**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

**DOKTORA TEZİ**

**Mustafa HATİPOĞLU**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği**

**MART 2012**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

**DOKTORA TEZİ**

**Mustafa HATİPOĞLU**
**(501022155)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep İYİSAN**

**MART 2012**

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501022155 numaralı Doktora Öğrencisi **Mustafa HATİPOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

| | | |
|---|---|---|
| **Tez Danışmanı :** | **Doç. Dr. Recep İYİSAN**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyeleri :** | **Prof. Dr. Mete İNCECİK**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ..... |
| | **Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN**<br>Yıldız Teknik Üniversitesi | ..... |
| | **Prof. Dr. Ahmet SAĞLAMER**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ..... |
| | **Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU**<br>İstanbul Üniversitesi | ..... |

**Teslim Tarihi :** **17 Şubat 2011**
**Savunma Tarihi :** **26 Mart 2012**

## ÖNSÖZ

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin doğru bir şekilde belirlenmesi inşaat mühendisliğinde karşılaşılan çeşitli stabilite problemlerinin çözülmesi için büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için yaygın olarak tekrarlı kesme kutusu deneylerine başvurulmaktadır. Bu çalışmada başta halka kesme deneyi olmak üzere laboratuvar deneyleri ile kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi ve kalıcı kayma mukavemetine etki eden faktörlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla öncelikle İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan halka kesme deney düzeneği geliştirilerek kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere drenajlı koşullarda deney yapılabilir duruma getirilmiştir. Böylece laboratuvarımıza standartlara uygun özelliklere sahip halka kesme deney düzeneği kazandırılmıştır. Çalışmada çok sayıda doğal ince daneli zemin numunesi üzerinde kalıcı kayma mukavemeti deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak pratik amaçlarla kullanılmak üzere kalıcı kayma mukavemeti için çeşitli zemin parametrelerine bağlı korelasyonlar önerilmiştir.

Çalışmanın her aşamasında destek olan, bilgi ve deneyimlerini her zaman paylaşan değerli hocam Doç. Dr. Sayın Recep İyisan'a, laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Sayın Gökhan Çevikbilen'e, başta Tek. Sayın Semih VİÇ olmak üzere tüm laboratuvar çalışanlarına, halka kesme deney düzeneğinin modifikasyonunda çok önemli katkılarda bulunan Öğr. Gör. Ali Bahadır ve Yrd. Doç. Dr. Özgür Üstün'e, her zaman yanımda olan dostlarıma, meslektaşlarıma ve en önemlisi maddi ve manevi olarak beni her zaman destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2012 Mustafa Hatipoğlu

İnşaat Yüksek Mühendisi

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**ÖNSÖZ** ..... **v**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**KISALTMALAR** ..... **ix**
**SEMBOLLER** ..... **xi**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ..... **xiii**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **xv**
**ÖZET** ..... **xxvii**
**SUMMARY** ..... **xxix**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
1.1 Amaç ..... 3
1.2 Kapsam ..... 4
**2. KALICI KAYMA MUKAVEMETİ VE ETKİYEN FAKTÖRLER** ..... **7**
2.1 Giriş ..... 7
2.1.1 Zeminlerin Kayma Mukavemeti ve Mohr - Coulomb Göçme Hipotezi ..... 8
2.1.1.1 Efektif Şartlarda Kayma Mukavemeti ..... 11
2.1.2 Tabii Zeminlerin Kayma Mukavemeti ..... 11
2.1.3 Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemeti ..... 17
2.2 Kalıcı Kayma Mukavemetini Belirleme Yöntemleri ..... 24
2.2.1 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi ..... 24
2.2.2 Halka Kesme Deneyi ..... 27
2.2.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi ..... 31
2.3 Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkiyen Faktörler ..... 32
2.3.1 Mineraloji ve Dane Yapısı ..... 33
2.3.1.1 Kıvam limitleri ..... 39
2.3.2 Gerilme Seviyesinin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi ..... 74
2.3.3 Kil yüzdesi ..... 84
2.3.4 Aktivite ..... 100
2.3.5 Kesme Hızı ..... 103
2.3.6 Kesme Modu ..... 117
**3. MALZEME VE YÖNTEM** ..... **125**
3.1 Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri ..... 125
3.1.1 Numunelerin Mineralojik Yapıları ..... 132
3.2 Numune Hazırlama Yöntemi ..... 134
3.3 Kullanılan Deney Sistemleri ..... 139
3.3.1 Halka Kesme Deneyi ..... 140
3.3.1.1 Deney Sisteminin Geliştirilmesi ..... 142
3.3.1.2 Veri toplama Ünitesi ..... 144
3.3.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi ..... 145
3.3.3 Üç Eksenli basınç Deneyi ..... 145
3.3.4 Konsolidasyon (Odometre) Deneyi ..... 146
**4. DENEYSEL ÇALIŞMA** ..... **147**
4.1 Halka Kesme Deneyleri ..... 148
4.1.1 Standart Halka Kesme Deneyleri ..... 149
4.1.2 Farklı Kesme Hızlarında Yapılan Halka Kesme Deneyleri ..... 152

4.1.3 Farklı Aşırı Konsolidasyon Oranlarında Yapılan Halka Kesme Deneyleri.....156
4.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri.....159
4.3 Konsolidasyonlu Drenajlı (CD) Üç Eksenli Basınç Deneyleri.....163
4.4 Kesme kutusu deneyleri.....166
4.5 Konsolidasyon Deneyleri.....171
**5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....175**
5.1 Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....175
5.2 Kesme Hızı ile Kalıcı Kayma Mukavemeti İlişkisi.....181
5.3 Kıvam Limitlerinin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi.....185
5.4 İnce Dane Oranı, Kil Yüzdesi ve Aktivitenin Etkisi.....201
5.5 Diğer Zemin Özellikleri İle Kalıcı Kayma Mukavemeti Arasındaki İlişki.....207
5.6 Aşırı Konsolidasyon Oranının Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi.....213
**6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....245**
**KAYNAKLAR.....253**
**EKLER.....259**
**ÖZGEÇMİŞ.....315**

## KISALTMALAR

**ADU** : Analog iletişim birimi (Analog dialog unit)
**AKO** : Aşırı konsolidasyon oranı
**AK** : Aşırı konsolide
**ASTM** : American Society for Testing Materials
**BZSS** : Birleştirilmiş zemin sınıflandırma Sistemi
**CD** : Konsolidasyonlu-drenajlı
**CH** : Yüksek plastisiteli kil
**CI** : Orta plastisiteli kil
**CL** : Düşük plastisiteli kil
**CPT** : Koni penetrasyon deneyi
**CU** : Konsolidasyonlu-drenajsız
**HK** : Halka kesme deneyi
**IDO** : İnce dane oranı
**KY** : Kil yüzdesi
**LVDT** : Linear variable differential transformer
**MB** : Metilen mavisi değeri
**MH** : Yüksek plastisiteli silt
**MI** : Orta plastisiteli silt
**ML** : Düşük plastisiteli silt
**NGI** : Norveç Geoteknik Enstitüsü Norwegian Geotechnik Institute
**NI** : National Instruments
**NK** : Normal konsolide
**OH** : Yüksek plastisiteli organik zemi
**OI** : Orta plastisiteli organik zemin
**OL** : Düşük plastisiteli organik zemin
**SEM** : Elektron mikroskobu
**SPSS** : Statistical Package for the Social Sciences
**SPT** : Standart penetrasyon deneyi
**TKK** : Tekrarlı kesme kutusu deneyi
**TS** : Türk Standartları
**USB** : Bilgisayar bağlantı türü
**UU** : Konsolidasyonsuz-drenajsız
**XRD** : X ışını defraktometresi

