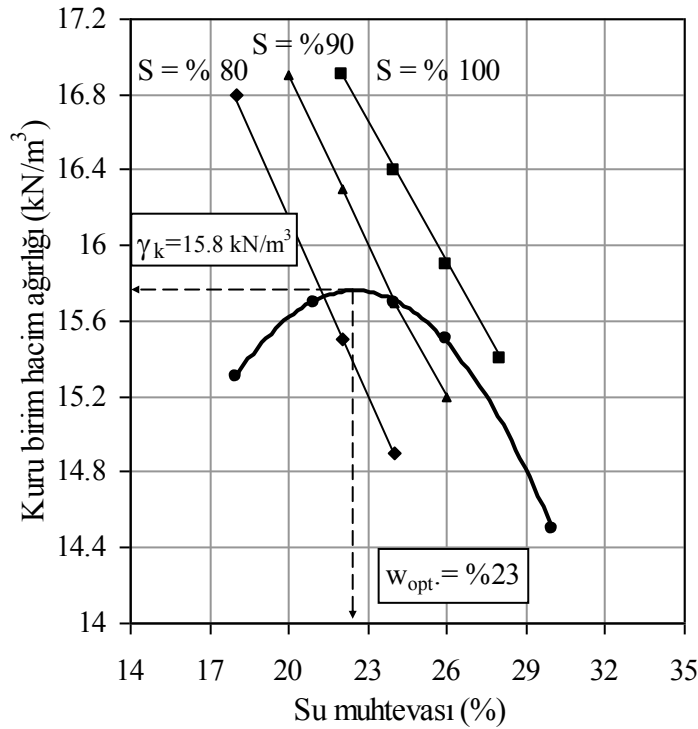


Şekil A.6 N-1 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.4.2 N-2 numaralı numunenin standart kompaksiyon deneyi

Tablo A.17 Standart kompaksiyon deneyi

Deney numarası	1		2		3		4		5	
Kalıp hacmi (cm ³)	948		948		948		948		948	
Kalıp ağırlığı (gr)	2120		2120		2120		2120		2120	
Yaş numune+kalıp ağı. (gr)	3890		3920		3970		3970		3900	
Yaş numune ağırlığı (gr)	1770		1800		1850		1850		1780	
Birim hacim ağı., γ (g/cm ³)	1.88		1.90		1.95		1.95		1.88	
Kap numarası	43	57	51	48	11	86	59	75	50	56
Kap ağırlığı (gr)	23.2	26.7	23.1	26.4	22.7	23.5	24.6	22.8	24.9	25.5
Yaş numune+kap ağı. (gr)	70.5	65.8	66.5	78.3	69.7	76.0	79.3	75.0	80.0	93.0
Kuru numune+kap ağı. (gr)	63.2	60.2	58.8	69.6	60.7	65.9	68.0	64.4	67.5	77.6
Su miktarı (gr)	7.3	5.6	7.7	8.7	9.0	10.1	11.3	10.6	12.5	15.4
Kuru numune miktarı (gr)	40.0	33.5	35.7	43.2	38.0	42.4	43.4	41.6	42.6	52.1
Su muhtevası (%)	18	17	22	20	24	24	26	25	29	30
Ortalama su muhtevası, w (%)	18		21		24		26		30	
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_k (kN/m ³)	15.3		15.7		15.7		15.5		14.5	

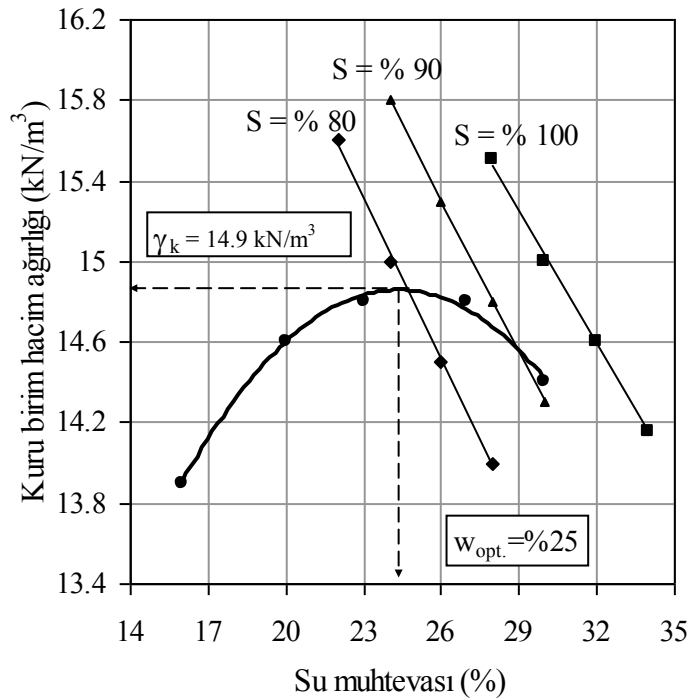


Şekil A.7 N-2 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

A.4.3 N-3 numaralı numunenin standart kompaksiyon deneyi

Tablo A.18 Standart kompaksiyon deneyi

Deney numarası	1		2		3		4		5	
Kalıp hacmi (cm ³)	948		948		948		948		948	
Kalıp ağırlığı (gr)	2120		2120		2120		2120		2120	
Yaş numune+kalıp ağı. (gr)	3650		3780		3850		3900		3890	
Yaş numune ağırlığı (gr)	1530		1660		1730		1780		1770	
Birim hacim ağı. γ (gr/cm ³)	1.61		1.75		1.82		1.88		1.87	
Kap numarası	39	13	43	58	81	87	57	64	88	48
Kap ağırlığı (gr)	24.0	23.3	23.2	21.7	26.2	24.8	26.7	23.0	25.4	26.4
Yaş numune+kap ağı. (gr)	58.5	74.9	67.1	53.8	66.1	68.0	59.3	70.7	76.3	86.4
Kuru numune+kap ağı. (gr)	53.7	67.8	59.5	48.7	58.6	59.8	52.6	60.7	64.7	72.8
Su miktarı (gr)	4.8	7.1	7.6	5.1	7.5	8.2	6.7	10.0	11.6	13.6
Kuru numune miktarı (gr)	29.7	44.5	36.3	27.0	32.4	35.0	25.9	37.7	39.3	46.4
Su muhtevası (%)	16	16	21	19	23	23	26	27	30	29
Ortalama su muhtevası, w (%)	16		20		23		27		30	
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_k (kN/m ³)	13.9		14.6		14.8		14.8		14.4	



Şekil A.8 N-3 numunesine ait standart kompaksiyon eğrisi

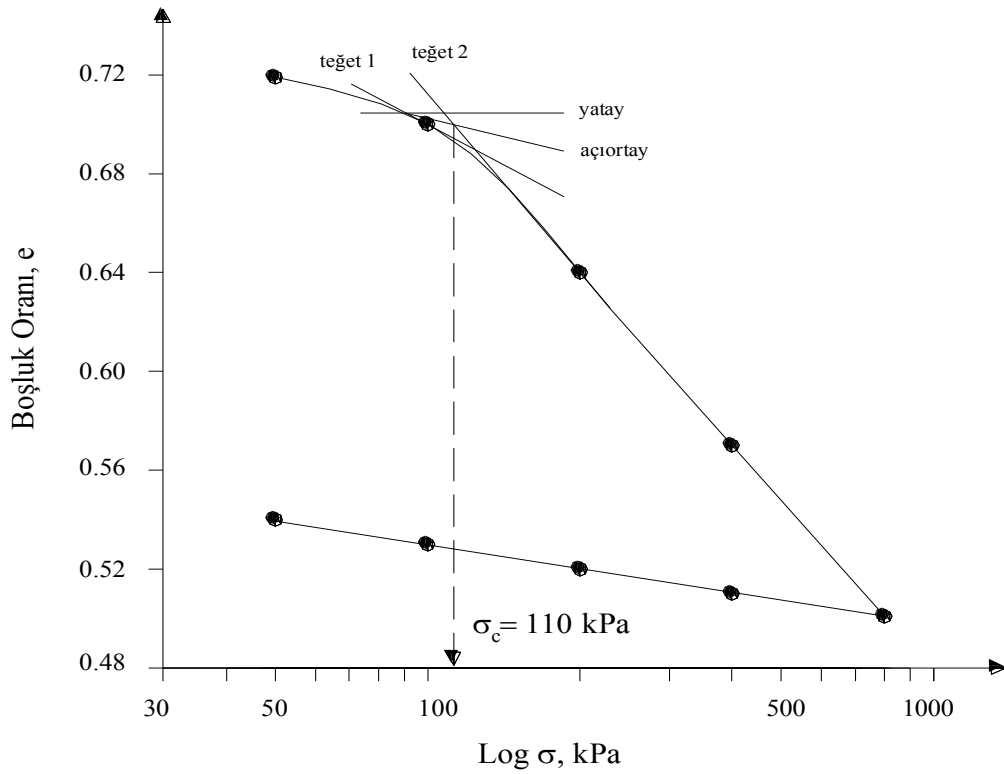
A.5 Konsolidasyon Deneyleri

A.5.1 N-1 numaralı numunenin konsolidasyon deneyi

Tablo A.19 Konsolidasyon deneyi

σ (kg/cm ²)	S (1/100 mm)	H (mm)	$\Delta\sigma$ (kg/cm ²)	ΔH (mm)	Δe	e	$e_{ort.}$	a_v (cm ² /kg)	m_v (cm ² /kg)
0	0	20.00	-	0	0	0.745	-	0	0
0.5	32.5	19.68	0-0.5	0.32	0.028	0.717	0.731	0.056	0.032
1	55.8	19.44	0.5-1	0.24	0.021	0.696	0.707	0.042	0.025
2	121.0	18.79	1-2	0.65	0.057	0.639	0.668	0.057	0.034
4	203.0	17.97	2-4	0.82	0.071	0.568	0.604	0.036	0.022
8	283.5	17.17	4-8	0.80	0.070	0.498	0.533	0.018	0.012
4	276.0	17.24	8-4	-0.07	-0.006	0.504	0.501	-	-
2	261.0	17.39	4-2	-0.15	-0.013	0.517	0.511	-	-
1	245.0	17.55	2-1	-0.16	0.014	0.531	0.524	-	-
0.5	235.0	17.65	1-0.5	-0.10	0.009	0.540	0.536	-	-

- Ön konsolidasyon basıncı, sıkışma indisi ve şişme indisinin belirlenmesi

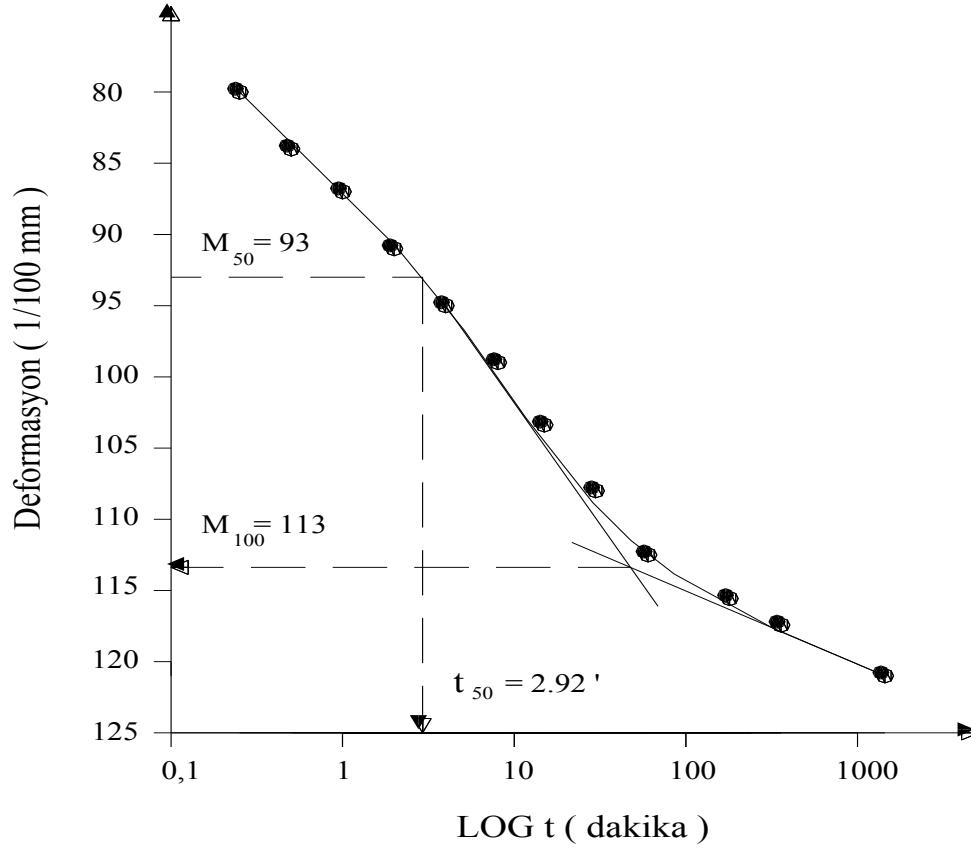


Şekil A.9 Konsolidasyon deneyinden elde edilen e – Log σ ilişkisi

$$\text{Sıkışma indisi} = C_c = (e_1 - e_2) / \log (\sigma_2 / \sigma_1) = (0.568 - 0.498) / \log (800 / 400) = 0.23$$

$$\text{Şişme indisi} = C_s = (e_1 - e_2) / \log (\sigma_2 / \sigma_1) = (0.504 - 0.498) / \log (800 / 400) = 0.02$$

- **Konsolidasyon katsayısının ve permeabilitenin belirlenmesi ($\Delta\sigma = 100 - 200$ kPa)**



Şekil A.10 Log t – deformasyon eğrisi ($\Delta\sigma = 100-200$ kPa)

$$t = 1 \text{ dak için } M = 87 \text{ mm (1/100)}$$

$$t = 0.25 \text{ dak için } M = 80 \text{ mm (1/100)}$$

$$M_0 = 80 - (87-80) = 73 \text{ mm}$$

$$M_{50} = M_0 + (M_{100}-M_0)/2 = 73 + (113-73)/2 = 93 \text{ mm}$$

$$M_{50} \text{ için } t_{50} = 2.92 \text{ dak} = 175.4 \text{ saniye}$$

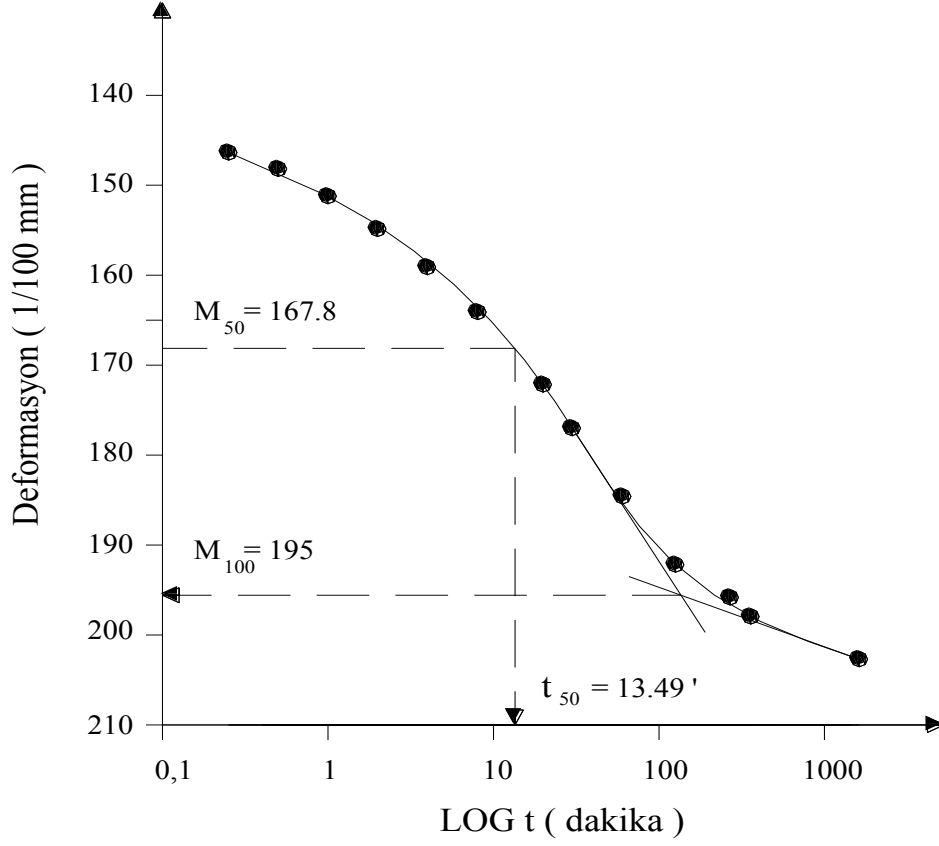
$$H = ((20-0.56) + (20-1.21)) / 2 = 19.12 \text{ mm}$$

$$H_d = H/2 = 19.56/2 = 9.56 \text{ mm} = 0.956 \text{ cm}$$

$$c_v = (T_v \times H_d^2) / t_{50} = (0.197 \times 0.956^2) / 175.4 = 1.03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{san}$$

$$k = c_v \times m_v \times \gamma_w = 1.03 \times 10^{-3} \times 0.034 \times 10^{-3} = 3.5 \times 10^{-8} \text{ cm} / \text{san}$$

- **Konsolidasyon katsayısının ve permeabilitenin belirlenmesi ($\Delta\sigma = 200 - 400$ kPa)**