## SEMBOLLER

$\alpha'$ : Hız etkisi katsayısı
$\gamma_n$ : Doğal birim hacim ağırlığı
$\gamma_s$ : Dane birim hacim ağırlığı
$\Delta\sigma, \Delta\sigma_f$ : Deviatorik gerilme
$\Delta\phi'_r$ : Maksimum açısal fark
$\Delta L$ : Yatay yerdeğiştirme
$\Delta PI$ : A hattına uzaklık
$\Delta u$ : Artık boşluk suyu basıncı
$\varepsilon$ : Birim boy kısalması
$\theta$ : Açısal kesme hızı
$\sigma_1'$ : Efektif gerilmeler cinsinden büyük asal gerilme
$\sigma_3$ : Küçük asal gerilme
$\sigma_3'$ : Efektif gerilmeler cinsinden küçük asal gerilme
$\sigma_v$ : Düşey gerilme
$\sigma_1$ : Büyük asal gerilme
$(\sigma_n)_f'$ : Göçme anındaki düşey efektif gerilme
$\tau$ : Kayma gerilmesi
$\tau_f$ : Kayma mukavemeti
$\tau_{kalıcı}$ : Kalıcı kayma gerilmesi
$\tau_{pik}$ : Pik kayma gerilmesi
$\phi'$ : Kayma mukavemeti açısı (efektif)
$\phi_{kalıcı}$ : Kalıcı kayma mukavemeti açısı
$\phi_{nihai}$ : Nihai kayma mukavemeti açısı
$\phi_p$ : Pik kayma mukavemeti açısı
$\phi_{pik}$ : Pik kayma mukavemeti açısı
$\phi_r$ : Kalıcı kayma mukavemeti açısı
$\phi, \phi_T$ : Kayma mukavemeti açısı
$\phi'_{B,r}$ : Temel kalıcı kayma mukavemeti açısı
$\phi_{100}$ : 100 kPa düşey gerilme için sekant kalıcı kayma mukavemeti açısı
$(\phi'_r)_{50}$ : 50 kPa düşey gerilme için sekant kalıcı kayma mukavemeti açısı
$(\phi'_r)_{700}$ : 700 kPa düşey gerilme için sekant kalıcı kayma mukavemeti açısı
$\varpi$ : Açısal kesme hızı
$A_c$ : Aktivite
$c, c_T$ : Kohezyon
$c'$ : Kohezyon (efektif)
CALIP : Kıvam limitleri ve kil yüzdesine bağlı bir katsayı
$c_{nihai}$ : Nihai kohezyon
$d_f$ : Göçme anındaki tahmini kayma deformasyonu
$d_r$ : Kesme hızı
e : Boşluk oranı
H : Yatay kuvvet

| | |
|---|---|
| $\mathbf{I_P}$ | **:** Plastisite indisi |
| **k** | **:** Üslü denklem katsayısı |
| **N** | **:** Normal kuvvet |
| $\boldsymbol{p_{N,r}}$ | **:** Medyan açıya karşılık gelen düşey gerilme |
| $\mathbf{q_u}$ | **:** Drenajsız serbest basınç mukavemeti |
| **R** | **:** Bileşke kuvvet |
| **r** | **:** Logaritmik denklem katsayısı |
| $\mathbf{R_\phi}$ | **:** Rölatif kalıcı kayma mukavemeti |
| $\mathbf{R^2}$ | **:** Belirleme katsayısı |
| **s** | **:** Logaritmik denklem sabiti |
| **T** | **:** Kesme kuvveti |
| **t** | **:** Üslü denklem katsayısı |
| $\mathbf{t_{50}}$ | **:** % 50 oturma yüzdesi için gereken süre |
| $\mathbf{t_f}$ | **:** Göçme anına kadar geçen tahmini süre |
| **u** | **:** Boşluk suyu basıncı |
| **V** | **:** Kesme hızı |
| **W** | **:** Ağırlık |
| $\mathbf{w_L}$ | **:** Likit limit |
| $\mathbf{w_n}$ | **:** Tabii su muhtevası |
| $\mathbf{w_P}$ | **:** Plastik limit |
| $\mathbf{w_{son}}$ | **:** Deney sonu su muhtevası |

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**

**Çizelge 2.1 :** Dane çapı, mineroloji ve dane şekli ilişkisi (Mitchell,1993)..... 34
**Çizelge 2.2 :** Bazı kil minerallerinin ortalama dane boyutları ve özgül yüzey değerleri (Bardet, 1997)..... 37
**Çizelge 2.3 :** Kil minerallerinin kıvam limitleri ve aktivite tipik değerleri (Das, 2002). ..... 37
**Çizelge 2.4 :** Suzuki ve diğ. (2005)'te kullanılan veriler..... 47
**Çizelge 2.5 :** Ataç (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_L$ bağıntıları ..... 52
**Çizelge 2.6 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_L$ bağıntıları. ..... 53
**Çizelge 2.7 :** Bayın (2011) tarafından verilen $\phi_r$-$w_L$ bağıntıları. ..... 54
**Çizelge 2.8 :** Ataç (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$I_p$ bağıntıları. ..... 64
**Çizelge 2.9 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$I_p$ bağıntıları. ..... 65
**Çizelge 2.10 :** Bayın (2011) tarafından önerilen $\phi_r$-$I_p$ bağıntıları. ..... 67
**Çizelge 2.11 :** Ataç (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_p$ bağıntıları..... 68
**Çizelge 2.12 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_p$ bağıntıları. ..... 69
**Çizelge 2.13 :** Bayın (2011) tarafından verilen $\phi_r$-$w_p$ bağıntıları..... 70
**Çizelge 2.14 :** Deney yapılan numunelere ait sekant kalıcı kayma mukavemeti açıları (Skempton, 1985). ..... 81
**Çizelge 2.15 :** Numunelerin sekant kalıcı kayma mukavemeti açıları ortalamaları. ..... 81
**Çizelge 2.16 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-KY bağıntıları..... 99
**Çizelge 2.17 :** Bayın (2011) tarafından önerilen $\phi_r$-KY bağıntıları. ..... 100
**Çizelge 2.18 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-A bağıntıları..... 102
**Çizelge 2.19 :** Bayın (2011) tarafından verilen $\phi_r$-A bağıntıları. ..... 103
**Çizelge 2.20 :** Killerde kalıcı kayma mukavemetinin yavaş kesme hızlarında değişimi (Skempton, 1985). ..... 105
**Çizelge 2.21 :** Kaolin ve çamurtaşı numunelerinin farklı hızlarda yapılan halka kesme deneyi sonuçları (Suzuki, 2001)..... 113
**Çizelge 2.22 :** Dane şekli ve daneler arası sürtünme açısına bağlı olarak olası muhtemel kesme modları (Lupini ve diğ., 1981). ..... 120
**Çizelge 2.23 :** Halka kesme deneyinde yükleme ve kesme modu durumuna göre beklenen idealleştirilmiş davranış (Lupini ve diğ., 1981)..... 121
**Çizelge 3.1 :** Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin özellikleri ..... 127
**Çizelge 4.1 :** Halka Kesme deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri..... 153
**Çizelge 4.2 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri..... 163
**Çizelge 4.3 :** Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları (Bayın, 2011) ..... 165
**Çizelge 4.4 :** Kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri.... 170
**Çizelge 4.5 :** H2 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için kademeli (K) ve doğrudan (D) boşaltma durumlarında elde edilen Cs ve Cc değerleri..... 173

**Çizelge 5.1 :** Halka kesme deneyi ile belirlenmiş kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimini gösteren korelasyon bağıntıları ve korelasyon katsayıları .....187
**Çizelge 5.2 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile belirlenmiş kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimini gösteren korelasyon bağıntıları ve korelasyon katsayıları.....188
**Çizelge 5.3 :** Kıvam limitleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında önerilen korelasyonlar.....200
**Çizelge 5.4 :** Pik kayma mukavemeti açısı $\phi pik$ için önerilen aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar.....241
**Çizelge 5.5 :** Kayma gerilmelerinin oranı $\tau pik/\tau kalıcı$ için önerilen aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar.....243
**Çizelge F.1:** Amplifikatörün deney başlangıç değerleri……..307

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 2.1 :** Coulomb sürtünme teorisi (Budhu, 2010) ..... 8
**Şekil 2.2 :** Mohr daireleri ve göçme zarfları (Bardet, 1997) ..... 9
**Şekil 2.3 :** (a) Mohr daireleri ve meydana gelen göçme zarfları (b) Bu zarflara ait kayma mukavemeti açısının düşey gerilme ile değişimi (Bardet, 1997) ..... 10
**Şekil 2.4 :** Göçme durumunu gösteren toplam ve efektif Mohr daireleri ve kırılma zarfları (Holtz ve Kovacs, 1981) ..... 12
**Şekil 2.5 :** Konsolidasyonsuz ve drenajsız koşullarda elde edilen Mohr daireleri ve elde edilen kırılma zarfları ..... 13
**Şekil 2.6 :** Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşullarda yapılan deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin uygulamada geçerli olduğu durumlar (Holtz ve Kovacs, 1981) ..... 14
**Şekil 2.7 :** Konsolidasyonlu-drenajsız (CU) şartlarda yapılan deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin uygulamada kullanıldığı durumlar (Holtz ve Kovacs, 1981) ..... 15
**Şekil 2.8 :** Konsolidasyonlu-drenajlı (CD) şartlarda yapılan deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin uygulamada kullanıldığı durumlar (Holtz ve Kovacs, 1981) ..... 16
**Şekil 2.9 :** Sabit düşey gerilme altında gerilme-şekil değiştirme grafiği, elde edilen pik ve kalıcı mukavemet zarfları, su muhtevasının yerdeğiştirme ile değişimi (Skempton, 1964) ..... 18
**Şekil 2.10 :** Aşırı konsolidasyonun oluşma süreci (Skempton, 1964) ..... 19
**Şekil 2.11 :** Farklı kil yüzdeleri için sabit düşey gerilme altında gerilme-şekil değiştirme grafikleri (Skempton, 1985) ..... 20
**Şekil 2.12 :** Vaka analizlerinden elde edilen kalıcı şartlarda, tamamıyla yumuşamış şartlarda ve mobilize olmuş gerilme oranlarının karşılaştırması (Stark ve Eid, 1997) ..... 22
**Şekil 2.13 :** Kalıcı şartlardaki ve tamamen yumuşamış şartlardaki mukavemet zarflarının vaka analizlerindeki mobilize olmuş ortalama gerilmelerle karşılaştırılması (Stark ve Eid, 1997) ..... 23
**Şekil 2.14 :** Kalıcı şartlar ile tamamen yumuşamış şartlarda elde edilen kayma mukavemeti açıları farkının likit limit ile değişimi (Stark ve Eid, 1997) ..... 23
**Şekil 2.15 :** Kesme kutusu deney aletinin kesiti (Önalp, 2007 ; Ürkmez, 2010) ..... 25
**Şekil 2.16 :** NGI-tipi halka kesme deney aleti (Suzuki, 2001) ..... 27
**Şekil 2.17 :** Bromhead tipi halka kesme aleti (Stark ve Conteras, 1996; Bromhead, 1986) 28
**Şekil 2.18 :** NGI-tipi ve Bromhead tipi halka kesme deney numunelerinin kesme yüzeyleri (Meehan ve diğ., 2008) ..... 29
**Şekil 2.19 :** Loadtrac II üç eksenli basınç deney aleti (İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı, 2011; Geocomp, 2011 ) ..... 33

**Şekil 2.20 :** (a) Kaolinit minerallerinin elektron mikroskobu altındaki görünümü. Resim genişliği 17 μm'dur. (b) Kuvars minerallerinin elektron mikroskobu altındaki görünümü (Mitchell, 1993). 35
**Şekil 2.21 :** Kıvam limitleri ve aktivite ile kalıcı mukavemet arasındaki ilişki (Stark ve Eid, 1994) 38
**Şekil 2.22 :** Güney Galler aşırı konsolide zeminlerinin $w_P/w_L$ oranı ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki ilişki (De ve Furdas, 1973) 41
**Şekil 2.23 :** Mesri ve Cepeda-Diaz, (1986)'ya göre likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki 41
**Şekil 2.24 :** Kalteziotis, (1993)'e göre likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki 42
**Şekil 2.25 :** Sridharan ve Rao (2004) tarafından verilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkisi 43
**Şekil 2.26 :** Dewoolkar ve Huzjak (2005)'te kullanılan numunelerin plastisite kartındaki yerleşimi 44
**Şekil 2.27 :** Dewoolkar ve Huzjak, (2005) tarafından verilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler 45
**Şekil 2.28 :** a)Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısının tanjantı ilişkisi b)Likit limit ile kayma mukavemeti açılarının tanjantlarının oranı ilişkisi (Suzuki ve diğ., 2005) 46
**Şekil 2.29 :** Tiwari ve Marui (2005) tarafından verilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler 48
**Şekil 2.30 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) 49
**Şekil 2.31 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) 50
**Şekil 2.32 :** Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri (İyisan ve diğ., 2006a) 50
**Şekil 2.33 :** İyisan ve diğ. (2006b) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri 51
**Şekil 2.34 :** Ataç (2009) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri 52
**Şekil 2.35 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri 52
**Şekil 2.36 :** İyisan ve diğ. (2009) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi 53
**Şekil 2.37 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri 54
**Şekil 2.38 :** Yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının Ürkmez (2009) nin tekrarlı kesme kutusu çalışmaları ile birlikte değerlendirilmesi (Bayın, 2011) 55
**Şekil 2.39 :** Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Voight, 1973) 56
**Şekil 2.40 :** Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981) 56
**Şekil 2.41 :** Maksimoviç (1989)'ta verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki 57

**Şekil 2.42 :** Kalteziotis (1993)'e göre plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki..... 58
**Şekil 2.43 :** Plastisite indisi ile hız etki katsayısı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).. 59
**Şekil 2.44 :** Wesley (2003)'te verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki..... 59
**Şekil 2.45 :** Tiwari ve Marui (2005)'e göre plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki ..... 60
**Şekil 2.46 :** Suzuki ve diğ. (2007) tarafından verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki..... 60
**Şekil 2.47 :** Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı/kayma mukavemeti açısı oranı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2007)..... 61
**Şekil 2.48 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) ..... 61
**Şekil 2.49 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) ..... 62
**Şekil 2.50 :** Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri (İyisan ve diğ., 2006a)..... 62
**Şekil 2.51 :** İyisan ve diğ. (2006b) tarafından verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 63
**Şekil 2.52 :** Ataç (2009) tarafından verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 64
**Şekil 2.53 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri ..... 65
**Şekil 2.54 :** İyisan ve diğ. (2009) tarafından verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi ..... 66
**Şekil 2.55 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 66
**Şekil 2.56 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) ..... 67
**Şekil 2.57 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) ..... 68
**Şekil 2.58 :** Ataç (2009)'da verilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri 68
**Şekil 2.59 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 69
**Şekil 2.60 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 70
**Şekil 2.61 :** CALIP ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki, (Collotta ve diğ.,1989) ..... 71
**Şekil 2.62 :** Casagrande plastisite kartı (Wesley, 2003) ..... 72
**Şekil 2.63 :** Wesley (2003)'de kullanılan numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleşimi (Wesley, 2003) ..... 73
**Şekil 2.64 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile A-hattına uzaklık ilişkisi (Wesley, 2003)..... 74
**Şekil 2.65 :** Kayma mukavemeti zarfı için lineer yaklaşım (Thiel, 2009)..... 75
**Şekil 2.66 :** Kayma mukavemeti zarfının eğriselliği (Maksimovic,1989)..... 76
**Şekil 2.67 :** Kayma mukavemeti zarfının eğriselliği (Maksimovic, 1989)..... 77

**Şekil 2.68 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısının efektif gerilmeye bağlı değişimi (Maksimovic,1989)..... 80
**Şekil 2.69 :** Kalıcı kayma mukavemeti zarfları ve Sekant kalıcı kayma mukavemetinin düşey efektif gerilme ile değişimi (Di Maio ve Fenelli, 1994)..... 82
**Şekil 2.70 :** Altamira bentonitik tüfünün kalıcı mukavemet zarfının eğriselliği (Stark ve Eid, 1994) ..... 83
**Şekil 2.71 :** Kalıcı kayma mukavemeti zarfları (Tiwari ve Marui, 2005)..... 83
**Şekil 2.72 :** Rölatif kalıcı kayma mukavemeti ($R_\phi$) parametresinin kil yüzdesi ile ilişkisi (Kenney, 1977) ..... 85
**Şekil 2.73 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981)..... 85
**Şekil 2.74 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981)..... 86
**Şekil 2.75 :** Kalıcı kayma mukavemetinin kil yüzdesine ve kesme moduna bağlı değişimi (Lupini ve diğ., 1981) ..... 86
**Şekil 2.76 :** Kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Skempton, 1985)..... 87
**Şekil 2.77 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Skempton, 1985)..... 88
**Şekil 2.78 :** Kil boyutlu dane yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısıs arasındaki ilişki (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986)..... 89
**Şekil 2.79 :** (a)Tekrarlı kesme kutusu deneyi verilerine göre kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (b) Halka kesme deneyi verilerine göre kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Collotta ve diğ., 1989)..... 90
**Şekil 2.80 :** Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Kalteziotis, 1993)..... 91
**Şekil 2.81 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ve likit limit değerleri arasındaki ilişki (Stark ve Eid, 1994)..... 92
**Şekil 2.82 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ve likit limit arasındaki ilişki (Stark ve Eid, 1994)..... 92
**Şekil 2.83 :** Hız etki faktörü ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001)..... 93
**Şekil 2.84 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Wesley, 2004)..... 94
**Şekil 2.85 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Tiwari ve Marui, 2005) ..... 94
**Şekil 2.86 :** (a)Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (b) Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı/pik kayma mukavemeti açısı oranı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2007; Suzuki ve diğ., 2005)..... 95
**Şekil 2.87 :** Koltuk (2005) tarafından verilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi..... 96
**Şekil 2.88 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006) ..... 97
**Şekil 2.89 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006)..... 97
**Şekil 2.90 :** Ataç (2009) tarafından verilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 98
**Şekil 2.91 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 98
**Şekil 2.92 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 99