Şekil A.11 Log t – deformasyon eğrisi ($\Delta\sigma = 200-400$ kPa)

$$t = 1 \text{ dak için } M = 151.5 \text{ mm (1/100)}$$

$$t = 0.25 \text{ dak için } M = 146 \text{ mm (1/100)}$$

$$M_O = 146 - (151.5 - 146) = 140.5 \text{ mm}$$

$$M_{50} = M_O + (M_{100} - M_O)/2 = 140.5 + (195 - 140.5)/2 = 167.8 \text{ mm}$$

$$M_{50} \text{ için } t_{50} = 13.49 \text{ dak} = 809.4 \text{ saniye}$$

$$H = ((20 - 1.21) + (20 - 2.03)) / 2 = 18.38 \text{ mm}$$

$$H_d = H/2 = 18.38/2 = 9.19 \text{ mm} = 0.919 \text{ cm}$$

$$c_v = (T_v \times H_d^2) / t_{50} = (0.197 \times 0.919^2) / 809.4 = 2.06 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{san}$$

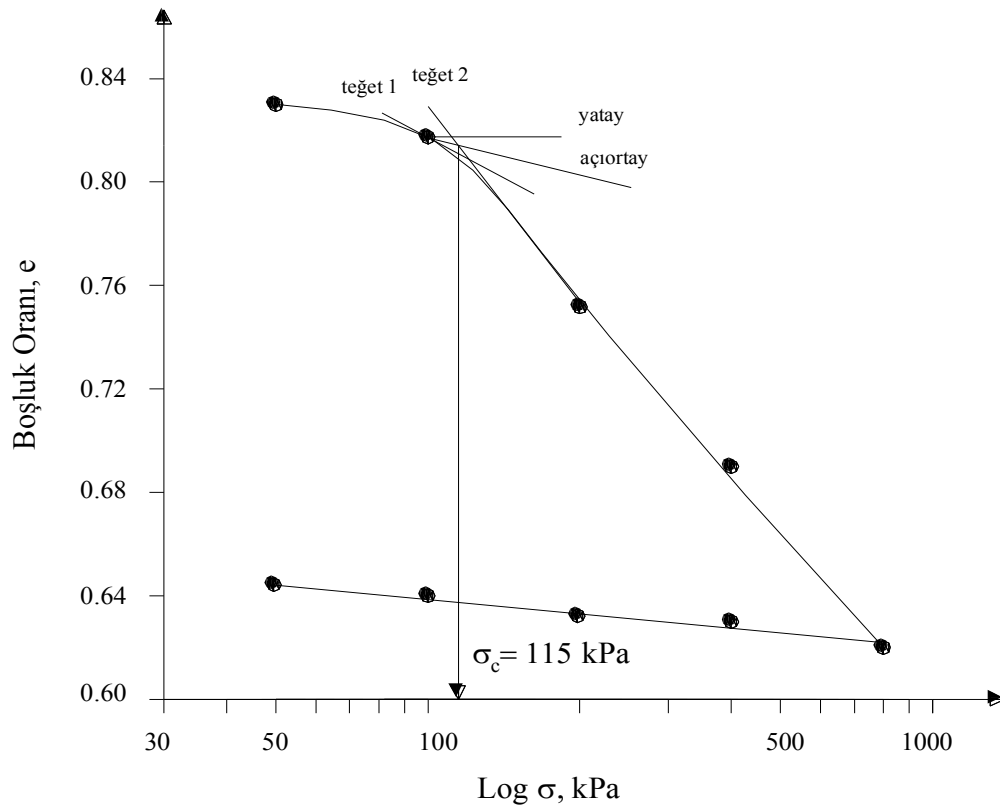
$$k = c_v \times m_v \times \gamma_w = 2.06 \times 10^{-4} \times 0.022 \times 10^{-3} = 4.5 \times 10^{-9} \text{ cm} / \text{san}$$

A.5.2 N-2 numaralı numunenin konsolidasyon deneyi

Tablo A.20 Konsolidasyon deneyi

σ (kg/cm ²)	S (1/100 mm)	H (mm)	$\Delta\sigma$ (kg/cm ²)	ΔH (mm)	Δe	e	$e_{ort.}$	a_v (cm ² /kg)	m_v (cm ² /kg)
0	0	20.00	-	0	0	0.854	-	0	0
0.5	28.0	19.72	0-0.5	0.280	0.026	0.828	0.841	0.052	0.028
1	37.5	19.63	0.5-1	0.090	0.008	0.820	0.824	0.016	0.001
2	114.0	18.86	1-2	0.770	0.072	0.748	0.784	0.072	0.040
4	177.0	18.23	2-4	0.630	0.059	0.689	0.719	0.030	0.017
8	253.0	17.47	4-8	0.760	0.071	0.618	0.654	0.018	0.011
4	242.0	17.58	8-4	-0.110	-0.010	0.628	0.623	-	-
2	239.0	17.61	4-2	-0.030	-0.003	0.631	0.630	-	-
1	233.0	17.67	2-1	-0.060	-0.006	0.637	0.634	-	-
0.5	226.5	17.74	1-0.5	-0.070	-0.007	0.644	0.641	-	-

- Ön konsolidasyon basıncı, sıkışma indisi ve şişme indisinin belirlenmesi

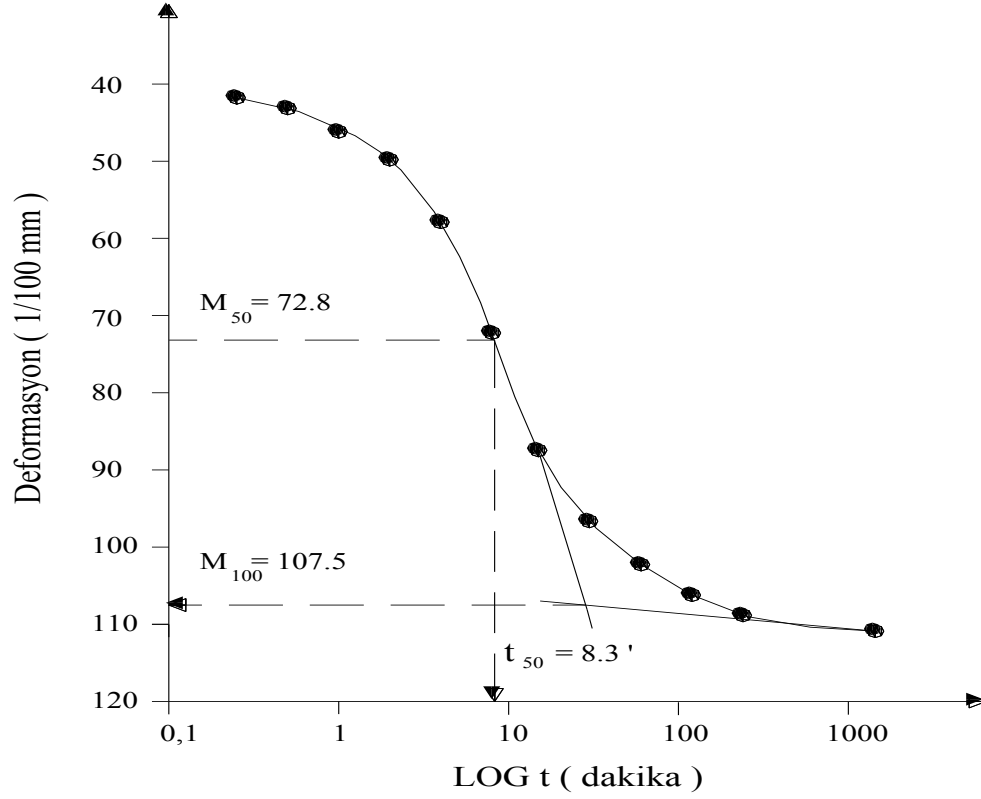


Şekil A.12 Log σ – e grafiği

$$\text{Sıkışma indisi} = C_c = (e_1 - e_2) / \log (\sigma_2 / \sigma_1) = (0.689 - 0.618) / \log (800 / 400) = 0.240$$

$$\text{Şişme indisi} = C_s = (e_1 - e_2) / \log (\sigma_2 / \sigma_1) = (0.628 - 0.618) / \log (800 / 400) = 0.033$$

- Konsolidasyon katsayısının ve permeabilitenin belirlenmesi ($\Delta\sigma = 100\text{--}200 \text{ kPa}$)



Şekil A.13 Log t – deformasyon eğrisi ($\Delta\sigma = 100\text{--}200 \text{ kPa}$)

$t = 1 \text{ dak}$ için $M = 46 \text{ mm (1/100)}$

$t = 0.25 \text{ dak}$ için $M = 42 \text{ mm (1/100)}$

$M_0 = 42 - (46 - 42) = 38 \text{ mm}$

$M_{50} = M_0 + (M_{100} - M_0)/2 = 38 + (107.5 - 38)/2 = 72.8 \text{ mm}$

M_{50} için $t_{50} = 8.3 \text{ dak} = 498 \text{ saniye}$

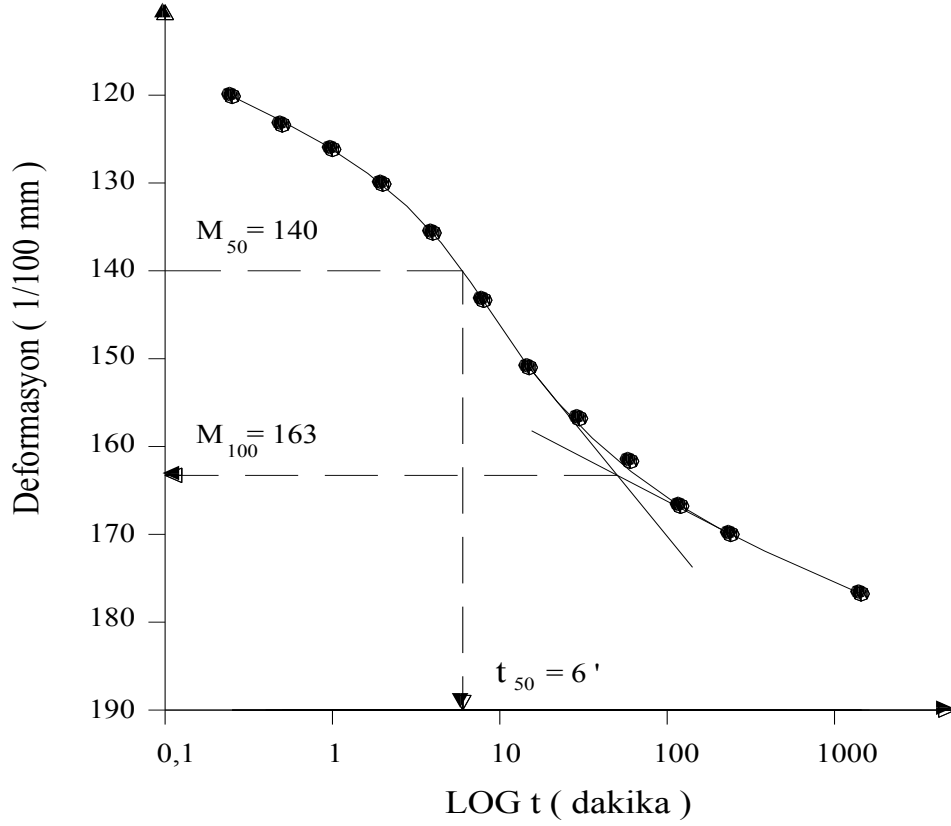
$H = ((20 - 0.375) + (20 - 1.11)) / 2 = 19.26 \text{ mm}$

$H_d = H/2 = 19.26/2 = 9.63 \text{ mm} = 0.963 \text{ cm}$

$c_v = (T_v \times H_d^2) / t_{50} = (0.197 \times 0.963^2) / 498 = 3.67 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{san}$

$k = c_v \times m_v \times \gamma_w = 3.67 \times 10^{-4} \times 0.040 \times 10^{-3} = 1.47 \times 10^{-8} \text{ cm} / \text{san}$

- **Konsolidasyon katsayısının ve permeabilitenin belirlenmesi ($\Delta\sigma = 200\text{--}400\text{ kPa}$)**



Şekil A.14 Log t – deformasyon eğrisi ($\Delta\sigma = 200\text{--}400\text{ kPa}$)

$t = 1\text{ dak için } M = 126\text{ mm (1/100)}$

$t = 0.25\text{ dak için } M = 121.5\text{ mm (1/100)}$

$M_O = 121.5 - (126 - 121.5) = 117\text{ mm}$

$M_{50} = M_O + (M_{100} - M_O)/2 = 117 + (163 - 117)/2 = 140\text{ mm}$

$M_{50}\text{ için } t_{50} = 6\text{ dak} = 360\text{ saniye}$

$H = ((20 - 1.14) + (20 - 1.77)) / 2 = 18.55\text{ mm}$

$H_d = H/2 = 18.55/2 = 9.28\text{ mm} = 0.928\text{ cm}$

$c_v = (T_v \times H_d^2) / t_{50} = (0.197 \times 0.928^2) / 360 = 4.71 \times 10^{-4}\text{ cm}^2 / \text{san}$

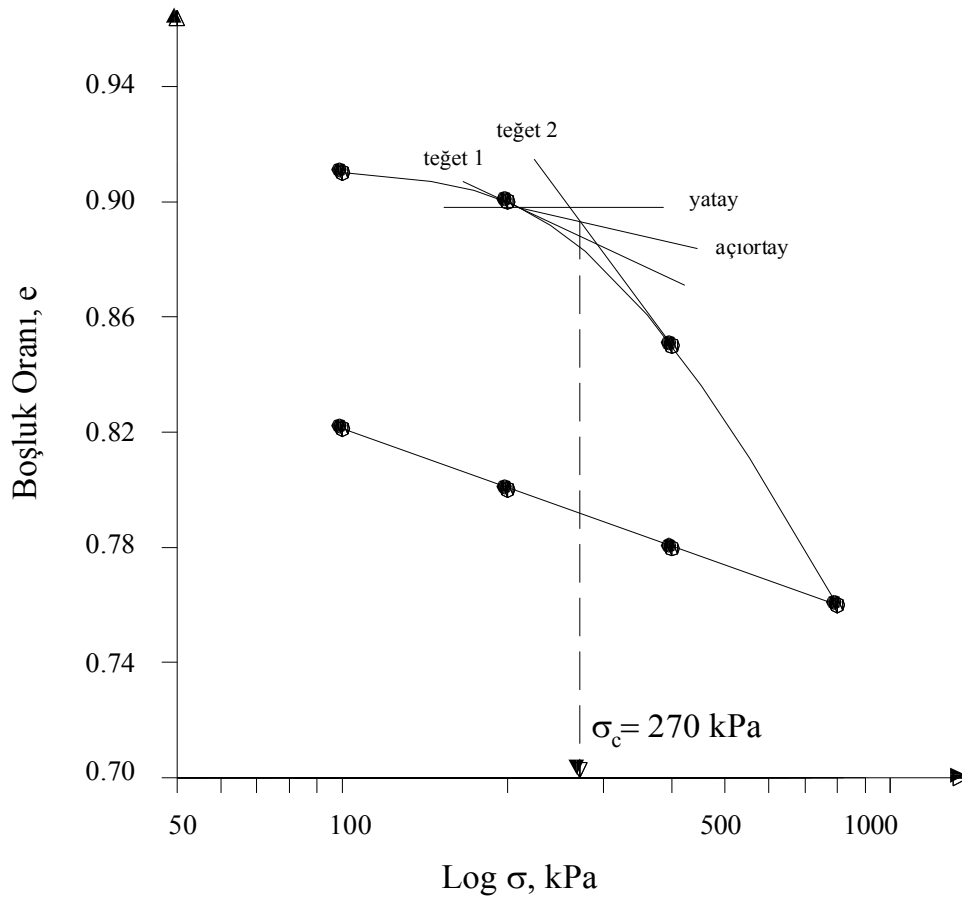
$k = c_v \times m_v \times \gamma_w = 4.71 \times 10^{-4} \times 0.017 \times 10^{-3} = 8.01 \times 10^{-9}\text{ cm} / \text{san}$

A.5.3 N-3 numaralı numunenin konsolidasyon deneyi

Tablo A.21 Konsolidasyon deneyi

σ	S (1/100mm)	H (mm)	$\Delta\sigma$	ΔH (mm)	Δe	e	$e_{ort.}$	a_v (cm ² /kg)	m_v (cm ² /kg)
0	0	20.00	-	0	0	0.917	-	0	0
1	4.5	19.96	0-1	0.04	0.004	0.913	0.915	0.004	0.002
2	16.7	19.83	1-2	0.13	0.012	0.901	0.907	0.012	0.006
4	75.0	19.25	2-4	0.58	0.056	0.845	0.873	0.028	0.015
8	163.0	18.37	4-8	0.88	0.084	0.761	0.803	0.021	0.012
4	149.5	18.51	8-4	-0.14	-0.013	0.774	0.768	-	-
2	126.0	18.74	4-2	-0.23	-0.022	0.796	0.785	-	-
1	102.5	18.98	2-1	-0.24	-0.023	0.819	0.808	-	-

- Ön konsolidasyon basıncı, sıkışma indisi ve şişme indisinin belirlenmesi

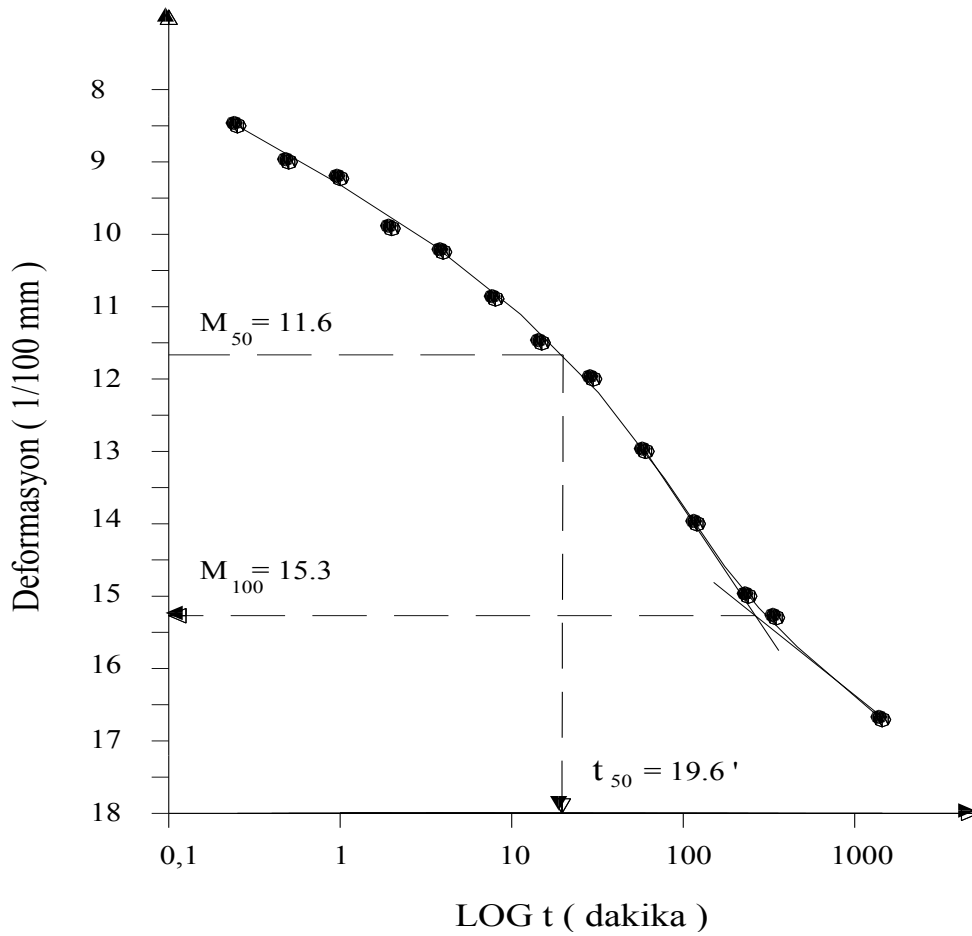


Şekil A.15 Log σ – e grafiği

$$\text{Sıkışma indisi} = C_c = (e_1 - e_2) / \log (\sigma_2 / \sigma_1) = (0.845 - 0.761) / \log (800 / 400) = 0.280$$

$$\text{Şişme indisi} = C_s = (e_1 - e_2) / \log (\sigma_2 / \sigma_1) = (0.774 - 0.761) / \log (800 / 400) = 0.043$$

- Konsolidasyon katsayısının ve permeabilitenin belirlenmesi ($\Delta\sigma = 100 - 200$ kPa)



Şekil A.16 Log t – deformasyon eğrisi ($\Delta\sigma = 100-200$ kPa)

$t = 1$ dak için $M = 9.1$ mm (1/ 00)

$t = 0.25$ dak için $M = 8.5$ mm (1/100)

$M_0 = 8.5 - (9.1 - 8.5) = 7.9$ mm

$M_{50} = M_0 + (M_{100} - M_0)/2 = 7.9 + (15.3 - 7.9)/2 = 11.6$ mm

M_{50} için $t_{50} = 19.6$ dak = 1176 saniye

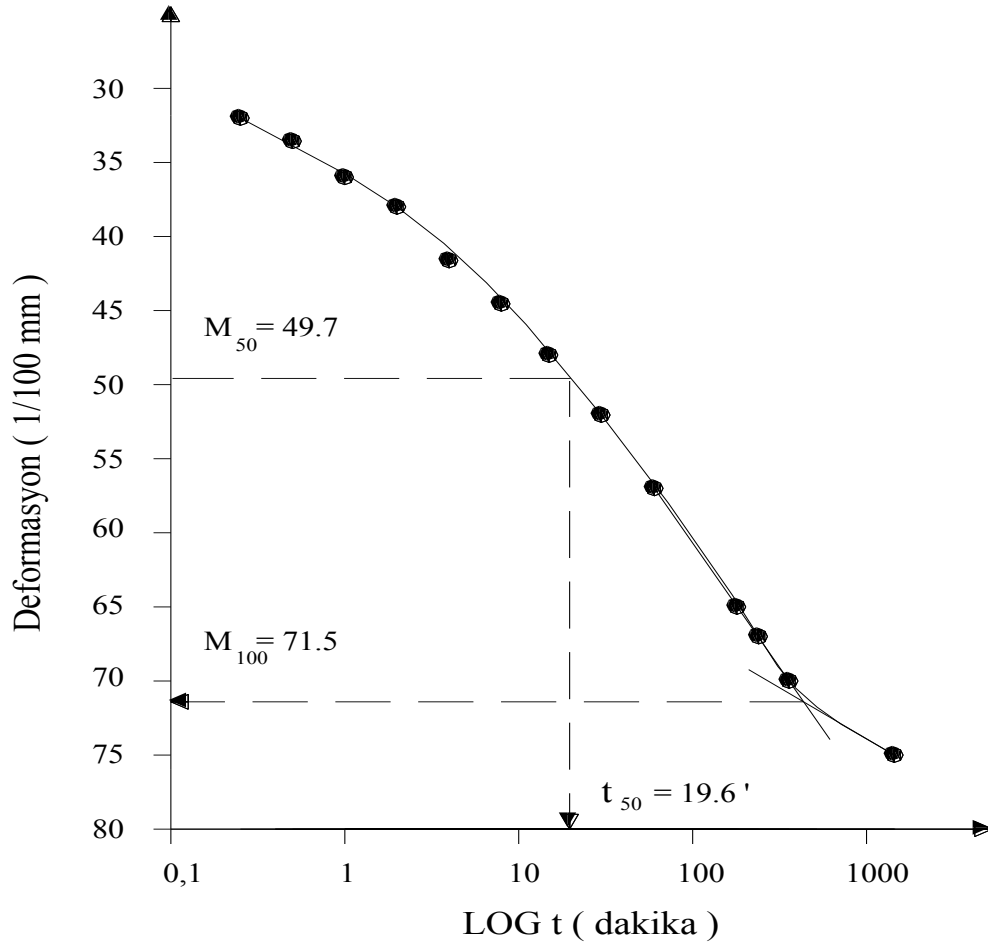
$H = ((20 - 0.05) + (20 - 0.17)) / 2 = 19.89$ mm

$H_d = H/2 = 19.89/2 = 9.945$ mm = 0.995 cm

$c_v = (T_v \times H_d^2) / t_{50} = (0.197 \times 0.995^2) / 1176 = 1.7 \times 10^{-4}$ cm² / san

$k = c_v \times m_v \times \gamma_w = 1.7 \times 10^{-4} \times 0.006 \times 10^{-3} = 1.02 \times 10^{-9}$ cm / san

- Konsolidasyon katsayısının ve permeabilitenin belirlenmesi ($\Delta\sigma = 200\text{--}400\text{ kPa}$)



Şekil A.17 Log t – deformasyon eğrisi ($\Delta\sigma = 200\text{--}400\text{ kPa}$)

$$t = 1 \text{ dak için } M = 35.7 \text{ mm (1/100)}$$

$$t = 0.25 \text{ dak için } M = 32 \text{ mm (1/100)}$$

$$M_0 = 32 - (35.7 - 32) = 28.3 \text{ mm}$$

$$M_{50} = M_0 + (M_{100} - M_0)/2 = 28.3 + (71.5 - 28.3)/2 = 49.7 \text{ mm}$$

$$M_{50} \text{ için } t_{50} = 19.6 \text{ dak} = 1176 \text{ saniye}$$

$$H = ((20 - 0.17) + (20 - 0.75)) / 2 = 19.54 \text{ mm}$$

$$H_d = H/2 = 19.54/2 = 9.770 \text{ mm} = 0.977 \text{ cm}$$

$$c_v = (T_v \times H_d^2) / t_{50} = (0.197 \times 0.977^2) / 1176 = 1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{san}$$

$$k = c_v \times m_v \times \gamma_w = 1.6 \times 10^{-4} \times 0.015 \times 10^{-3} = 2.4 \times 10^{-9} \text{ cm} / \text{san}$$

A.6 Kum Numunenin (N-4) Geoteknik Özelliklerinin Belirlenmesi

A.6.1 Elek analizi

Tablo A.22 Elek analizi

Elek no	Delik çapı (mm)	Elek üstünde kalan miktar (gr)	Elekten geçen miktar	
			gram	%
3/4	19.50	0	500	100
3/8	9.53	0	500	100
4	4.75	0	500	100
10	2.00	0	500	100
20	0.85	0	500	100
40	0.425	60	440	88
70	0.21	388	52	10
100	0.15	32	20	4
200	0.075	20	0	0

A.6.2 Dane birim hacim ağırlığının belirlenmesi

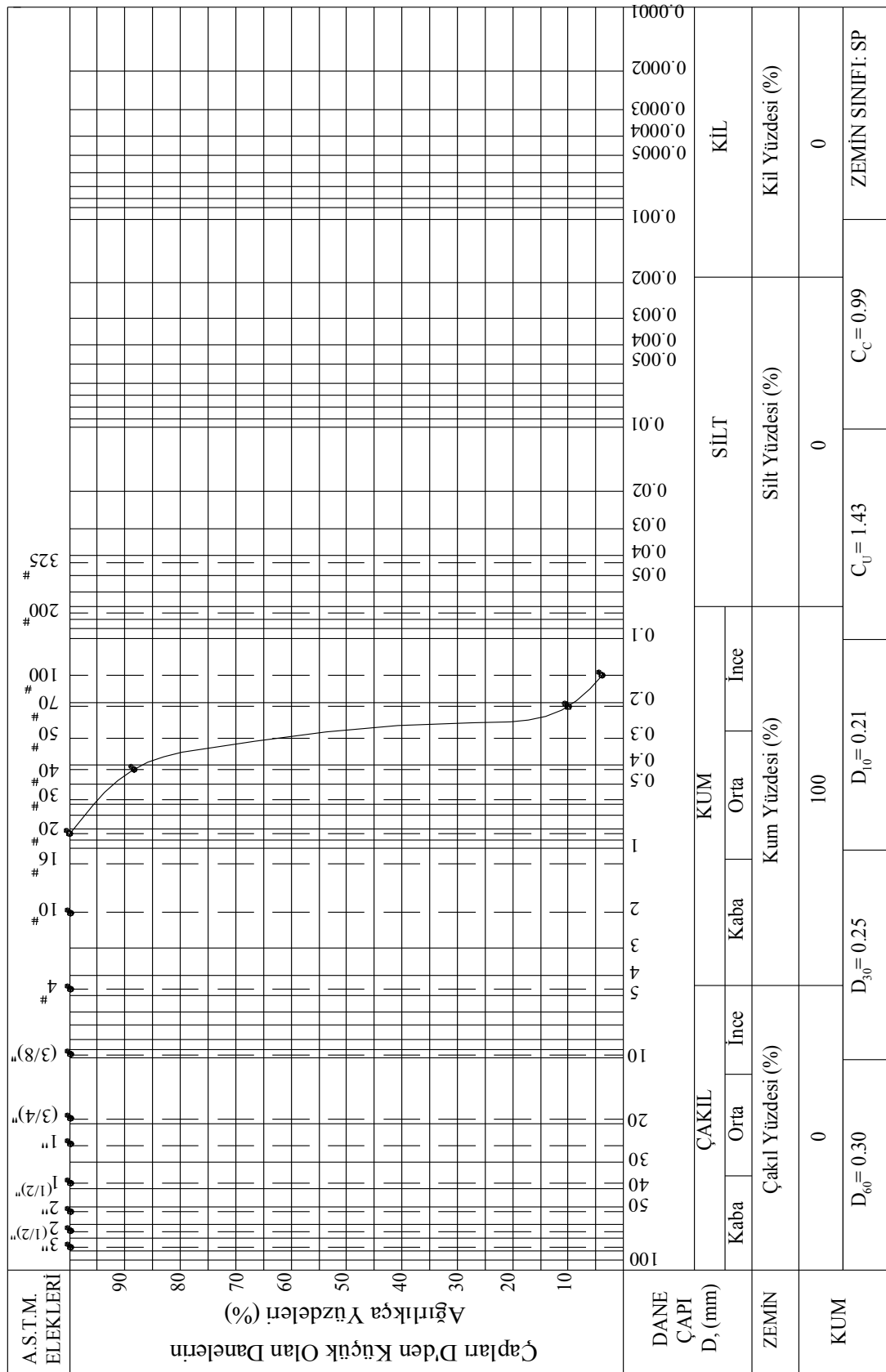
Tablo A.23 Dane birim hacim ağırlığı deneyi

Piknometre No.	2	3
Kuru zemin ağırlığı, W_1 (gr)	50	50
Su + Piknometre ağırlığı, W_2 (gr)	419.94	392.28
W_1+W_2	469.94	442.28
Su + Piknometre – Zemin ağırlığı, W_3 (gr)	451.00	423.36
$W_1+W_2-W_3$	18.94	18.92
$G_s = (W_1) / (W_1+W_2-W_3)$	2.64	2.64
G_s	2.64	

A.6.3 Relatif sıkılık deneyi

Tablo A.24 Relatif sıkılık deneyi

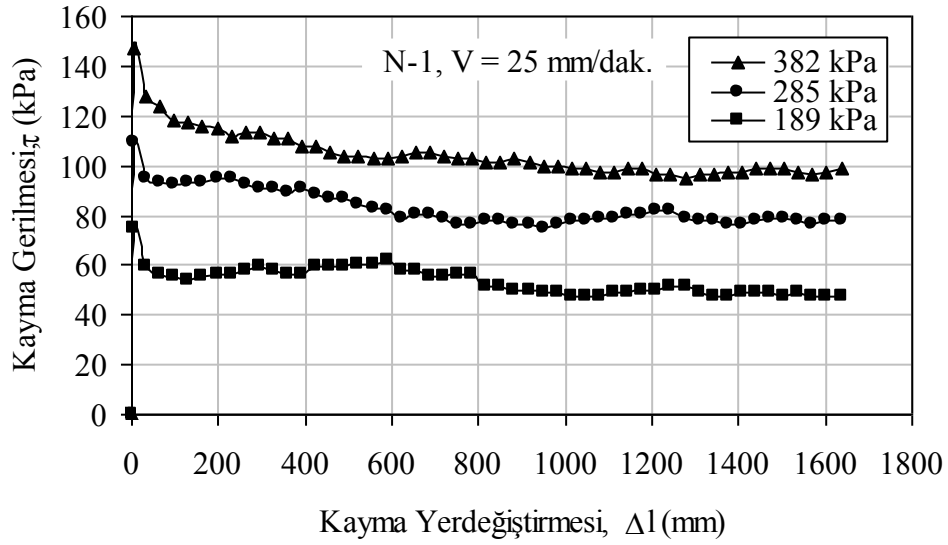
Relatif Sıkılık, D_r (%)	Gevşek ($D_r = \%0$)	Sıkı ($D_r = \%100$)
Kalıp ağırlığı (gr)	1272	1272
Kalıp hacmi (cm^3)	196.3	196.3
Kalıp+zemin ağırlığı (gr)	1560	1600
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_k (gr/cm^3)	1.47	1.67
G_s	2.64	2.64
Boşluk oranı, e	0.8	0.6



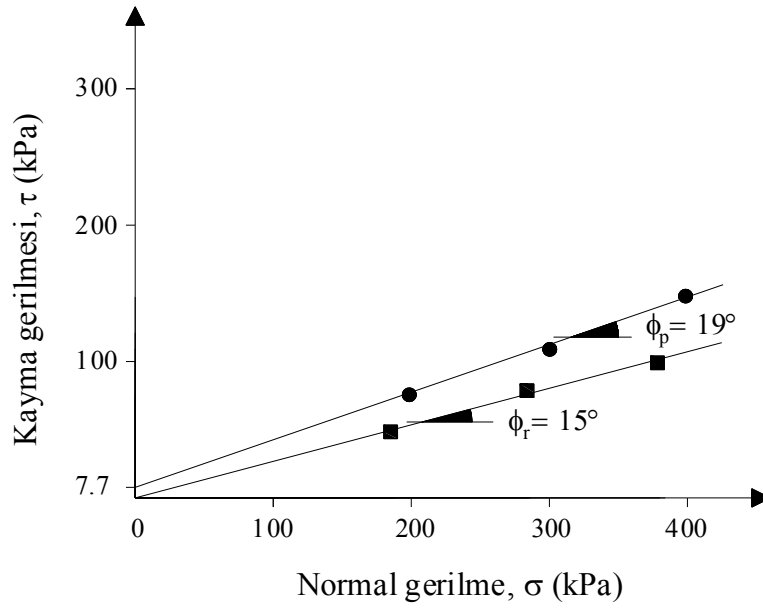
EK – B

B.1 Halka Kesme Deneyleri

B.1.1 N-1 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=25 mm/dak)