**Şekil 2.93 :** Ataç (2009) tarafından verilen aktivite kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri ..... 101
**Şekil 2.94 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen aktivite kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 101
**Şekil 2.95 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri..... 102
**Şekil 2.96 :** Killerde yavaş kesme hızlarında kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızına göre değişimi (Skempton, 1985) ..... 105
**Şekil 2.97 :** Kalabagh Barajı 188L kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, (Skempton, 1985) ..... 106
**Şekil 2.98 :** Kalabagh Barajı 704 kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, Şubat 1984 (Skempton, 1985) ..... 107
**Şekil 2.99 :** Kalabagh Barajı 704 kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, Şubat 1984 (Skempton, 1985) ..... 108
**Şekil 2.100 :** Kalabagh Barajı 910L kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, Ekim 1983 (Skempton, 1985)..... 108
**Şekil 2.101 :** Lemos ve diğ. (1986) tarafından verilen drenajlı şartlarda kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisi ..... 109
**Şekil 2.102 :** Londra kili ve Cowden buzul çökelleri üzerinde farklı kesme hızlarında yapılan deney sonuçları (Parathiras, 1995) ..... 110
**Şekil 2.103 :** Gözlenen hıza bağımlı mukavemet davranışı (Tika ve diğ., 1996)..... 111
**Şekil 2.104 :** Kohezyonlu zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızına bağlı değişimi (Tika ve diğ., 1996) ..... 113
**Şekil 2.105 :** Kaolin ve Çamurtaşı için $\tau/\sigma$ oranı ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001) ..... 114
**Şekil 2.106 :** Kaolinin farklı kesme hızlarında elde edilen kalıcı durumları için elektron mikroskobu altındaki görünümleri, (Suzuki ve diğ., 2001)..... 115
**Şekil 2.107 :** Kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005)..... 116
**Şekil 2.108 :** Kil yüzdesi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005) ..... 116
**Şekil 2.109 :** Plastisite indisi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005)..... 117
**Şekil 2.110 :** Aktivite ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005). 117
**Şekil 2.111 :** Walton's Wood kilinde gözlenen kesme yüzeyi bölgesi yapısı (Skempton, 1985)..... 119
**Şekil 2.112 :** Kesme yüzeyinde çekilen elektron mikroskobu fotoğraflarında dane yönelimi (Kanji ve Wolle, 1977)..... 120
**Şekil 2.113 :** Happisburg-Londra kili karışımlarında göçme sonrası kesme yüzeyi yapısı (Lupini ve diğ., 1981)..... 122
**Şekil 2.114 :** Granüler boşluk oranına göre kesme modunun değişimi (Lupini ve diğ., 1981) ..... 123
**Şekil 3.1 :** Çalışma kapsamında kullanılan numunelerden bazıları..... 126
**Şekil 3.2 :** Kullanılan numunelerin likit limitlerinin dağılımı ..... 128
**Şekil 3.3 :** Kullanılan numunelerin plastik limitlerinin dağılımı..... 129
**Şekil 3.4 :** Kullanılan numunelerin plastisite indislerinin dağılımı ..... 129
**Şekil 3.5 :** Numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleşimi (Holtz ve Kovacs, 1981'den uyarlanmıştır.) ..... 130

**Şekil 3.6 :** Numunelerin dane çapı dağılımı eğrileri ..... 131
**Şekil 3.7 :** Numunelerin 40 nolu elek altına geçen kısmının dane çapı dağılımı eğrileri ... 131
**Şekil 3.8 :** H2 kodlu numunenin XRD analiz sonuçları ..... 133
**Şekil 3.9 :** H8 kodlu numunenin XRD analiz sonuçları ..... 133
**Şekil 3.10 :** Kullanılan Rowe hücresi ve konsolidometreler ..... 134
**Şekil 3.11 :** Çalışma için yaptırılan konsolidometrelerde (a) ölü yük ile yükleme (b) hava basıncı ile yükleme , (c) Yaptırılan konsolidometrelerin hava basıncı uygulama vanaları, (d) Düşey şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla kullanılan 1/100 mm hassasiyetli dijital kumpaslar ..... 136
**Şekil 3.12 :** H1 numunesinin konsolidometrelerdeki konsolidasyon sürecinde oturmaların zamana bağlı değişimi ..... 138
**Şekil 3.13 :** H1 numunesi için konsolidometrelerde konsolidasyon sürecinde su cıkısların takibi ..... 138
**Şekil 3.14 :** Konsolidometreden çıkan numuneler ..... 139
**Şekil 3.15 :** Konsolidometreden çıkan numunelerin saklanması ..... 139
**Şekil 3.16 :** Halka kesme deney aleti ..... 140
**Şekil 3.17 :** NEC marka 4 kanallı amplifikatör (sırasıyla kanallarda gösterilen değerler kayma gerilmesi, çevre sürtünmesi, düşey deformasyon, düşey gerilme) ..... 141
**Şekil 3.18 :** Bonfiglioli marka WL-110 redüktör ..... 143
**Şekil 3.19 :** Bonfiglioli marka WL-110 redüktörün deney sistemine bağlantısı ve hız kontrol kutusu ..... 143
**Şekil 3.20 :** National Instrument 6009 veri toplama ünitesi ve bilgisayarla veri toplama .. 144
**Şekil 3.21 :** ELE marka kesme kutusu deney aleti ..... 145
**Şekil 3.22 :** ELE marka üç eksenli basınç deney aleti ..... 146
**Şekil 4.1 :** H 2 numunesi üzerinde yapılan halka kesme deney sonuçları ..... 151
**Şekil 4.2 :** H 8 Numunesinin farklı hızlarda ve farklı düşey gerilmelerdeki halka kesme deneyi sonuçları ..... 155
**Şekil 4.3 :** H8 Numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında gerilme şekil değiştirme eğrileri ..... 158
**Şekil 4.4 :** H 8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında elde edilen mukavemet zarfları ..... 159
**Şekil 4.5 :** H 17 numunesinin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ..... 162
**Şekil 4.6 :** H 14 numunesinin konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinde elde edilen kesme yüzeyi (Bayın, 2011) ..... 164
**Şekil 4.7 :** H 14 numunesinin konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ..... 166
**Şekil 4.8 :** H 19 numunesi kesme kutusu deney sonucu ..... 169
**Şekil 4.9 :** Farklı düşey gerilmelerde hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları ..... 172
**Şekil 4.10 :** H 2 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen konsolidasyon eğrileri ..... 173
**Şekil 5.1 :** Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi ..... 177
**Şekil 5.2 :** Üç eksenli basınç (CD) deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi ..... 179
**Şekil 5.3 :** Üç eksenli basınç (CD) deneyi ile halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi ..... 180

**Şekil 5.4 :** Üç eksenli basınç deneyi, halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limite göre karşılaştırması ..... 181
**Şekil 5.5 :** Seçilmiş numuneler üzerinde farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ..... 183
**Şekil 5.6 :** Farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının 0.02 mm/dak kesme hızında elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısına oranı ..... 184
**Şekil 5.7 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ile likit limit ile değişimi ..... 185
**Şekil 5.8 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ile likit limit ile değişimi ..... 186
**Şekil 5.9 :** Halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı-likit limit ilişkisinin diğer korelasyonlarla karşılaştırılması ..... 189
**Şekil 5.10 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı-likit limit ilişkisinin diğer korelasyonlarla karşılaştırılması ..... 190
**Şekil 5.11 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması ..... 191
**Şekil 5.12 :** Halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi ..... 192
**Şekil 5.13 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastisite indisi ilişkisi ..... 193
**Şekil 5.14 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisi ilişkisinin önceki korelasyonlarla karşılaştırması ..... 194
**Şekil 5.15 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisi ilişkisinin önceki korelasyonlarla karşılaştırılması ..... 194
**Şekil 5.16 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması ..... 195
**Şekil 5.17 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit ilişkisi ..... 196
**Şekil 5.18 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi ..... 198
**Şekil 5.19 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastik limit ilişkisi ..... 199
**Şekil 5.20 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısı A hattına uzaklık ilişkisi (Wesley, 2003'ten uyarlanmıştır.) ..... 201
**Şekil 5.21 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ince dane yüzdesi ile değişimi ..... 202
**Şekil 5.22 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ince dane yüzdesi ile değişimi ..... 203
**Şekil 5.23 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi ..... 204
**Şekil 5.24 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi ..... 204
**Şekil 5.25 :** Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı kil yüzdesi ilişkisinin önceki korelasyonlarla karşılaştırılması ..... 205

**Şekil 5.26 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ile değişimi ..... 206
**Şekil 5.27 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ile değişimi ..... 206
**Şekil 5.28 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile CALIP ilişkisi ..... 207
**Şekil 5.29 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile CALIP ilişkisi ..... 208
**Şekil 5.30 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının Collotta ve diğ., 1989 ile karşılaştırılması ..... 209
**Şekil 5.31 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları Collotta ve diğ., 1989 ile karşılaştırılması ..... 209
**Şekil 5.32 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit/likit limit oranı ile değişimi ..... 210
**Şekil 5.33 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit/likit limit oranına ile değişimi ..... 211
**Şekil 5.34 :** Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastik limit/likit limit oranına göre değişiminin De ve Furdas (1973) ile karşılaştırılması ..... 212
**Şekil 5.35 :** H 19 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 215
**Şekil 5.36 :** H3 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 216
**Şekil 5.37 :** H9 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 216
**Şekil 5.38 :** H14 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen mukavemet zarfları ..... 217
**Şekil 5.39 :** H14 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen kayma mukavemeti açıları ..... 218
**Şekil 5.40 :** Pik kayma mukavemeti açısının tahmini için tanımlanan $s_1$ sabitinin likit limite bağlı değişimi ..... 219
**Şekil 5.41 :** $r_1$ katsayısının likit limite bağlı değişimi ..... 220
**Şekil 5.42 :** $r_1$ katsayısının plastisite indisine bağlı değişimi ..... 221
**Şekil 5.43 :** $k_1$ katsayısının likit limite bağlı değişimi ..... 221
**Şekil 5.44 :** $t_1$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi ..... 222
**Şekil 5.45 :** $t_1$ değerlerinin plastisite indisine bağlı değişimi ..... 223
**Şekil 5.46 :** H5 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen $\tau pik/\tau kalıc$ı oranları ..... 223
**Şekil 5.47 :** $r_2$ katsayısının likit limite bağlı değişimi ..... 224
**Şekil 5.48 :** $s_2$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi ..... 225
**Şekil 5.49 :** $k_2$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi ..... 225
**Şekil 5.50 :** $t_2$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi ..... 226
**Şekil 5.51 :** "t ($\tau pik/\tau kalıc$ı)" değerlerinin likit limite bağlı değişimi ..... 226
**Şekil 5.52 :** $\phi pik$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 227
**Şekil 5.53 :** $\phi pik$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 227
**Şekil 5.54 :** $\phi pik$ değerlerinin plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 228

**Şekil 5.55 :** $\phi pik$ değerlerinin plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 228
**Şekil 5.56 :** $\tau pik/\tau kalıcı$ değerlerinin logaritmik denklem kullanılarak likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 229
**Şekil 5.57 :** $\tau pik/\tau kalıcı$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişiminin logaritmik denklem kullanılarak elde edilen yüzey grafiği ..... 229
**Şekil 5.58 :** $\tau pik/\tau kalıcı$ değerlerinin üslü denklem kullanılarak likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 230
**Şekil 5.59 :** $\tau pik/\tau kalıcı$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişiminin üslü denklem kullanılarak elde edilen yüzey grafiği ..... 230
**Şekil 5.60 :** Pik kayma mukavemeti açılarının ($\phi pik$) ikili regresyona göre likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 231
**Şekil 5.61 :** Deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile geliştirilen likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen pik kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması ..... 232
**Şekil 5.62 :** Pik kayma mukavemeti açılarının ($\phi pik$) ikili regresyona göre plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 233
**Şekil 5.63 :** Deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile geliştirilen plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen pik kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması ..... 233
**Şekil 5.64 :** Pik kayma mukavemeti açılarının ($\phi pik$) ikili regresyona göre plastik limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 234
**Şekil 5.65 :** Deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile geliştirilen plastik limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen pik kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması ..... 235
**Şekil 5.66 :** Kayma gerilmelerinin oranın ($\tau pik/\tau kalıcı$) ikili regresyona göre likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 235
**Şekil 5.67 :** Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi oranları ile geliştirilen likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen kayma gerilmesi oranlarının karşılaştırılması ..... 236
**Şekil 5.68 :** Kayma gerilmelerinin oranın ($\tau pik/\tau kalıcı$) ikili regresyona göre plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi ..... 237
**Şekil 5.69 :** Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi oranları ile geliştirilen plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen kayma gerilmesi oranlarının karşılaştırılması ..... 237
**Şekil 5.70 :** $\phi pik$ için likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıların deney verileri ile karşılaştırılması ..... 238
**Şekil 5.71 :** $\phi pik$ için plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar ile deney verilerinin karşılaştırması ..... 239
**Şekil 5.72 :** $\tau pik/\tau kalıcı$ oranı için likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar ile deney verilerinin karşılaştırması ..... 242
**Şekil 5.73 :** H8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen kayma mukavemeti açıları ..... 243
**Şekil 5.74 :** H8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen kayma mukavemeti oranları ..... 244

**Şekil A.1 :** H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 261
**Şekil A.2 :** H9, H10, H11, H12, H13, H14, H15, H16 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 262
**Şekil A.3 :** H17, H18, H19, H20, H21, H22, H23, H24 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 263
**Şekil A.4 :** H25, H26, H27, H28, H29, H30, H31, H32 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 264
**Şekil A.5 :** H33, H34, H35, H36, H37, H38, H39, H40 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 265
**Şekil A.6 :** H41, H42, H43, H44, H45, H46, H47, H48 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 266
**Şekil A.7 :** H49 ve H50 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları ..... 267
**Şekil B.1 :** H1, H2, H3, H4 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 269
**Şekil B.2 :** H5, H6, H7, H8 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 270
**Şekil B.3 :** H9, H10, H11, H12 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları .. 271
**Şekil B.4 :** H13, H14, H15, H16 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları 272
**Şekil B.5 :** H17, H18, H19, H20 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları 273
**Şekil B.6 :** H21, H22, H23, H24 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları 274
**Şekil B.7 :** H25, H27, H28, H29 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları 275
**Şekil B.8 :** H30, H31, H32, H33 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları 276
**Şekil B.9 :** H34, H35, H36, H37 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları 277
**Şekil B.10 :** H38, H39, H40, H41 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 278
**Şekil B.11 :** H42, H43, H44, H45 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 279
**Şekil C.1 :** H1, H2, H3 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ..... 281
**Şekil C.2 :** H4, H5, H6 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ..... 282
**Şekil C.3 :** H7, H8, H11 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ..... 283
**Şekil C.4 :** H13, H14, H15 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ..... 284
**Şekil D.1 :** H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8 numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 285
**Şekil D.2 :** H9, H10, H11, H12, H13, H14, H15, H16 numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 286
**Şekil D.3 :** H17, H18, H19, H20, H21, H22, H23, H24 numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 287
**Şekil D.4 :** H25 numunesine ait kesme kutusu deneyi sonuçları ..... 288
**Şekil E.1 :** H1 ve H2 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 289
**Şekil E.2 :** H3 ve H4 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 290
**Şekil E.3 :** H5 ve H6 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 291

**Şekil E.4 :** H8 ve H9 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 292
**Şekil E.5 :** H14 ve H19 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları ..... 293
**Şekil F.1 :** Numunenin kalıptan çıkarılması ve dış ringe alınması ..... 295
**Şekil F.2 :** Numunenin 2 cm yüksekliğine getirilmesi ..... 296
**Şekil F.3 :** Numunenin halka şekline getirilmesi ..... 297
**Şekil F.4 :** Numunenin deneye hazır durumu ..... 297
**Şekil F.5 :** En üst dış ve kılavuz ringlerin montajı ..... 298
**Şekil F.6 :** İç ringin montajı ..... 298
**Şekil F.7 :** Numunenin halka kesme deney aletine yerleştirilmesi ..... 299
**Şekil F.8 :** En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının montajı ..... 300
**Şekil F.9 :** En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının deney aletine montajı ..... 300
**Şekil F.10 :** Mavi renkli pimlerin çıkarılması ..... 300
**Şekil F.11 :** Basınç plakasının montajı ..... 301
**Şekil F.12 :** Somunların basınç plakasına sabitlenmesi ..... 301
**Şekil F.13 :** Dengeleme basıncının uygulanması ..... 302
**Şekil F.14 :** Düşey yük uygulama şaftının yerleştirilmesi ..... 302
**Şekil F.15 :** Su yatağının yerleştirilmesi ..... 303
**Şekil F.16 :** Tork kolunun yerleştirilmesi ..... 303
**Şekil F.17 :** Ring çekme metalinin yerleştirilmesi ..... 304
**Şekil F.18 :** Sürtünme yükü alıcısının montajı ..... 304
**Şekil F.19 :** Beyaz renkli vidaların çıkarılması ..... 305
**Şekil F.20 :** Somunların gevşetilmesi ..... 305
**Şekil F.21 :** Sarı ve kırmızı renkli vidaların çıkarılması ..... 306
**Şekil F.22 :** Sarı renkli ringin aşağı indirilmesi ..... 306
**Şekil F.23 :** Deformasyon saati ve ringler arası açıklık saatinin yerleştirilmesi ..... 307
**Şekil F.24 :** Amplifikatör ..... 308
**Şekil F.25 :** Normal gerilmenin uygulanması ..... 309
**Şekil F.26 :** Ringler arasında açıklığın bırakılması ..... 310
**Şekil F.27 :** Hız kontrol kutusu ..... 311
**Şekil G.1 :** Çalışmada kullanılan numunelerin tamamını içeren Casagrande plastisite kartı ..... 313