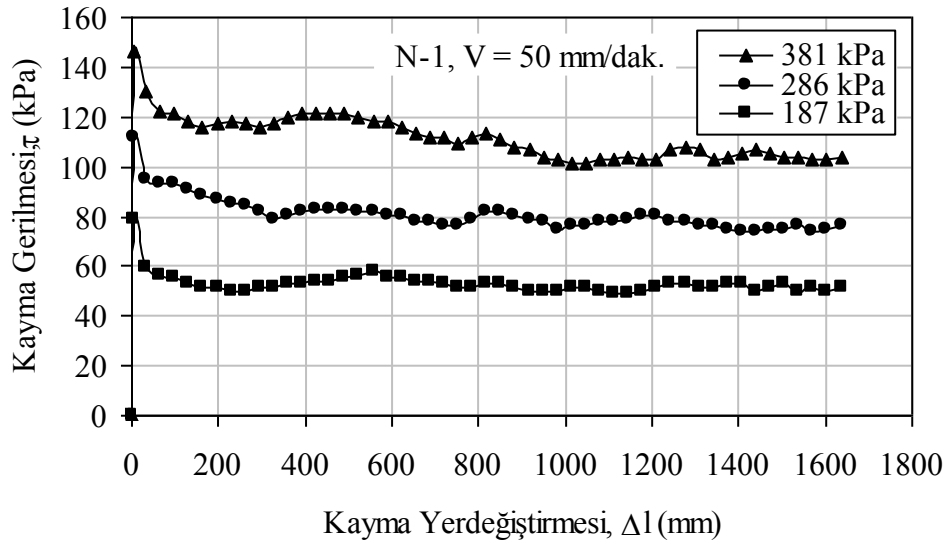


şekil B.1 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

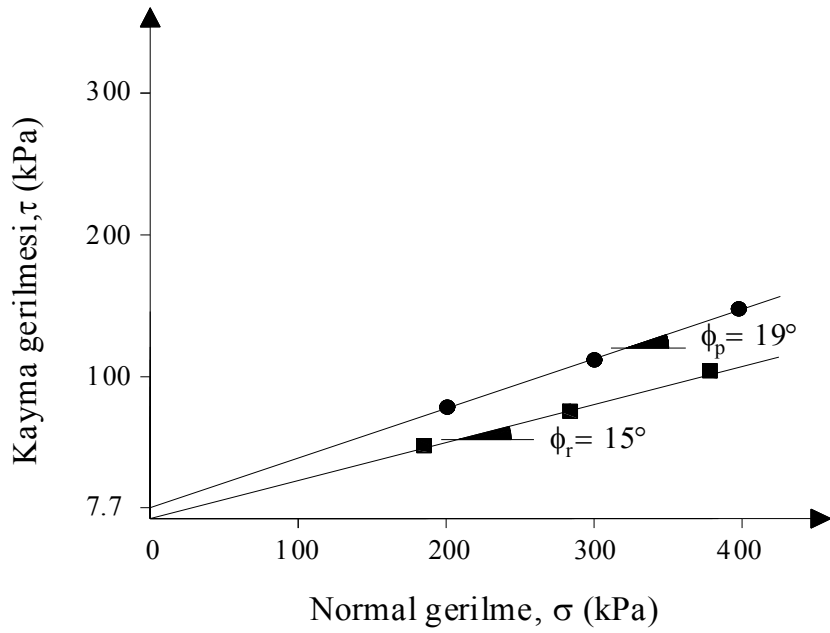


şekil B.2 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.2 N-1 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=50 mm/dak)

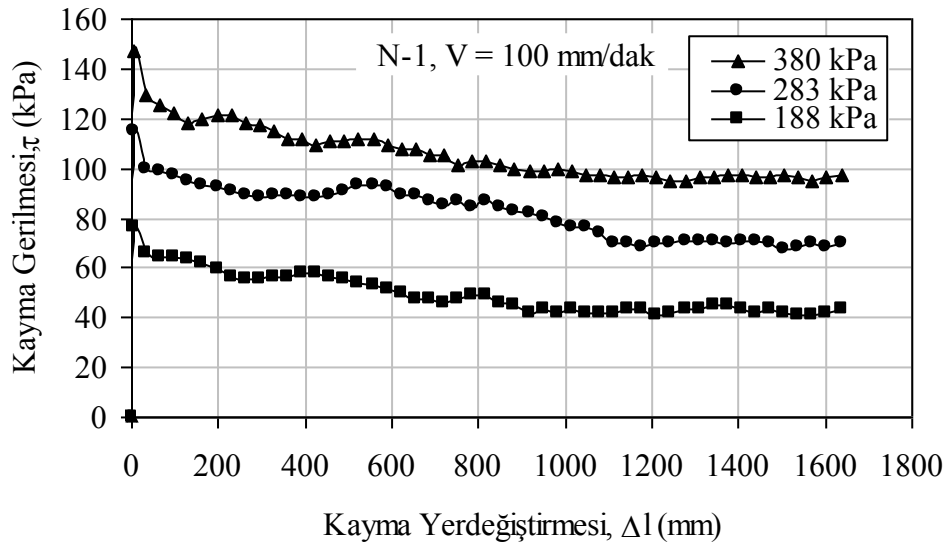


Şekil B.3 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

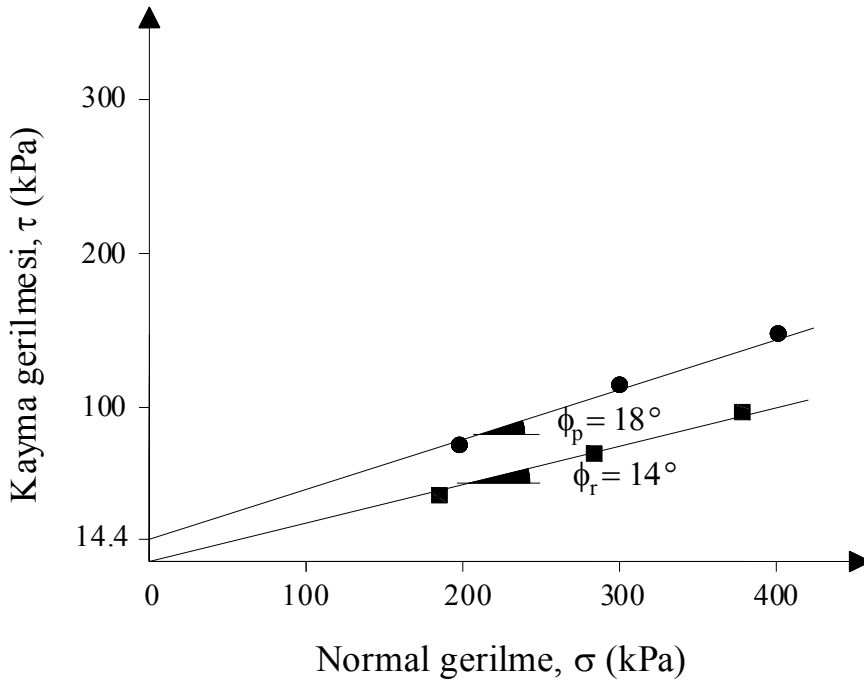


Şekil B.4 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.3 N-1 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=100 mm/dak)

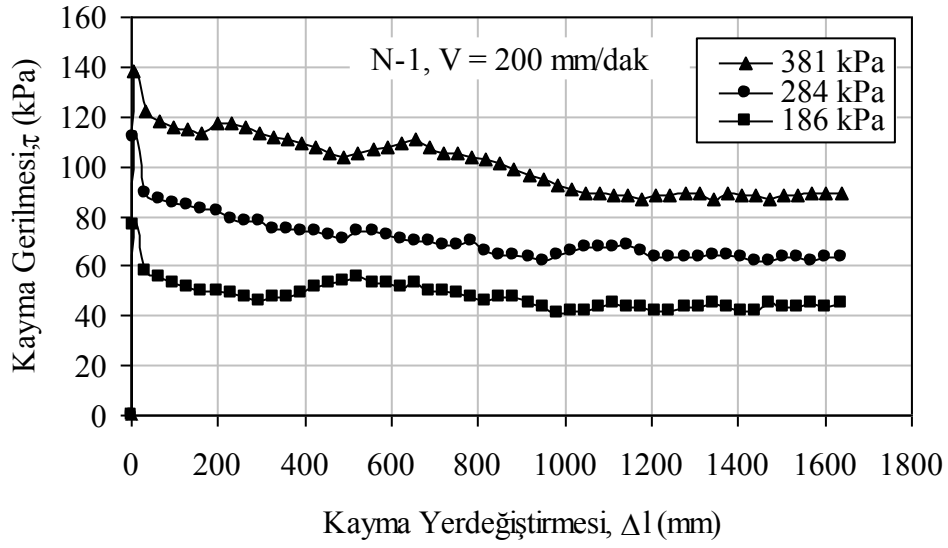


şekil B.5 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

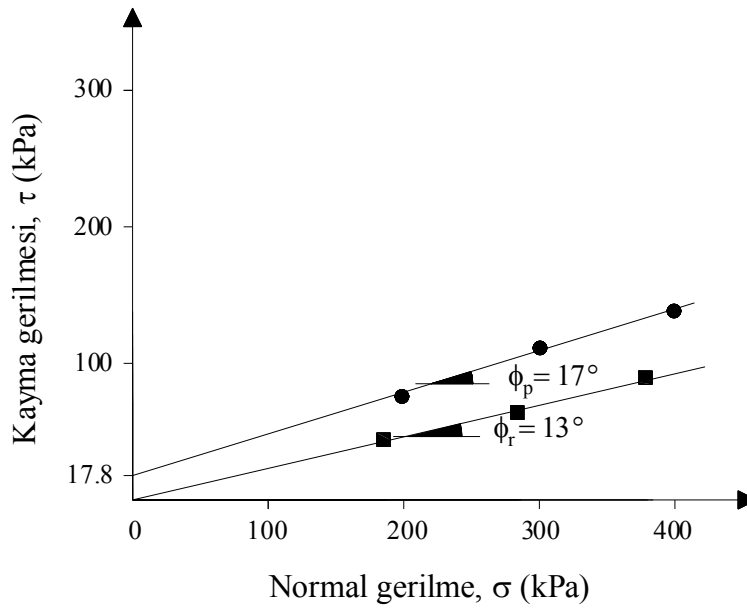


şekil B.6 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.4 N-1 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=200 mm/dak)

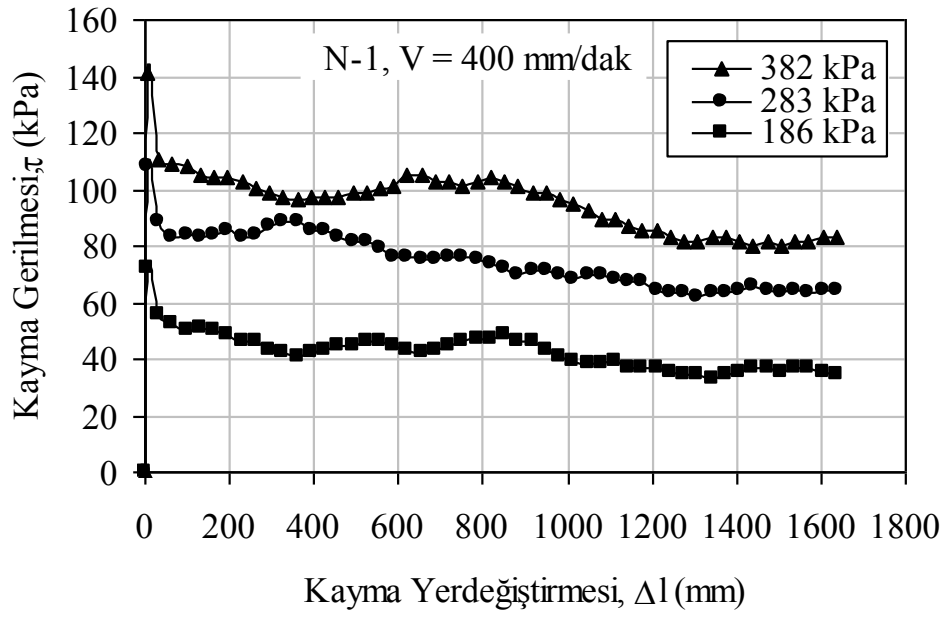


şekil B.7 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

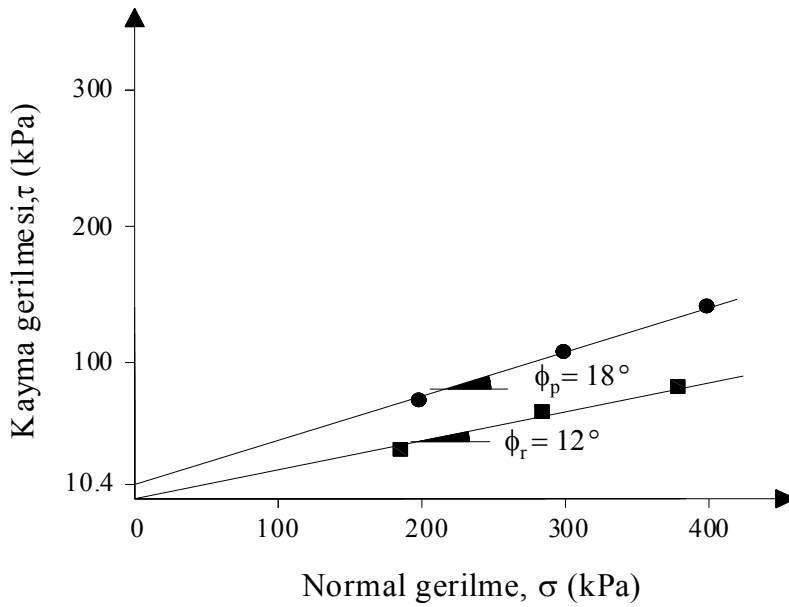


şekil B.8 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.5 N-1 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=400 mm/dak)

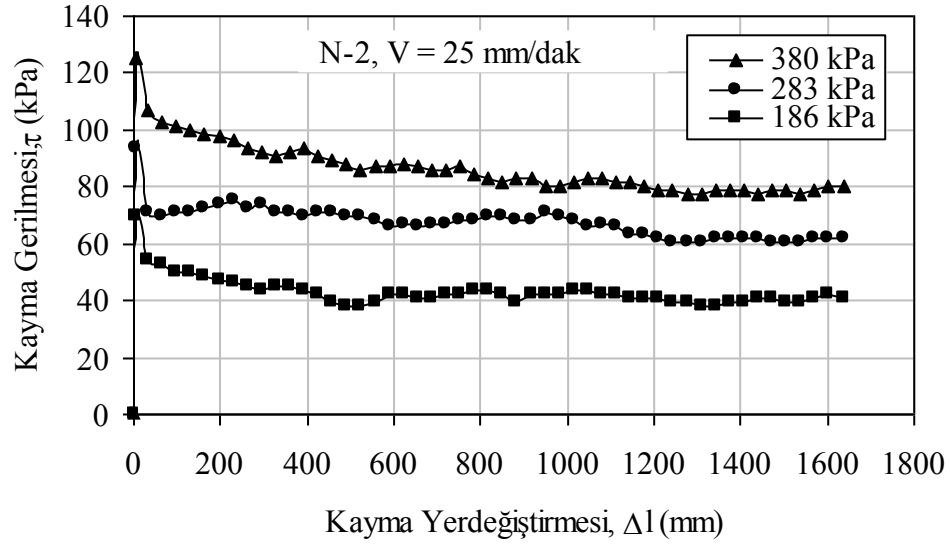


şekil B.9 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

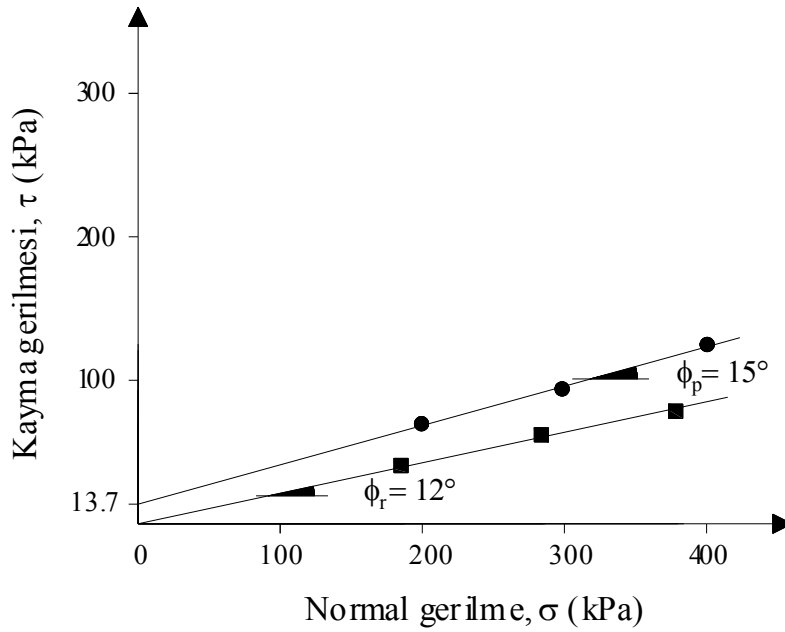


şekil B.10 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.6 N-2 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=25 mm/dak)

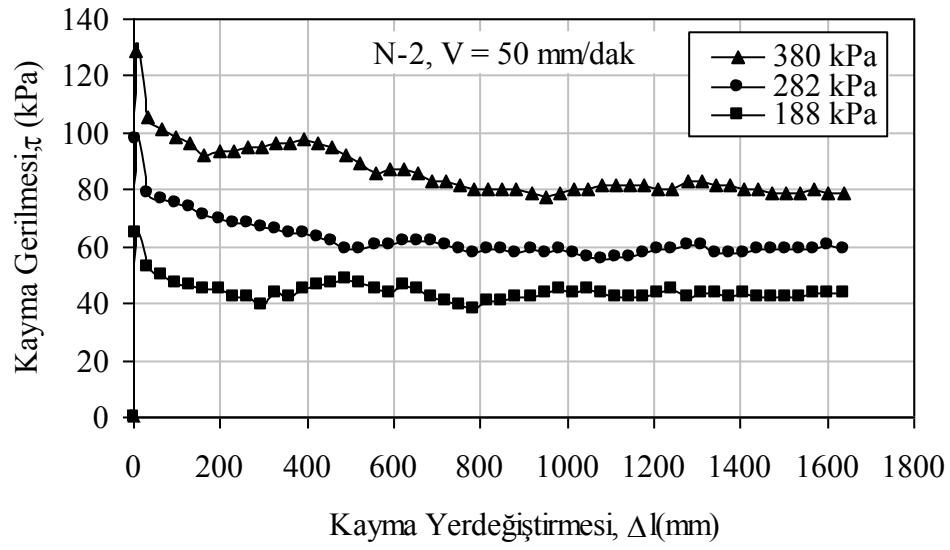


şekil B.11 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

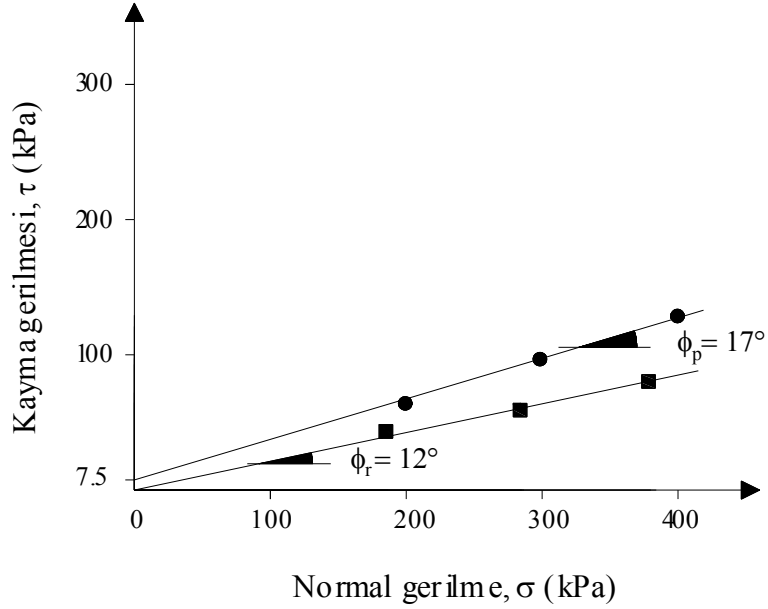


şekil B.12 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.7 N-2 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=50 mm/dak)

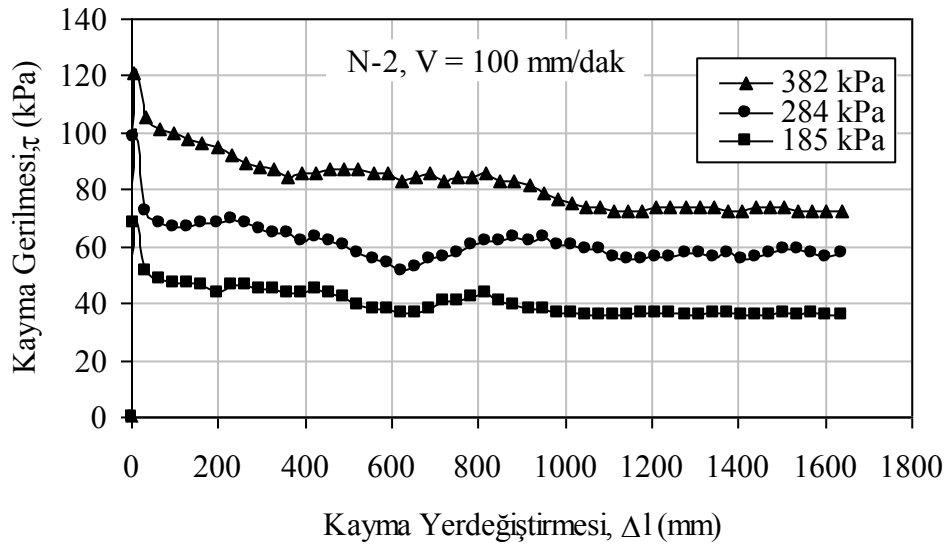


şekil B.13 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

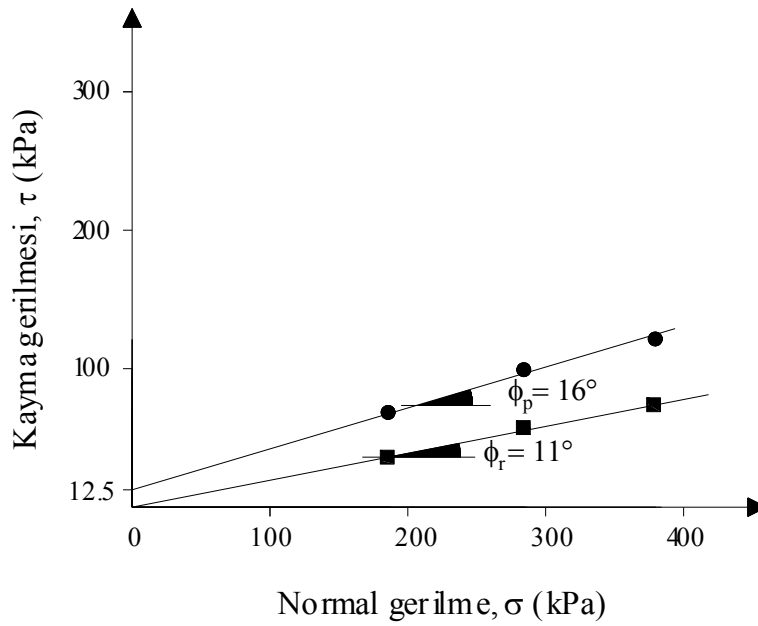


şekil B.14 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.8 N-2 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=100 mm/dak)

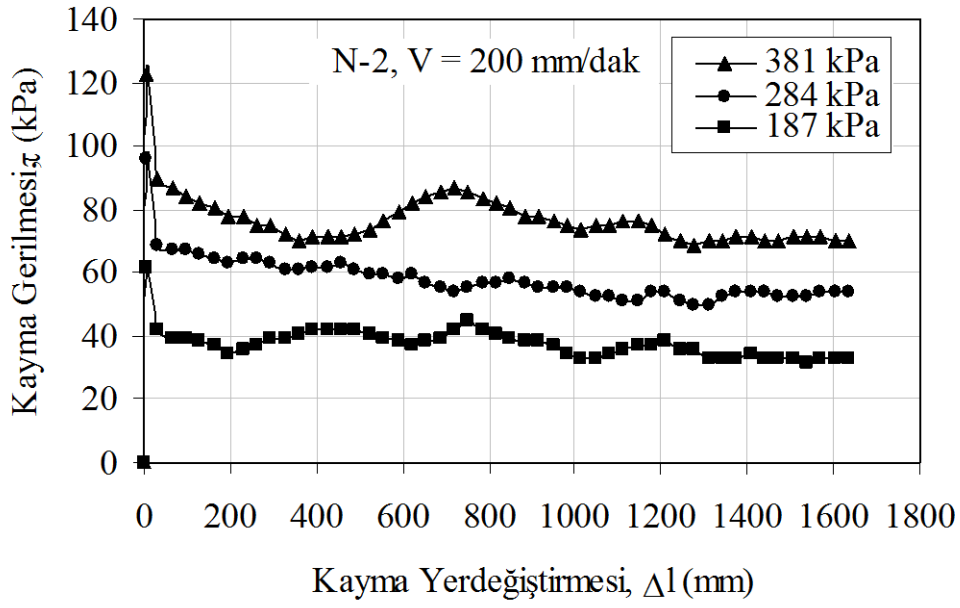


Şekil B.15 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

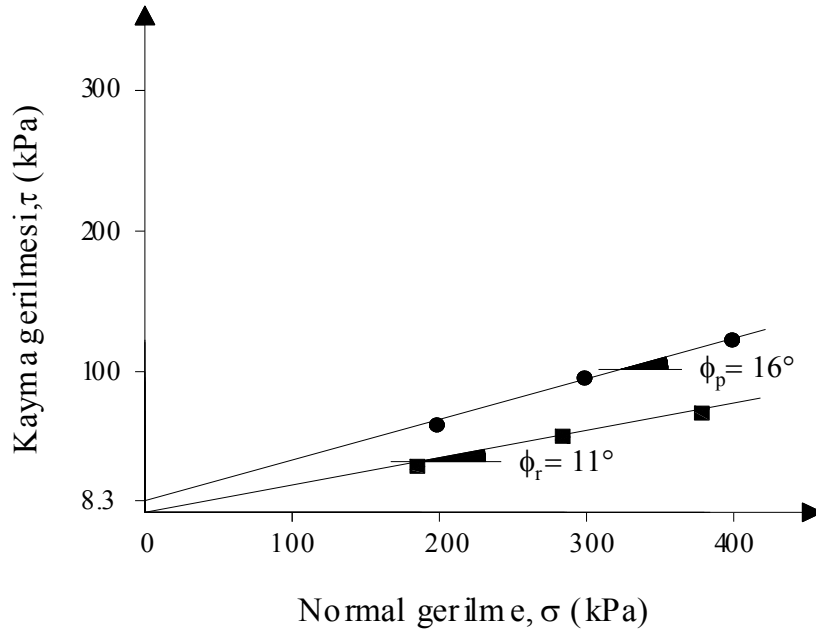


Şekil B.16 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.9 N-2 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=200 mm/dak)

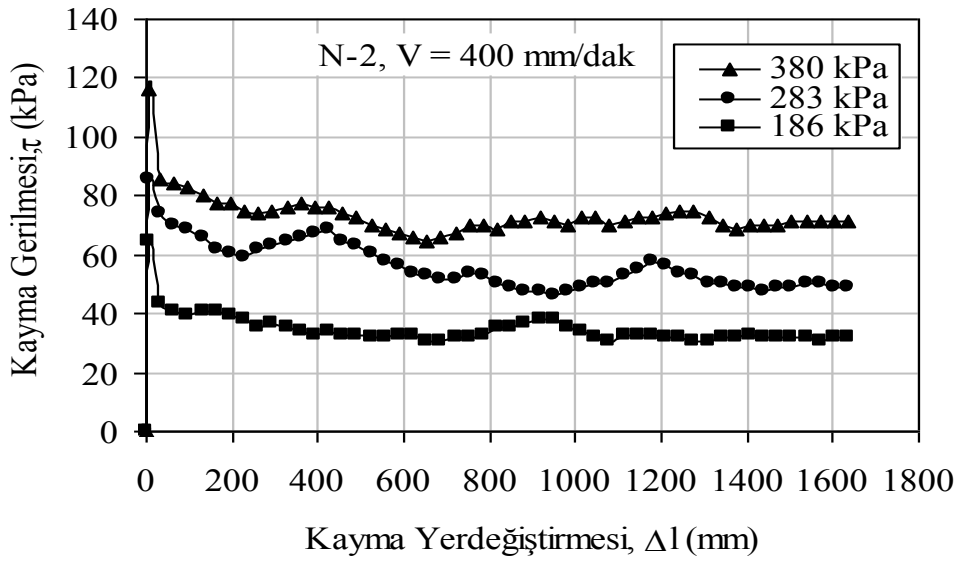


şekil B.17 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

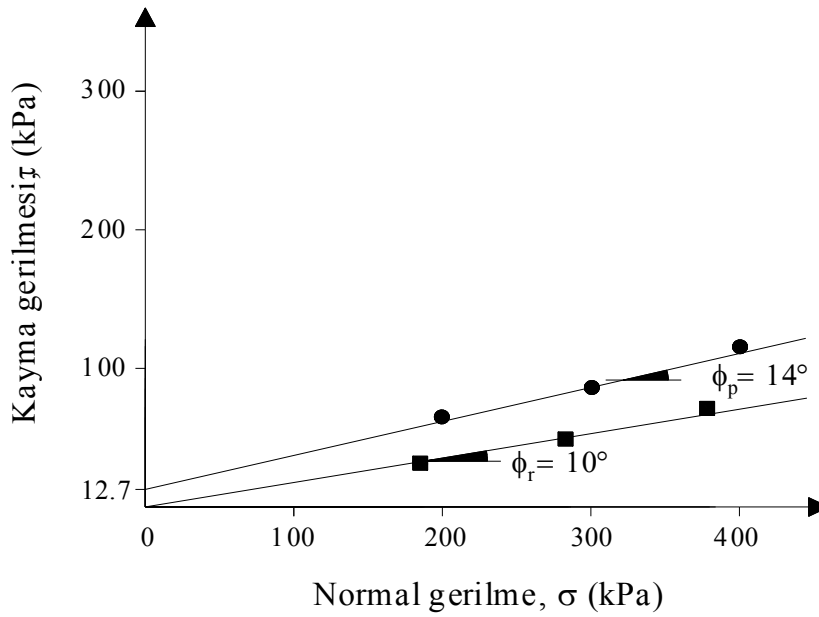


şekil B.18 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.10 N-2 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=400 mm/dak)

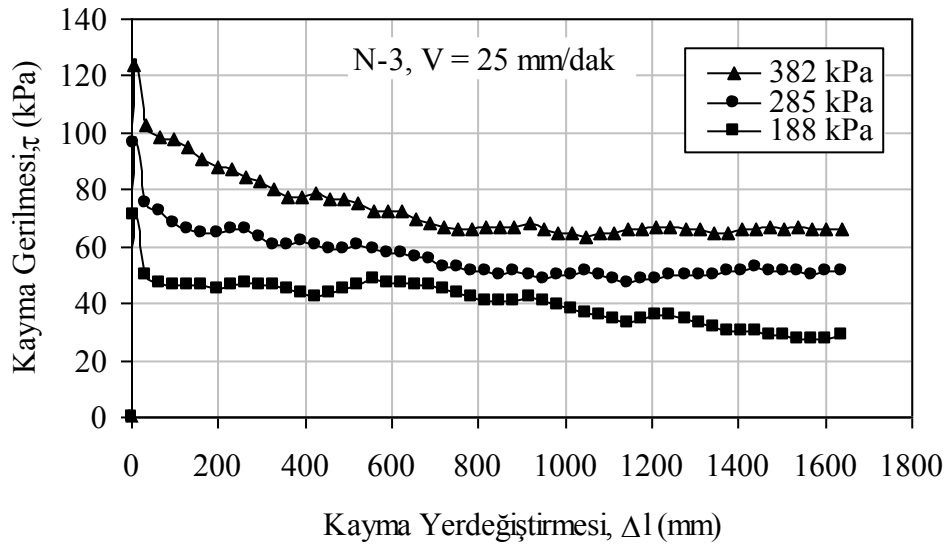


Şekil B.19 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

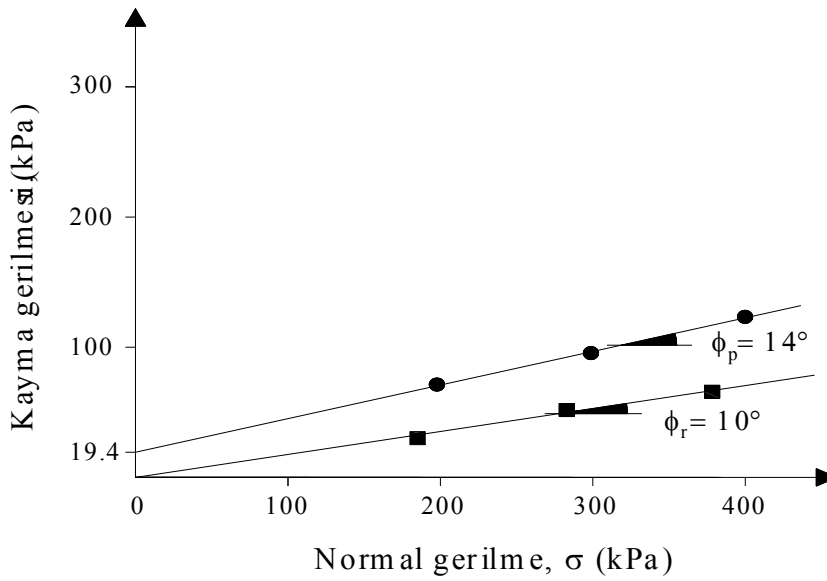


Şekil B.20 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.11 N-3 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=25 mm/dak)

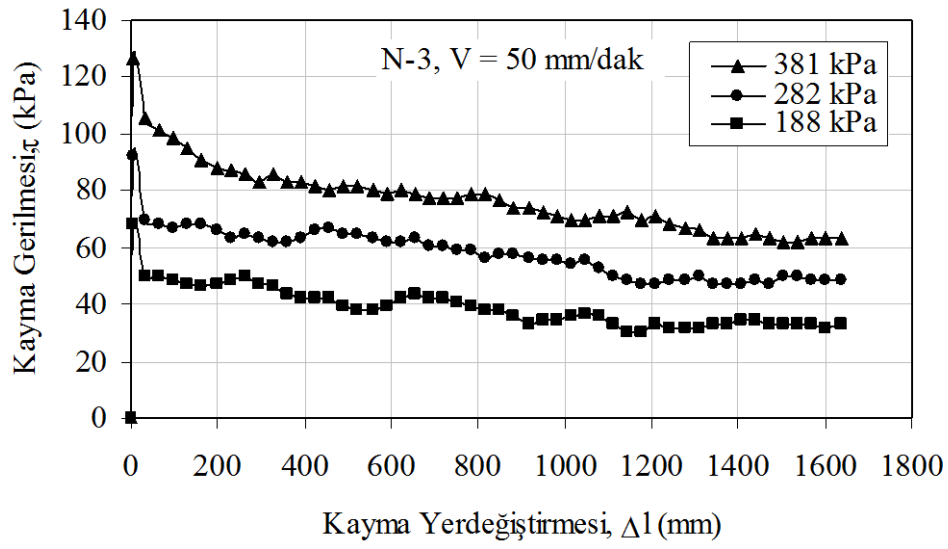


şekil B.21 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

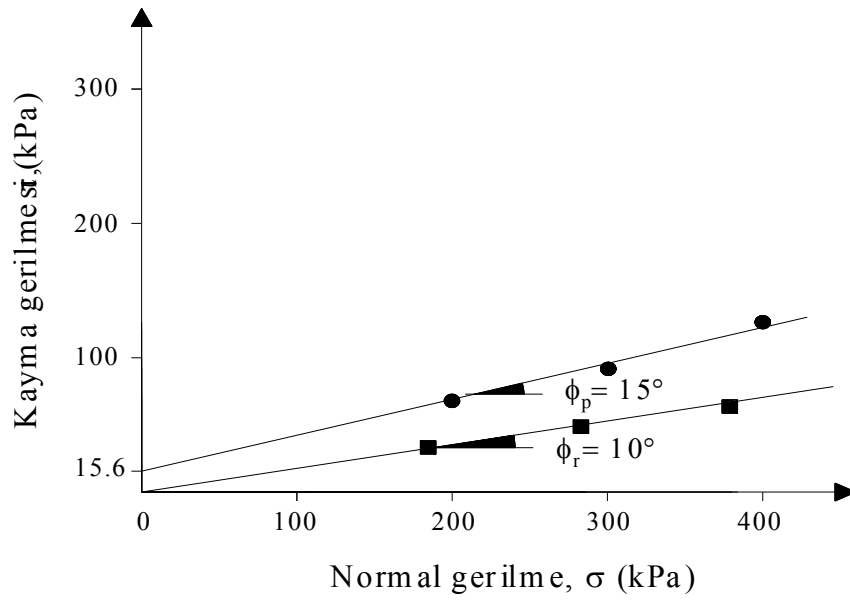


şekil B.22 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.12 N-3 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=50 mm/dak)