# KALICI KAYMA MUKAVEMETİNİN LABORATUVAR DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

## ÖZET

Zeminlerde göçme meydana gelmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma mukavemetinin aşılması gereklidir. Zeminin kayma mukavemeti ise, göçme meydana gelmeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin kayma mukavemetinin tanımlanması için birçok model öne sürülmüştür. Pratikte en fazla kullanılan model olan Mohr-Coulomb göçme hipotezine göre kayma mukavemeti farklı asal gerilme altında göçme anında elde edilen mohr dairelerin teğeti olan mukavemet zarfının elde edilmesine dayanmaktadır. Kayma mukavemeti denklemi ise sözü edilen mukavemet zarfının doğru denklemi şeklinde ifade edilmesi ile kayma mukavemeti açısı ve kohezyon olarak tanımlanan kayma mukavemeti parametrelerine bağlı olarak elde edilmektedir. Zeminlerin kayma mukavemeti için gerilme şekil değiştirme davranışı incelendiğinde kayma gerilmelerinin deformasyon seviyelerinden de etkilendiği görülmektedir. Özellikle aşırı konsolide killer ve sıkı kumlarda erişilen pik kayma gerilmesi sonrasında göçmenin ardından kayma gerilmesinin düşmeye başladığı ve büyük deformasyonlar sonrasında sabit bir değere asimptotik olarak yaklaştığı görülmektedir. Zeminlerde büyük yerdeğiştirmeler sonucunda ulaşılan mukavemet değerine kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir. Kalıcı mukavemetin erişildiği deformasyon seviyelerinde genellikle daneler arası bağın kopmasından dolayı kohezyon terimi kaybolmakta ve kayma direnci sadece sürtünme bileşeni tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle kalıcı kayma mukavemeti sadece kalıcı kayma mukavemeti açısına ($\phi_r$) bağlı kalmaktadır. Genel olarak kalıcı kayma mukavemetine mineralojik yapı, kesme hızı, efektif düşey gerilme, kil yüzdesi, ince dane oranı ve aktivite gibi parametreler etki etmektedir. Geoteknik Mühendisliğinde kalıcı kayma mukavemeti, yeniden harekete geçmiş olan şev kaymaların gözlendiği şev stabilitesi problemlerinde uzun süreli konsolidasyonlu ve drenajlı şartlarda yapılan stabilite tahkiklerinde kullanılmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti parametreleri laboratuvarda Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi, Halka Kesme Deneyi ve Üç Eksenli Basınç Deneyleri yardımıyla belirlenebilmektedir. İzin verilen kesintisiz yerdeğiştirme seviyelerinin sınırlı olması, kesit alanının deney süresince sabit olmaması ve gerilme yığılmalarının oluşması ülkemizde yaygın olarak kullanılan tekrarlı kesme kutusu deneyinin önemli sınırlayıcı yanlarıdır. Uygulanması sırasında yerdeğiştirmenin sürekli ve sınırsız olması, numune kesit alanının sabit kalması ve şev stabilitesi problemlerinde görülen üç boytlu (rotasyonal) kaymayı en uygun şekle modellemesi nedeniyle kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde en uygun deney sistemi Halka Kesme Deney yöntemidir. Bu çalışmada farklı geoteknik özelliklere sahip ince daneli zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti laboratuvarda farklı deney yöntemleriyle belirlenmiş ve kalıcı kayma mukavemetine etki eden faktörler incelenmiş, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda konsolidometrelerde hazırlanmış numuneler üzerinde kalıcı kayma mukavemetini belirlemek için Halka Kesme, Tekrarlı Kesme Kutusu ve Üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan halka kesme deney

düzeneği bu çalışma kapsamında yapılan modifikasyonlar ile kalıcı kayma mukavemeti için gerekli kesme hızı mertebelerine uygun hale getirilmiştir. Bunun yanında uzun süreler alan deneyler sırasında verilerin kesintisiz ve düzgün bir şekilde toplanması amacıyla deney düzeneğine bir veri toplama ünitesi eklenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler üzerinde gerekli tüm standart sınıflandırma deneyleri yapılmış, X ışını difraktometresi (XRD) deneyi ile numunelerin mineralojik yapıları incelenmiştir. Numunelerin kalıcı kayma mukavemetini belirlenmesi için farklı düşey gerilmeler altında halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Yapılan halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kesme yüzeylerinde kil daneciklerinin yönelimini incelemek amacıyla elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı fotoğraflar çekilmiştir. Aynı numuneler üzerinde konsolidasyonlu drenajlı şartlarda üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan farklı deneyler sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri karşılaştırılmıştır. Kalıcı kayma mukavemetine kesme hızının etkisi, kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ile kıvam limitlerinin ilişkisi, mineralojik yapının etkisi incelenmiştir. Ayrıca önceki çalışmalarda sınırlı düzeyde araştırma konusu yapılan aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Pratik amaçlar doğrultusunda kalıcı kayma mukavemetinin tahmin edilebilmesi maksadıyla zemin parametrelerine bağlı korelasyonlar geliştirilmiş, elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

## DETERMINATION OF RESIDUAL SHEAR STRENGTH WITH LABORATORY TESTS


## SUMMARY

The constant shear strength attained at large displacements is defined as the residual shear strength of soils. The laboratory tests performed on the overconsolidated clays and the dense sands show that as the shear deformation increases, the shear stress firstly reaches to a peak value, and then gradually decreases to a constant value. While the peak value of the shear stress is known as the shear strength, the minimum and constant value of the shear strength is defined as the residual shear strength. The brittle behavior of the overconsolidated fissured clays makes the residual shear stress important. Although normally consolidated clays and loose sands do not illustrate a peak value as the shear deformation increases, the shear stress gradually increases up to a constant value asymptotically, which is equal to the residual shear strength. For analyzing the pre-failed stability problems of the slopes in the fissured clays and the progressive failures, it is useful to use the residual shear strength parameters due to the strength reduction with displacement since the residual shear strength is attained at large shear displacements. The residual in situ conditions can be found in various periods in terms of displacement rate, varying from 5 cm/year for the progressive failure of the fissured clay slopes to 50 cm/day for the activated landslides.

In general, the main factors affecting the residual shear strength could be counted as; mineralogical structure, shear rate, effective vertical stress, clay content and fine content. Many researchers tried to correlate the residual shear strength parameters with the consistency limits, clay fraction, effective stress, shearing rate and overconsolidation ratio (OCR). It could be claimed that for soil parameters, the residual friction angle decreases with increasing liquid limit, plasticity index, clay fraction and effective normal stress.

The ring shear test, the reversal direct shear test and the consolidated drained triaxial compression tests are the well-known methods to obtain the residual strength parameters in the laboratory. The ring shear test has some advantages such as unlimited continuous displacements, constant cross sectional area and uniform distribution of the normal stress whereas uncommon test equipment, sample size and the difficulties during installation and testing are the main disadvantages of the ring shear test. On the other hand, the prevalence of test assembly, simplicity of the test routine and the required sample dimensions are the main advantages of the reversal direct shear tests. The disadvantages of the reversal direct shear tests are limited allowable continuous displacements, non-uniform distribution of normal stress and rotation of the major axes caused by the stress concentration at the edges and

inconstant cross sectional area during the test. The third test, which is used rarely to obtain the residual parameters, is the consolidated drained triaxial compression test. In this testing method, the in-situ stress conditions could be represented better than the other tests. The capability of measuring the pore water pressure during test is another advantage. However, the limited maximum displacements, inconstant cross sectional area are the main disadvantages of this testing method. As the residual parameters are obtained in large displacements, generally the maximum displacement reached during the test is insufficient to determine the residual parameters. For all three test methods, the applicable shearing rates used in the test are suitable for residual conditions. The conventional reversal direct shear testing method is usually preferred to determine residual shear strength parameters in Turkey.

In scope of this research, ring shear, consolidated-drained reversal direct shear and consolidated drained triaxial compression tests were carried out on fifty natural soil samples having different plasticity characteristics to determine the residual shear strength parameters. All the standard classification tests and X-ray diffraction (XRD) tests were conducted on the samples in order to find the geotechnical properties and the mineralogical compositions. The liquid limits of the samples change within the range of 24 % to 340 %, the plasticity index values are between 7 % and 297 %, and the plastic limit values are between 12 % and 43 %. The samples have fine content values of values between 52 % and 100 % and the clay fraction ranging between 2 % and 100 %. In terms of Unified Soil Classification System (USCS), the soil samples were classified as high plasticity clay (CH), low plasticity clay (CL), high plasticity silt (MH) and low plasticity clay and silt (CL-ML).

The samples were prepared with the slurry consolidometers and the Rowe cell. At the beginning of this research, a slurry consolidometer and a Rowe cell was available at ITU Soil Mechanics Laboratory. In fine-grained soils, the sample preparation period takes months in order to complete the consolidation process. Therefore, within the scope of this study, three new consolidometers were designed and manufactured. The new consolidometers, which have an inner diameter of 17.5 cm, were suitable for the sample of ring shear test having an outer diameter of 15 cm. The new consolidometers are also capable of using air pressure for the consolidation pressure additionally to dead load system. Maximum consolidation stress of 80 kPa was selected during sample preparation. The consolidation stresses were gradually increased to the maximum level. The consolidation settlements and the discharged water were also collected during the sample preparation. For all consolidation levels, the end of primary consolidation was achieved.