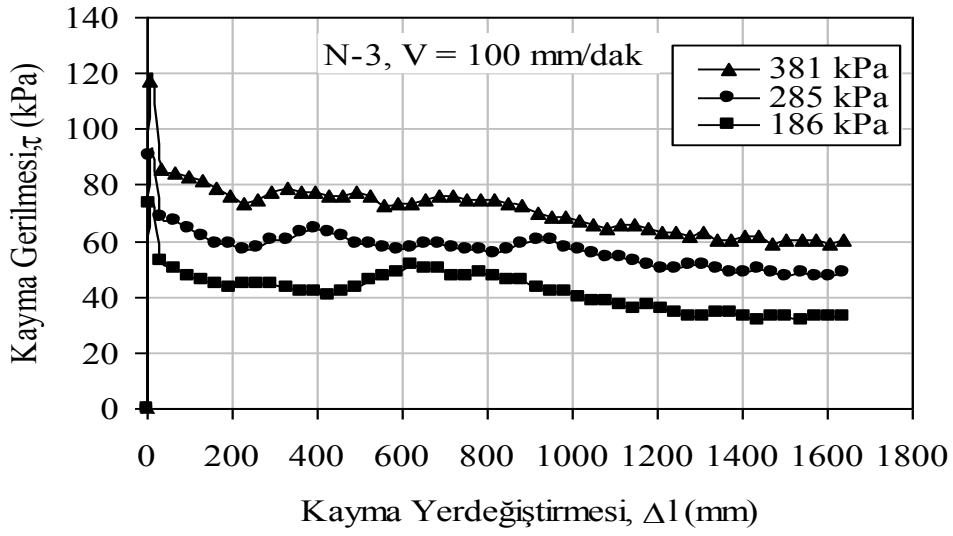


Şekil B.23 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

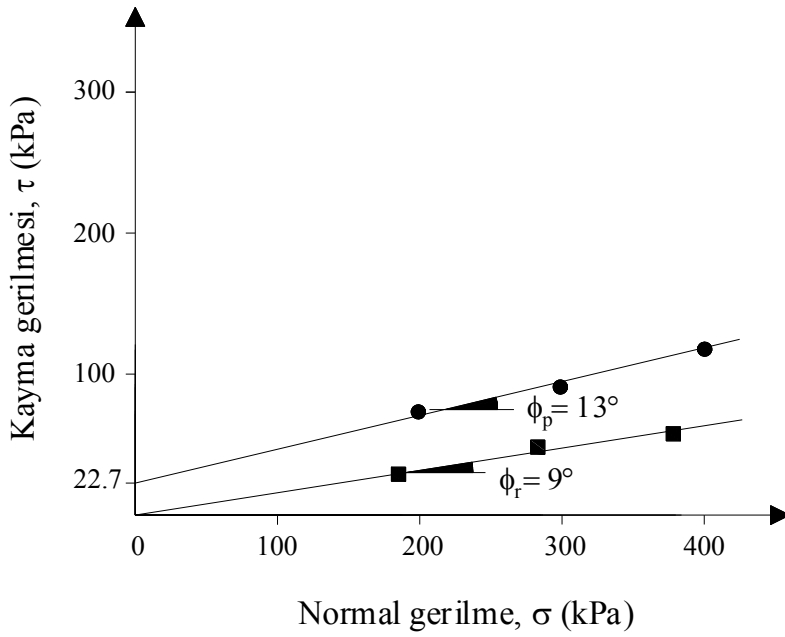


Şekil B.24 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.13 N-3 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=100 mm/dak)

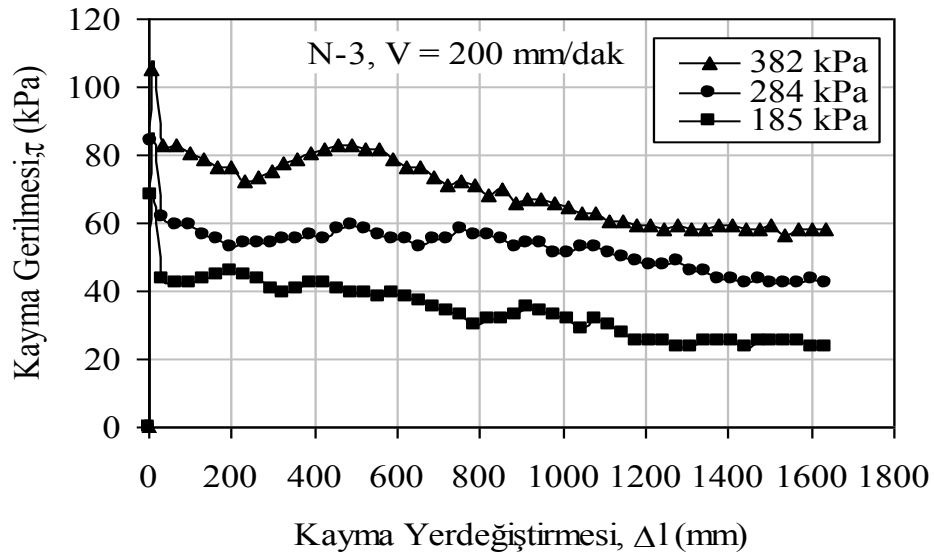


Şekil B.25 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirme ilişkisi

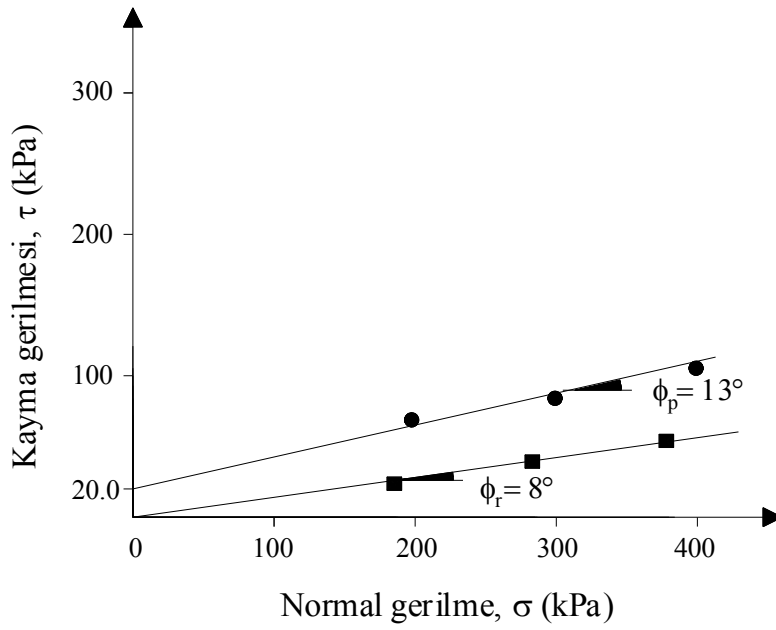


Şekil B.26 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.14 N-3 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=200 mm/dak)

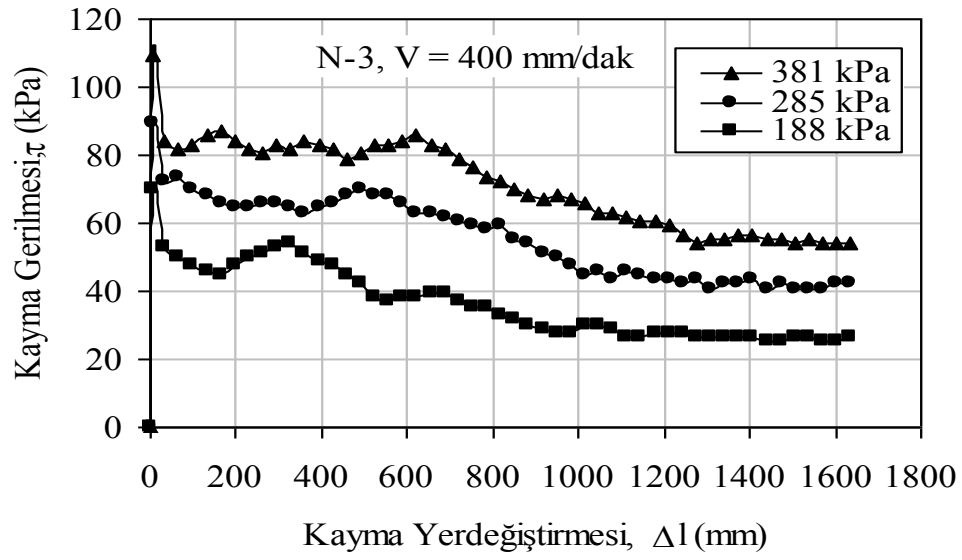


Şekil B.27 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

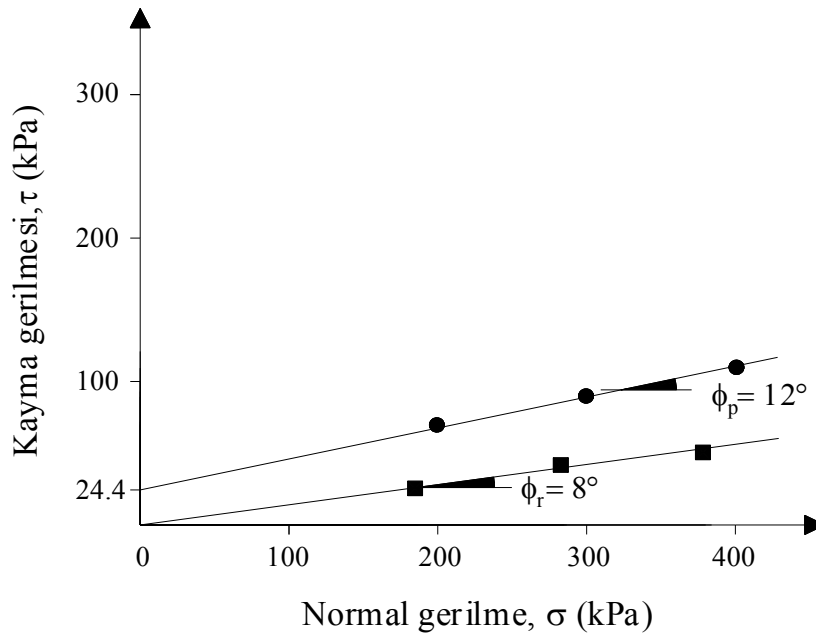


Şekil B.28 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.15 N-3 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=400 mm/dak)

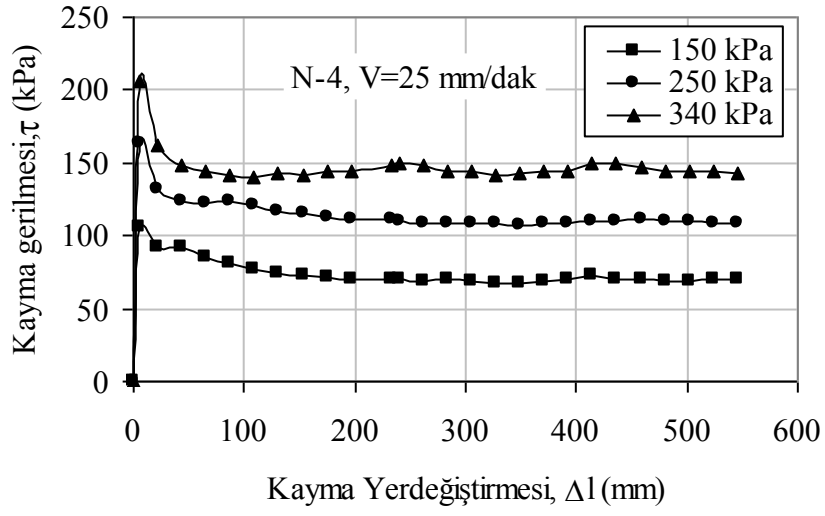


şekil B.29 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

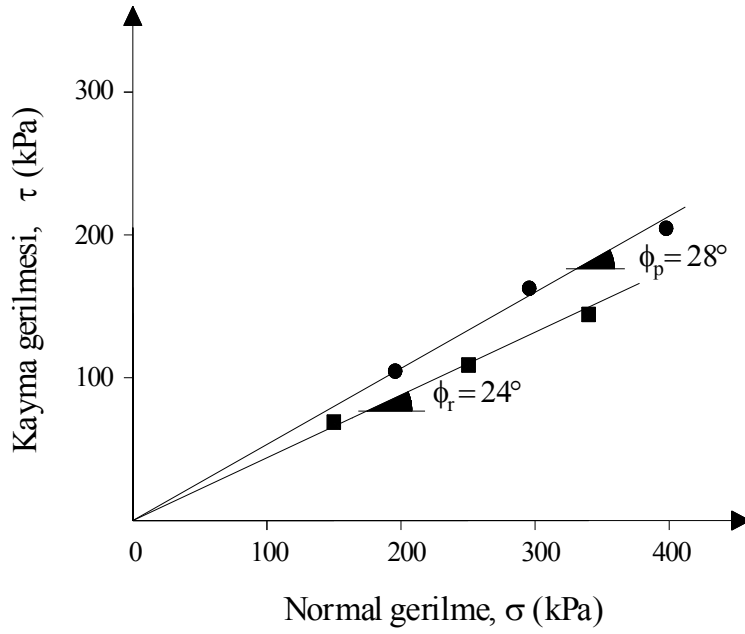


şekil B.30 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.16 N-4 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=25 mm/dak)

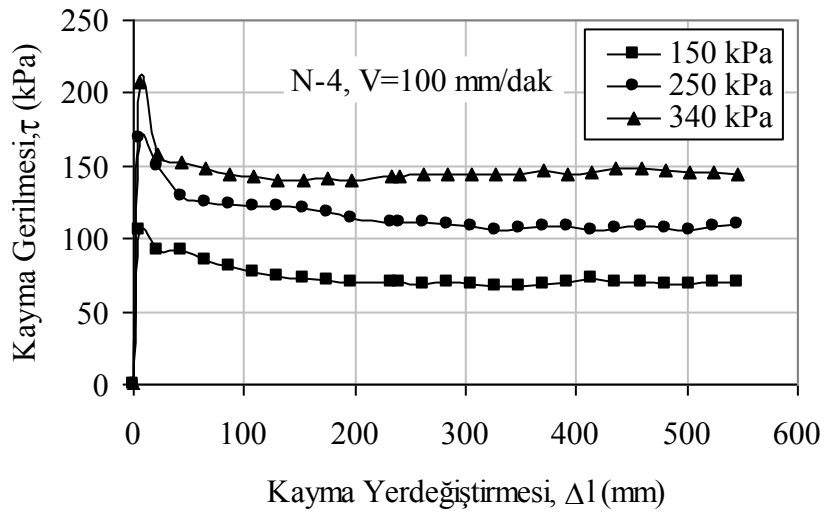


Şekil B.31 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

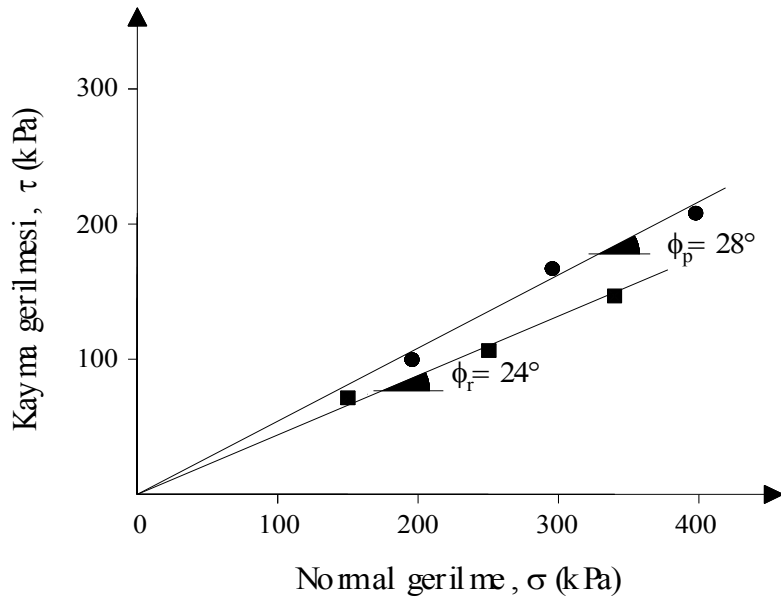


Şekil B.32 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.17 N-4 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=100 mm/dak)

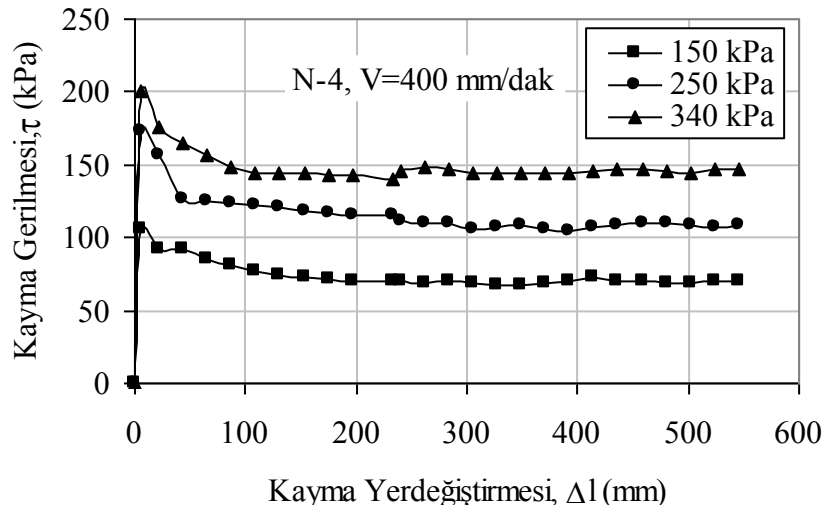


şekil B.33 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi

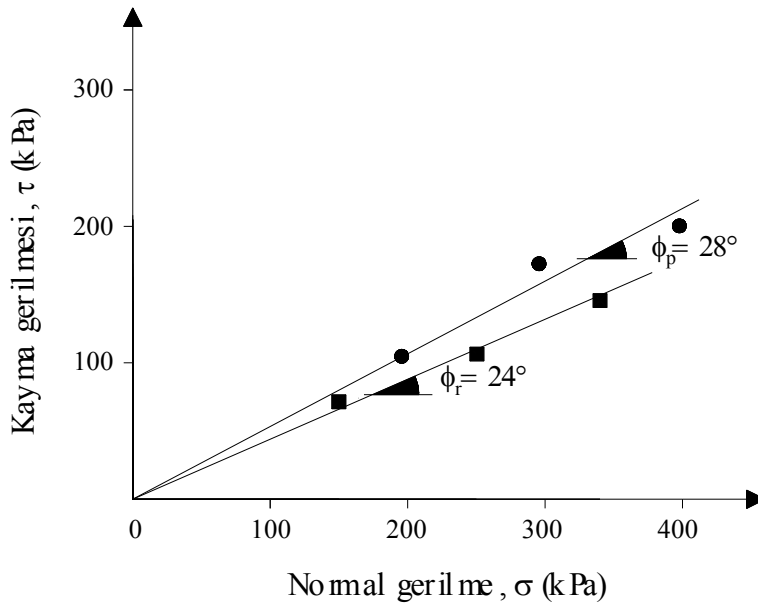


şekil B.34 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.1.18 N-4 numaralı numuneye ait halka kesme deneyi (V=400 mm/dak)



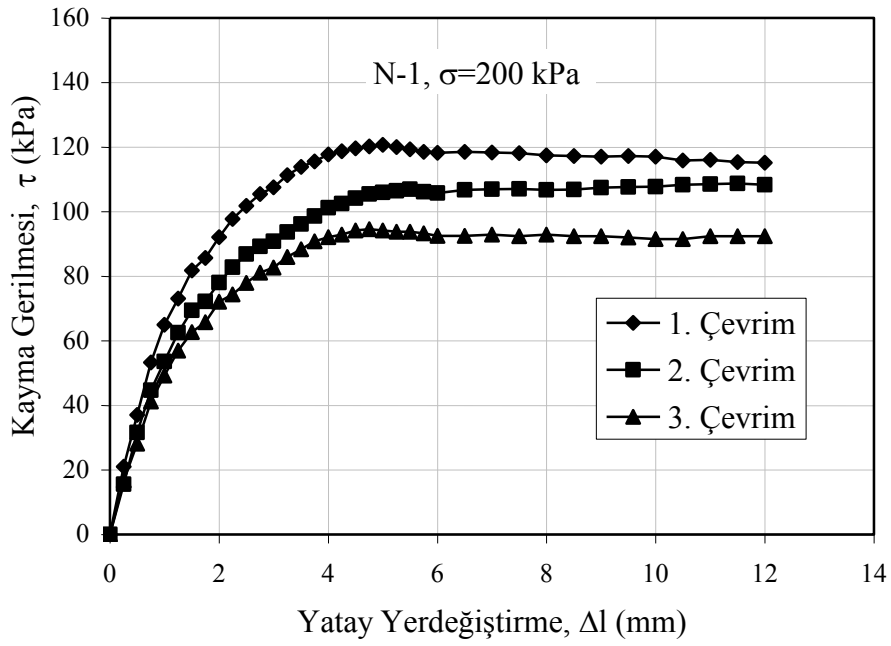
şekil B.35 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi



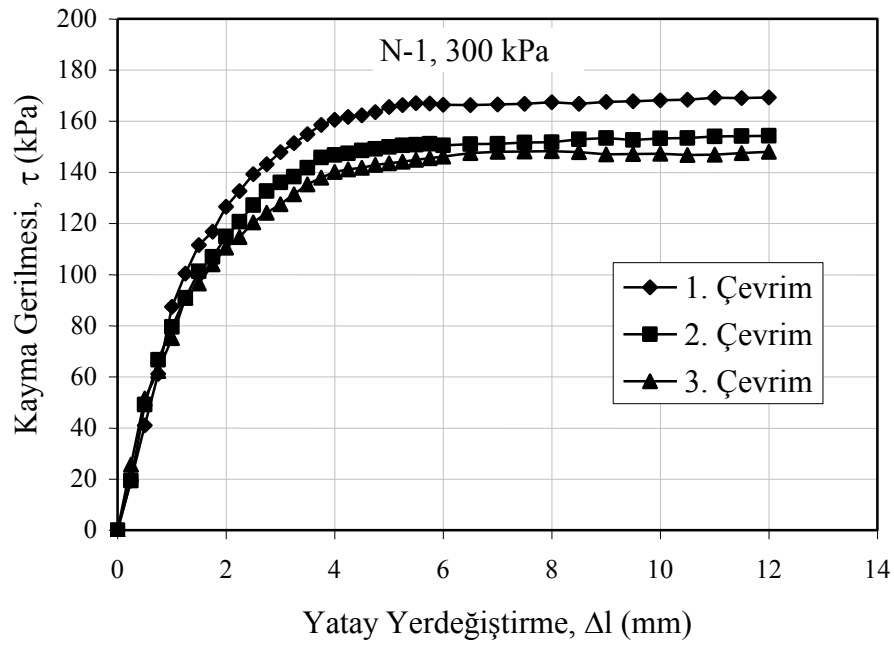
şekil B.36 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri

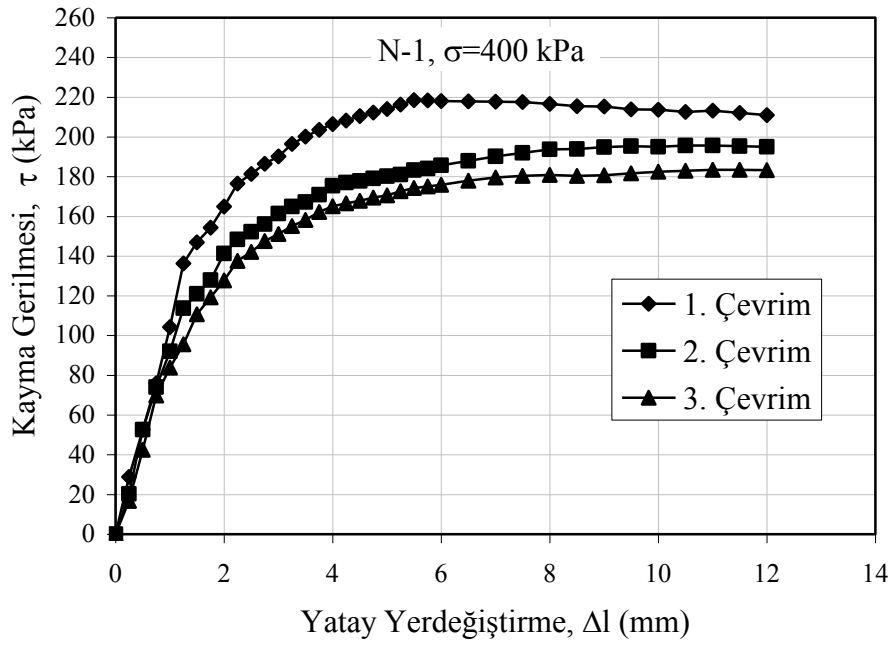
B.2.1 N-1 numaralı numuneye ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



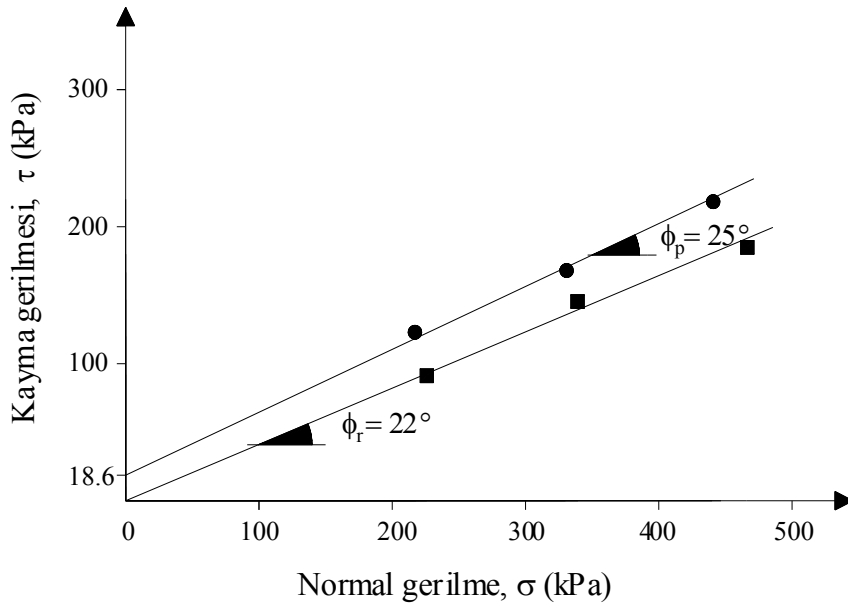
Şekil B.37 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 200$ kPa)



Şekil B.38 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 300$ kPa)

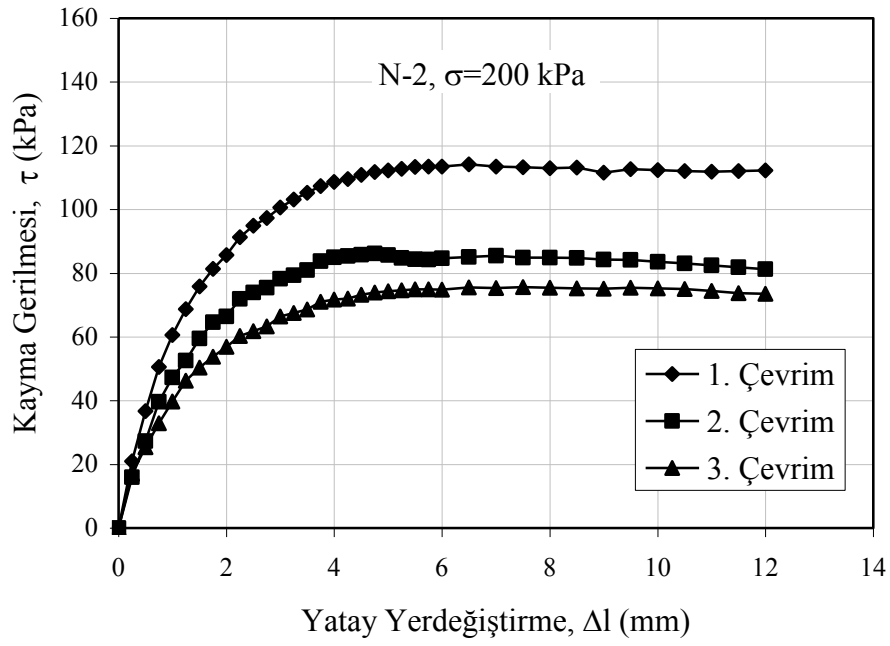


Şekil B.39 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 400$ kPa)

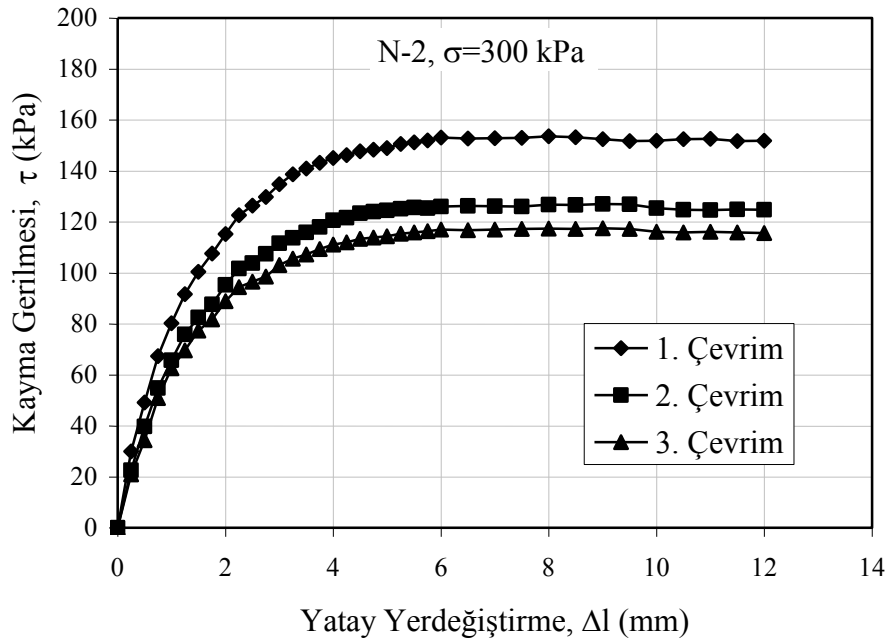


Şekil B.40 Kalıcı ve pik göçme zarfları

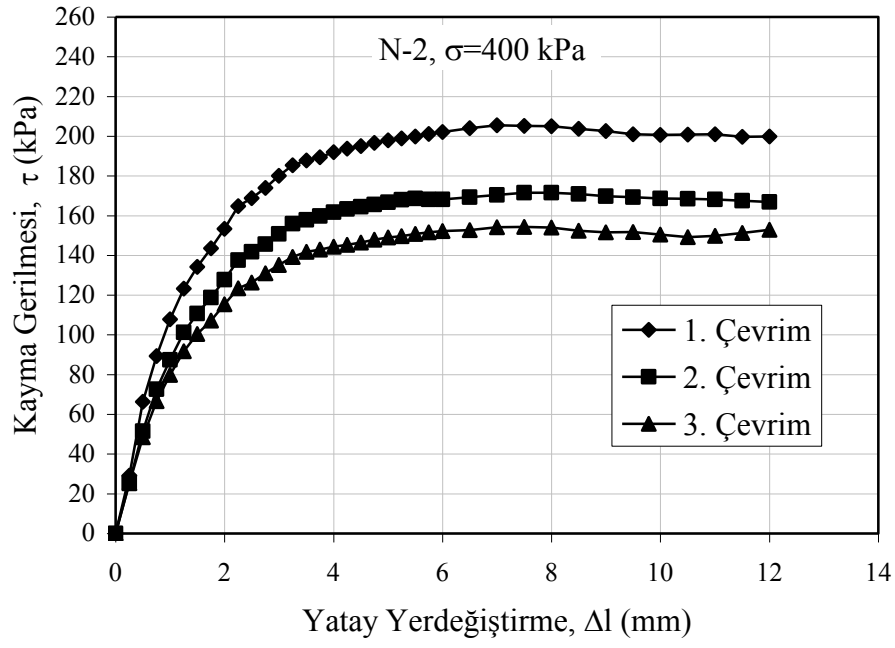
B.2.2 N-2 numaralı numuneye ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



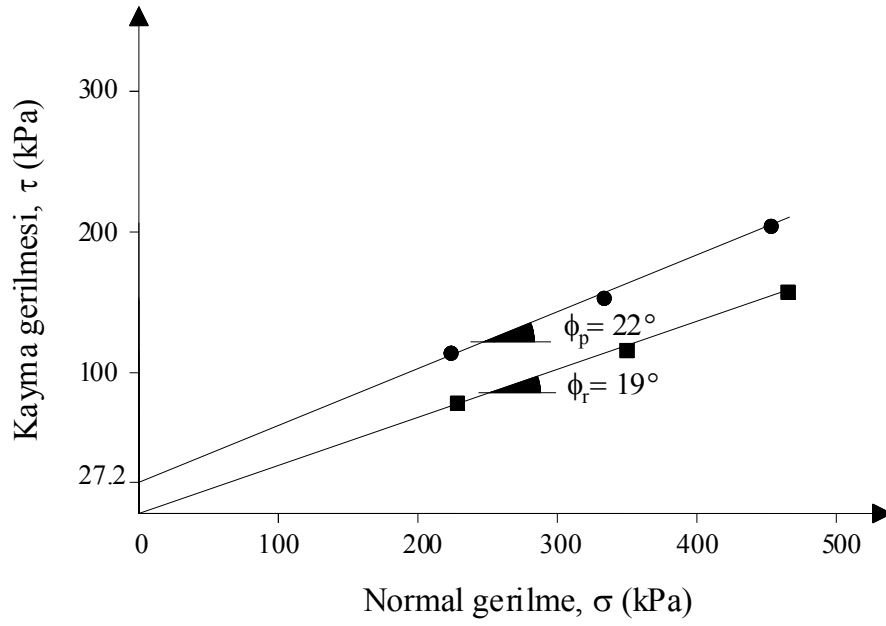
Şekil B.41 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 200$ kPa)



Şekil B.42 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 300$ kPa)