As mentioned before, ring shear, consolidated-drained reversal direct shear and consolidated drained triaxial compression test equipments were used in this research. Before this research, the ring shear test device used in the ITU Soil Mechanics Laboratory has a shearing rate capacity between 20 mm/min to 400 mm/min. For the residual parameters of the high plasticity clays, it is suggested by the standards to use

a shearing rate of 0.02 mm/min. Therefore, the shearing rate of the ring shear equipment should be reduced to the required levels. For that purpose, a reduction gear having a brand of Bonfiglioli is installed to the system. Thus, the shearing rate capacity of the system was reduced more than 1000 times within the scope of this research. By this means required shearing rate levels were achieved. Additionally a data acquisition unit having a brand and model of National Instruments 6009 was connected to the system. The data were collected with the software called National Instruments Signal Express 3.0. As a result, without changing or modifying any part of the device, the necessary modifications were achieved.

In this research, the residual strength parameters of the natural samples were determined with different laboratory tests. The ring shear tests were conducted on 15 soil samples, the reversal direct shear tests were conducted on 44 samples and the consolidated drained triaxial compression tests were conducted on 15 soil samples. On 7 samples, the ring shear tests were applied at least at three different shearing rates and at three different vertical stress levels to obtain the effect of the shearing rate on the residual shear strength parameters. Additionally on 10 samples, ring shear tests were conducted at varying overconsolidation ratios at a vertical stress level of 50 kPa. The standard the ring shear tests were performed at 0.02 mm/min at three different stress levels of 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa, whereas for shearing rate effect, the shearing rates were selected as 0.02 mm/min, 0.2 mm/min, 2 mm/min and 20 mm/min at vertical stresses of 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa. During the tests performed to investigate the effect of overconsolidation ratio, the shearing rate was chosen as 0.1 mm/min. By using the results of shearing rate effect tests, the rate of 0.1 mm/min is called as the optimum shearing rate level defined as the maximum shearing rate which has no effect on the residual shear strength angle for the samples.

The shearing rate of 0.035 mm/min was chosen for reversal direct shear tests at three vertical stresses such as 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa. Depending on the sample type, it was assumed that at least after third cycle, the soil reached to the residual conditions. At the consolidated drained triaxial compression tests, the shearing rates changed between 0.02 mm/min and 0.08 mm/min for minimum 2 different stress levels. The tests were extended until maximum vertical displacements were achieved.

Additionally standard direct shear tests were conducted on 25 samples in order to compare the results of the direct shear tests with the other tests. The tests were performed at a shearing rate of 0.12 mm/min and at vertical stresses of 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa. After sample preparation, consolidation tests were done to obtain the consolidation parameters and the preconsolidation pressures of the soils. Furthermore, for shearing rate calculations the consolidation test results were also used. For all samples, at least two consolidation tests were performed from the upper and the lower parts of the sample. Consolidation tests were performed for direct and gradually unloading conditions for three different overconsolidation ratios to determine the effect of direct and gradual unloading on the sample properties during

consolidation period. As a result of these tests, it was proved that there were no significant variation on the expansion of the soil for different unloading types. Thus in the ring shear tests performed to obtain the effect of overconsolidation ratio on the residual strength, direct unloading was used while achieving different overconsolidation ratios in order to reduce the time required for the consolidation stage.

Consequently, the residual shear strength parameters determined from the different test methods were compared with each other. The relationships of the shear rate, the consistency limits and the overconsolidation ratio with the residual shear strength were investigated by the parametric studies. The effect of shearing rate on the residual shear strength was determined. Besides, the variation of the residual shear strength with the consistency limits, fine content, clay fraction, activity and other parameters given in the geotechnical engineering literature were examined. In addition, the effect of overconsolidation ratio was investigated. Some correlations were established depending on the overconsolidation ratio, the consistency limits and the shear strength parameters. In order to observe the shear surfaces, scanning electron microscope (SEM) and the micro lens photos were also taken. Additional correlations were developed with soil parameters for practical purposes. The results were compared with the former studies given in the geotechnical engineering literature.

# 1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde sığ derinliklerde bulunan aşırı konsolide killerle sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu tip zemin tabakaları özellikle şev stabilitesi problemleri açısından önem arz etmektedir. Aşırı konsolide killerin ve sıkı yerleşimdeki kumların gerilme şekil değiştirme davranışları incelendiğinde, gözlenen maksimum gerilme değerinden sonra ilerleyen deformasyon ile dayanımın azaldığı ve sabit bir değere yaklaştığı gözlenmektedir. Bu sabit değere zeminlerin kalıcı kayma (rezidüel) mukavemeti adı verilmektedir. Bilindiği üzere normal konsolide killerde ve gevşek kumlarda ise gerilme deformasyon ilişkilerinde belirgin bir pik değer görülmemesine karşılık, artan deformasyonla birlikte kayma gerilmesinin yönlendiği değer yine kalıcı kayma mukavemeti olmaktadır (Skempton, 1985; Mitchell, 1993). Kalıcı kayma mukavemetinin, kayma mukavemetine göre daha düşük olması nedeniyle özellikle harekete başlamış veya ilerleme kaydetmiş şevlerde düşük şev açılarında bile stabilite sağlanmasında sorunlar meydana gelmektedir. Bu durumun yapılan geoteknik tasarımlarda göz önüne alınması meydana gelebilecek büyük sorunların önlenmesi açısından yararlı olacaktır.

Zemine uygulanan yükler, derinlik boyunca zemin tabakalarında gerilme artışlarına ve dolayısıyla zeminin şekil değiştirmesine neden olmaktadır. Zeminlerin gerilme - şekil değiştirme ilişkisi, zeminin yük altındaki davranışına, başlangıç gerilme durumuna, gerilme tarihçesine, yükleme hızına ve yükleme sırasında zemin suyunun drenaj koşullarına bağlı olmaktadır. Zeminlerde meydana gelen şekil değiştirmelerin genellikle gerilme seviyesi ile doğrusal olarak artmadığı ve uygulanan yükler kaldırıldığında kalıcı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle zeminlerdeki gerilme - şekil değiştirme davranışının genellikle doğrusal olmayan viskoz - plastik bir davranış biçimi olduğu kabul edilmiştir (Mitchell, 1993).

Zeminler üzerine uygulanan yüklerin yol açtığı gerilmeler, zeminin kayma mukavemetini aştığı zaman göçme meydana gelmektedir. Zeminlerde gözlenen göçme türü, zeminin cinsine ve özelliklerine bağlı olmakla beraber, genellikle izin verilen şekil değiştirmelerin aşılması olarak tanımlanmaktadır. Temellerin taşıma

gücü, şevlerin stabilitesi, istinat yapılarına gelen yanal toprak basınçlarının belirlenmesi ve zeminlerin yerdeğiştirmeye karşı direncinin hesabı gibi stabilite problemlerinde, göçmeye yol açan kuvvetler ile karşı koyan kuvvetlerin karşılaştırılması ve göçmeye karşı bir güvenlik sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Göçmeye karşı koyan kuvveti, olası göçme yüzeyi boyunca oluşan kayma direnci oluşturmaktadır (Özaydın, 2000).

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

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

Deney düzeneği olarak kesme kutusu deney düzeneği kullanılarak yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyinde zemin numunesi kare veya daire kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içerisine yerleştirilip sabit düşey yük altında konsolide edildikten sonra uygulanan sabit bir kesme hızı altında kutunun üst parçası sabit dururken alt parçası yatay düzlemde hareket ederek numunenin ortasından geçen düzlem boyunca kesilmesine ya da diğer bir değişle kaymasına zorlanmaktadır. Bu işlem tamamlandıktan sonra numune kesilmiş yüzey üzerinde geri çekilerek kesme işlemi sabit kayma gerilmeleri elde edilene kadar tekrarlanmaktadır. Bu deney yönteminde numunede kesintisiz ve sürekli yerdeğiştirme elde edilememektedir. Bunun dışında konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ile de kalıcı kayma mukavemeti

parametreleri elde edilmektedir. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinin en önemli sınırlayıcı yanlarından biri numuneye uygulanabilir yerdeğiştirme miktarının sınırlı olmasıdır. Deney esnasında oluşan kayma yüzeyinde kesit alanının sabit olmaması dolayısı ile aynı yüzeye uniform sabit düşey gerilme uygulanamaması tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri için bir diğer sınırlayıcı yandır. Deney düzeneği yaygınlığı ve kullanım kolaylığı ise tekrarlı kesme kutusu deneyinin üstün yanlarıdır. Bu deneylerin aksine halka kesme deneyinde hem sınırsız ve kesintisiz yerdeğiştirme uygulanabilmekte hem de deneyde sabit kesit alanı ve sabit düşey gerilme sağlanabilmektedir..