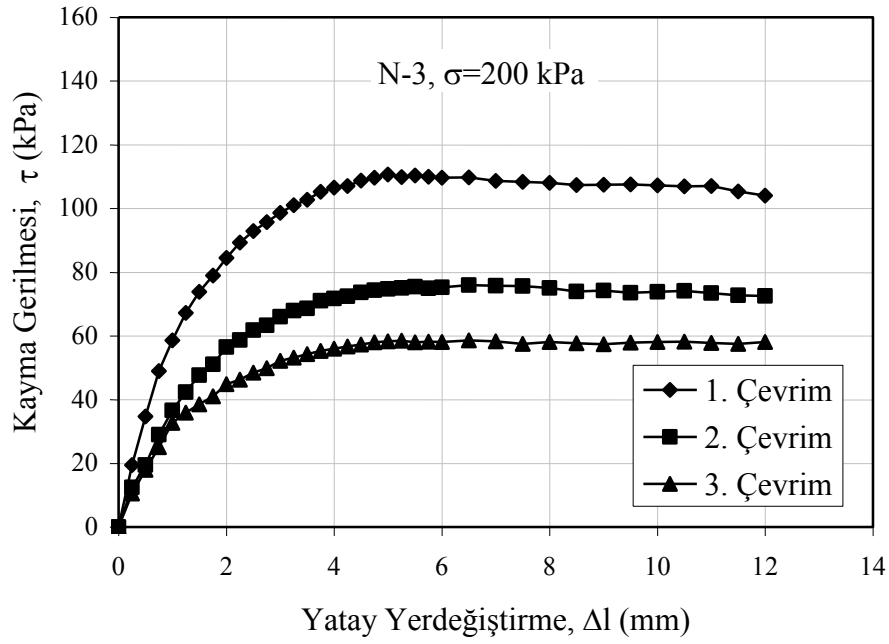


Şekil B.43 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 400$ kPa)

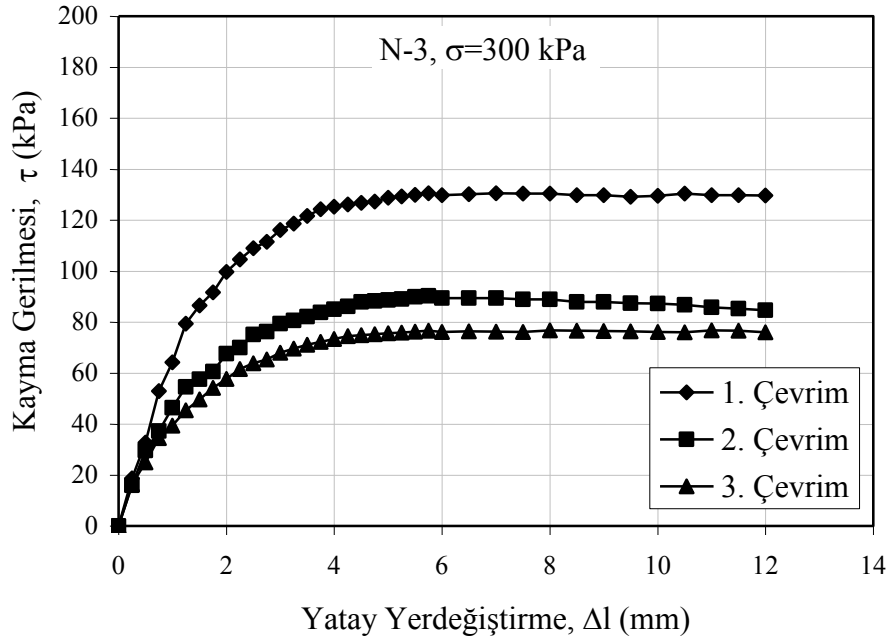


Şekil B.44 Kalıcı ve pik göçme zarfları

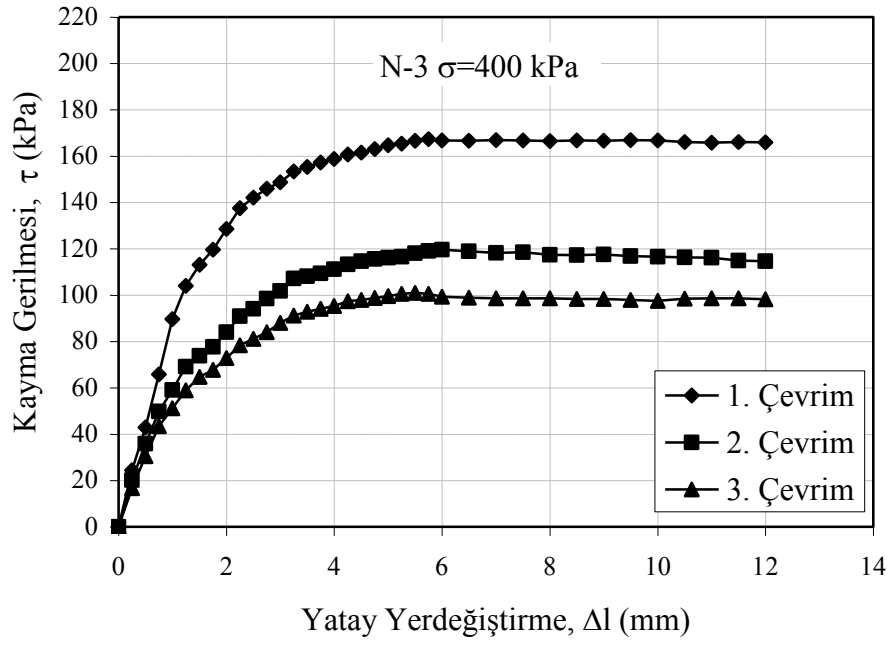
B.2.3 N-3 numaralı numuneye ait tekrarlı kesme kutusu deneyi



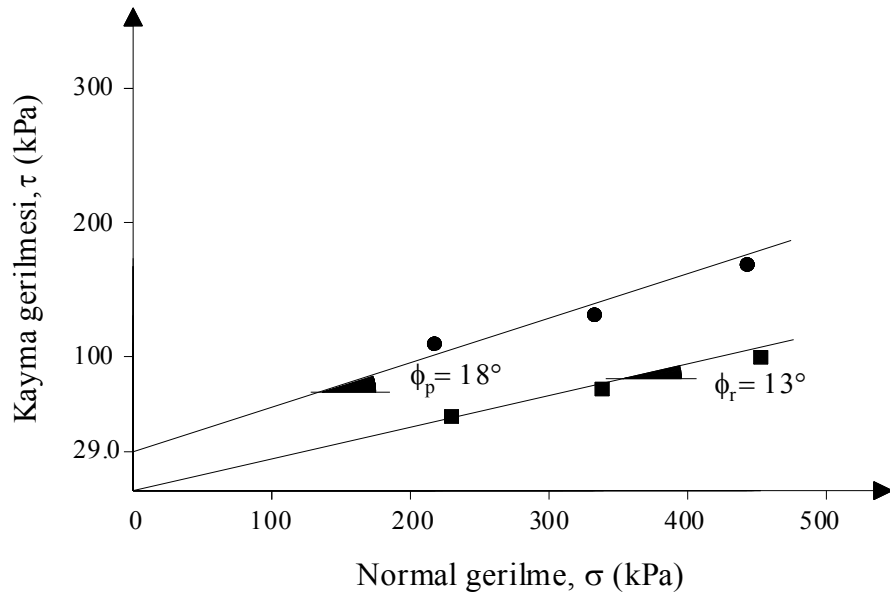
Şekil B.45 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 200$ kPa)



Şekil B.46 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 300$ kPa)

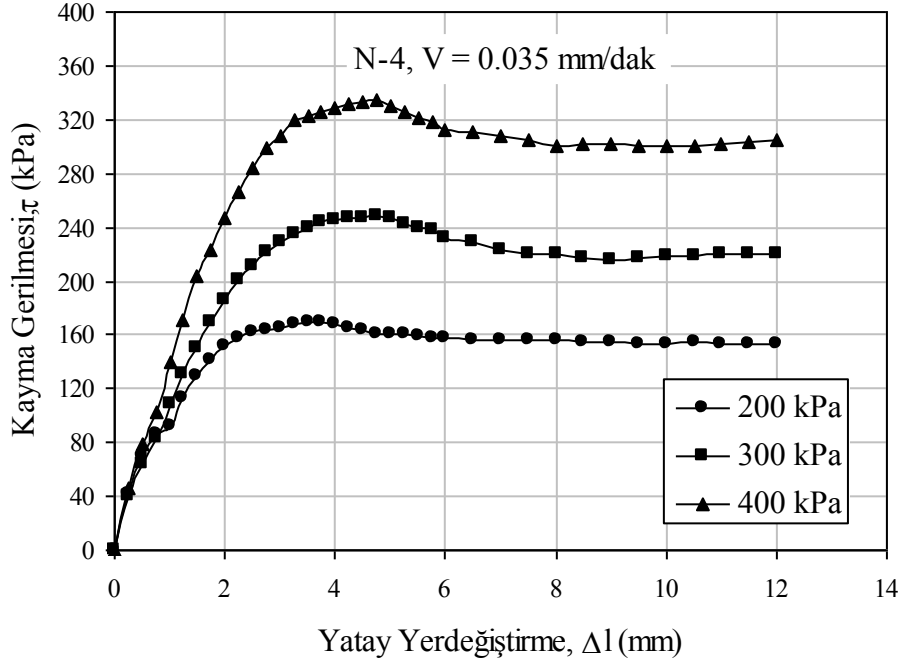


Şekil B.47 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi ($\sigma = 400$ kPa)

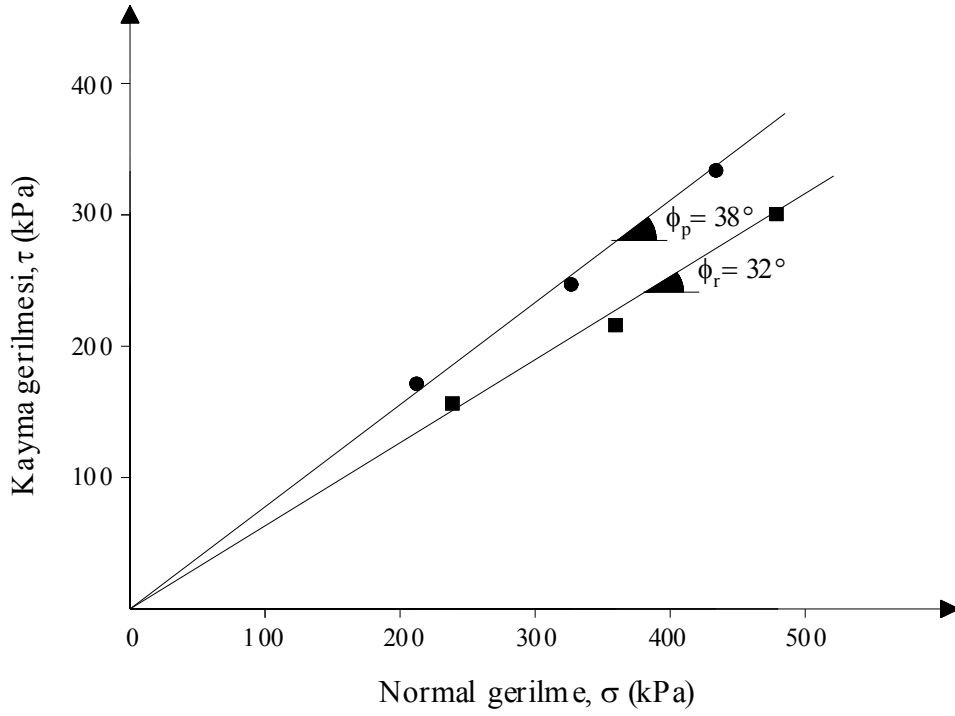


Şekil B.48 Kalıcı ve pik göçme zarfları

B.2.4 N-4 numaralı numuneye ait kesme kutusu deneyi



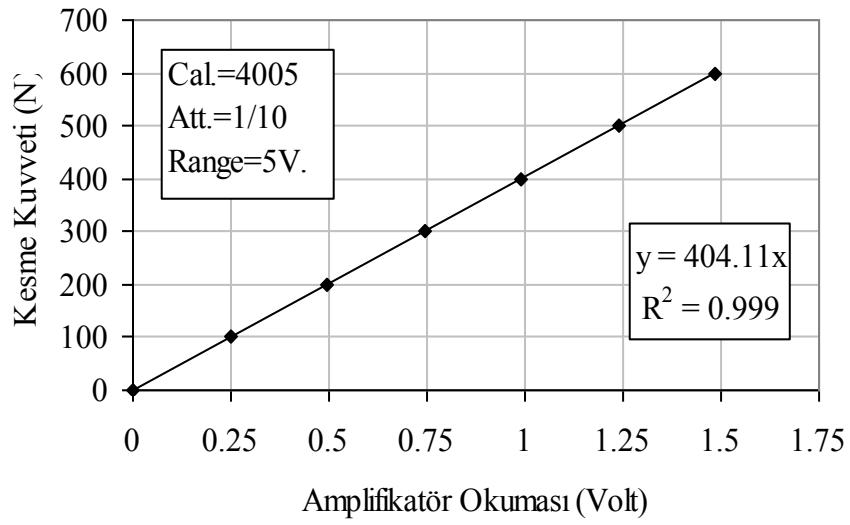
Şekil B.49 Kayma gerilmesi-kayma yerdeğiştirmesi ilişkisi



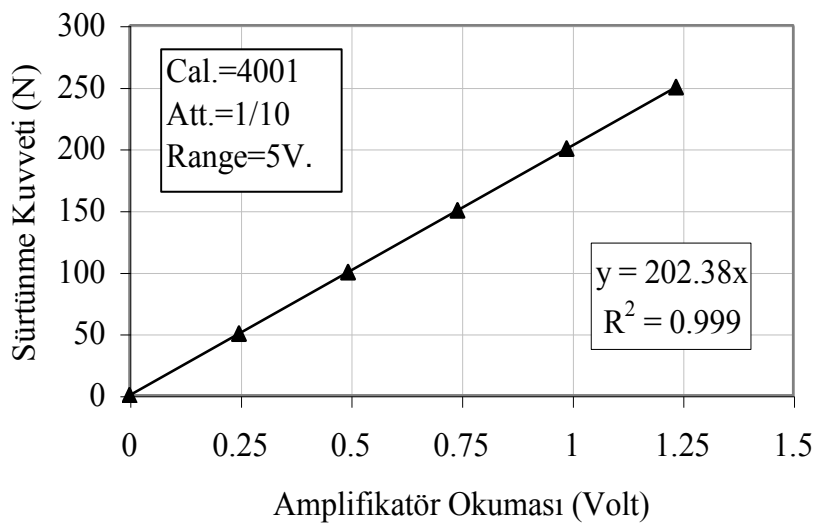
Şekil B.50 Kalıcı ve pik göçme zarfları

EK-C

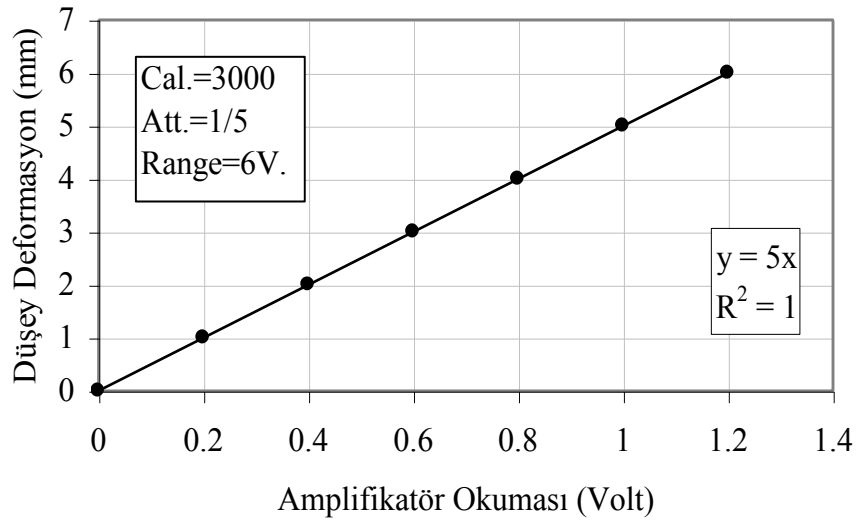
C.1 Amplifikatör Kalibrasyonu



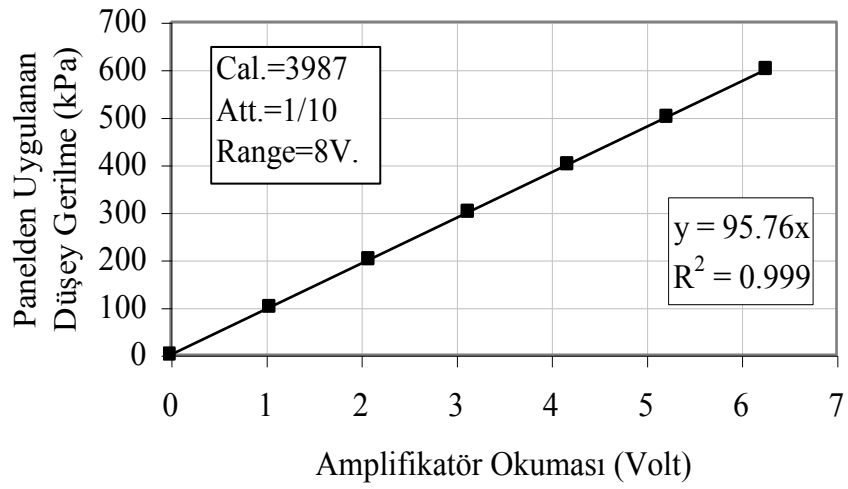
Şekil C.1 Kesme kuvveti (CH 1) kalibrasyonu



Şekil C.2 Sürtünme kuvveti (CH 2) kalibrasyonu



Şekil C.3 Düşey deformasyon (CH 3) kalibrasyonu



Şekil C.4 Düşey gerilme (CH 4) kalibrasyonu

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 22.10.1979 tarihinde Darmstadt-Almanya’da doğdu. İlk-orta ve lise eğitimini, 1998 yılında Sürmene-Trabzon’da tamamladı. 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi’nden inşaat mühendisi olarak mezun olup, aynı yıl İ.T.Ü. Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programında yüksek lisansa başladı.