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkileyen faktörler günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yapılan araştırmaların sonuçlarında, kalıcı kayma mukavemetinin en çok zeminin mineralojik yapısı, jeolojik yük ve kesme hızından etkilendiği ortaya konulmuştur (Mitchell,1993). Bunun dışında mineralojik yapıyı da temsil edebilen kıvam limitleri, aşırı konsolidasyon oranı, kil yüzdesi ve kesme modu kalıcı kayma mukavemetine etki eden diğer faktörler olarak sayılabilir. Bu faktörlerin dışında literatürde zemin içerisindeki suyun kimyasal bileşiminin, aşırı konsolidasyon oranının vb faktörlerin kalıcı kayma mukavemetine etkisi üzerine sınırlı sayıda çalışmalar da bulunmaktadır.

Bu çalışmada mümkün olduğunca çok sayıda numune üzerinde farklı deney düzenekleri kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi, deney yöntemi farkı, kesme hızı, kıvam limitleri ve aşırı konsolidasyon oranı gibi kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörler incelenmiştir. Çalışmada ana amaçlar olarak laboratuvarımızda modern standartlarda çalışabilen halka kesme deney düzeneğini kurabilmek, ülkemizden alınmış zemin numuneleri üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak kalıcı kayma mukavemeti hakkında literatürde sınırlı bilgilerin bulunduğu konulara elden geldiğince katkı yapmak sayılabilir.

## 1.1 Amaç

Bu çalışma zeminlerin kalıcı kayma mukavemet parametrelerini farklı laboratuvar deneyleri ile belirlemek, kalıcı kayma mukavemetine etki eden faktörleri incelemek, İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına modern standartlarda çalışabilen bir halka kesme deney sistemi kurabilmek amacıyla yapılmıştır. Çalışma kapsamında numuneler üzerinde kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere

halka kesme, tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan deney düzenekleri kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde mümkün olduğunca çok sayıda farklı endeks özelliklerine sahip ince daneli zemin numuneleri kullanılmıştır. Kullanılan numuneler çalışma kapsamında imal ettirilen konsolidometreler ve Rowe hücresinde hazırlanmıştır. Deney sonuçları değerlendirilerek kalıcı kayma mukavemetine deney yönteminin etkisi, kesme hızının etkisi, kıvam limitleri, ince dane oranı, kil yüzdesi ve aktivite gibi çeşitli zemin özelliklerinin etkisi ve aşırı konsolidasyon oranının etkisi incelenmiş, pratik amaçlar doğrultusunda kullanılmak üzere bazı korelasyonlar geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

## 1.2 Kapsam

Kalıcı kayma mukavemetinin farklı deney yöntemleri ile belirlemenin ve etki eden faktörlerin incelenmesinin amaçlandığı bu çalışmada farklı özellikler sahip laboratuvar şartlarında konsolidometre ve Rowe hücresinde hazırlanmış numuneler üzerinde halka kesme, tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümü, zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti hakkında genel bilgileri ve konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmaları içermektedir. Kalıcı kayma mukavemetinin neler olduğu, hangi laboratuvar deney yöntemleri ile belirlendiği, bu yöntemlerin üstün ve zayıf yanları, kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörlerin ne olduğu ve bu konuda yapılmış daha önceki çalışmaların sonuçları mümkün olduğunca geniş bir şekilde özetlenmeye çalışılmıştır.

Üçüncü bölümde, bu çalışmada incelenen numunelerin genel özellikleri ile kullanılan deney yöntemleri yer almaktadır. Deneylerde kullanılan numuneler üzerinde yapılan sınıflandırma deneyleri ve diğer deney sonuçları, numunelerin hangi şartlarda hazırlandığı, kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere kullanılacak deney düzeneklerinin kısaca tanıtımı bu bölümde verilmiştir. Ayrıca halka kesme deney düzeneğinin modifikasyonu için yapılan çalışmalar bu bölümde özetlenmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, yapılan deneylerin sonuçları ve değerlendirmeleri bulunmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere yapılan

halka kesme, tekrarlı kesme kutusu, konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç ve kesme kutusu deney sonuçları bu bölümde verilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde ise kullanılan numunelerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine deney yönteminin, endeks özelliklerinin, kesme hızının ve aşırı konsolidasyon oranının etkisi incelenerek pratik amaçlar için geliştirilen çeşitli korelasyonlara değinilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde verilen çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise çalışma sonucunda varılan sonuçlar ve bu konuda ileride yapılması önerilen araştırma konularına yer verilmiştir.

# 2. KALICI KAYMA MUKAVEMETİ VE ETKİYEN FAKTÖRLER

## 2.1 Giriş

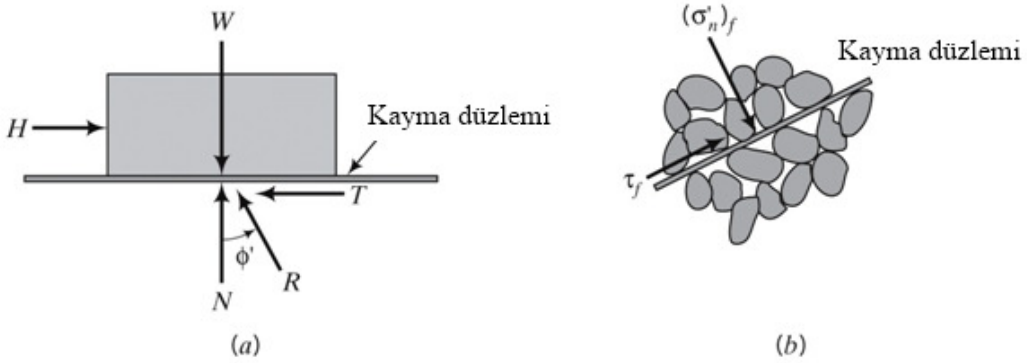
Zeminlerde göçme meydana gelmesi için olası bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması gereklidir. Belirli bir kayma düzlemi üzerine etkiyen normal ve kayma gerilmelerinin birlikte etkisi sonucu göçme ortaya çıkmaktadır. Zeminin kayma mukavemeti ise, göçme meydana gelmeden karşı koyabileceği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

Zeminlerin kayma mukavemetinin tanımlanması için birçok model öne sürülmüştür. Bunların başlıcaları Mohr-Coulomb, Tresca, Von Misses, Drucker-Prager, Duncan-Chang (Hiperbolik), Cam Kili ve Endokronik model olarak sayılabilir. Pratikte en fazla kullanılan model olan Mohr-Coulomb göçme hipotezine göre kayma mukavemeti farklı asal gerilme altında göçme anında elde edilen Mohr dairelerin teğeti olan mukavemet zarfının elde edilmesine dayanmaktadır. Kayma mukavemeti denklemi ise sözü edilen mukavemet zarfının doğru denklemi şeklinde ifade edilmesi ile kayma mukavemeti açısı "ϕ" ve kohezyon "c" olarak tanımlanan kayma mukavemeti parametrelerine bağlı olarak elde edilmektedir. Denklemin katsayısı ve sabiti olarak ifade edilen kayma mukavemeti parametreleri belirli bir zemin için sabit olmayıp, deney sırasında hakim olan yükleme ve drenaj koşullarına göre değişirler. Zeminlerin kayma mukavemeti için gerilme şekil değiştirme davranışı incelendiğinde kayma gerilmelerinin deformasyon seviyelerinden de etkilendiği görülmektedir. Özellikle aşırı konsolide killer ve sıkı kumlarda erişilen pik kayma gerilmesi sonrasında göçmenin ardından kayma gerilmesinin düşmeye başladığı ve büyük deformasyonlar sonrasında sabit bir değere asimptotik olarak yaklaştığı görülmektedir. Normal konsolide killer ve gevşek kumlarda ise pik mukavemet sonrası düşüş ya çok sınırlı seviyede meydana gelmekte yada hiç oluşmamaktadır. Büyük deformasyonlar sonucunda erişilen bu sabit kayma gerilmesine kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir. Kaymanın gerçekleşmiş olduğu yüzeylerde geçerli olan bu mukavemet özellikle yeniden harekete geçmiş şevlerde kayma yüzeyinde mobilize olan mukavemet olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bölümde zeminlerin

kayma mukavemeti, zeminde göçme durumu, kalıcı kayma mukavemeti mekanizması, kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan laboratuvar deneyleri, kalıcı kayma mukavemetinin geoteknik mühendisliğindeki önemi, kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörler ve kalıcı kayma mukavemeti ile fiziksel özellikleri arasında kurulan ilişkilere hakkında bilgiler verilmiş ve konu ile ilgili literatürde verilmiş önceki çalışmalar özetlenmiştir.

### 2.1.1 Zeminlerin Kayma Mukavemeti ve Mohr - Coulomb Göçme Hipotezi

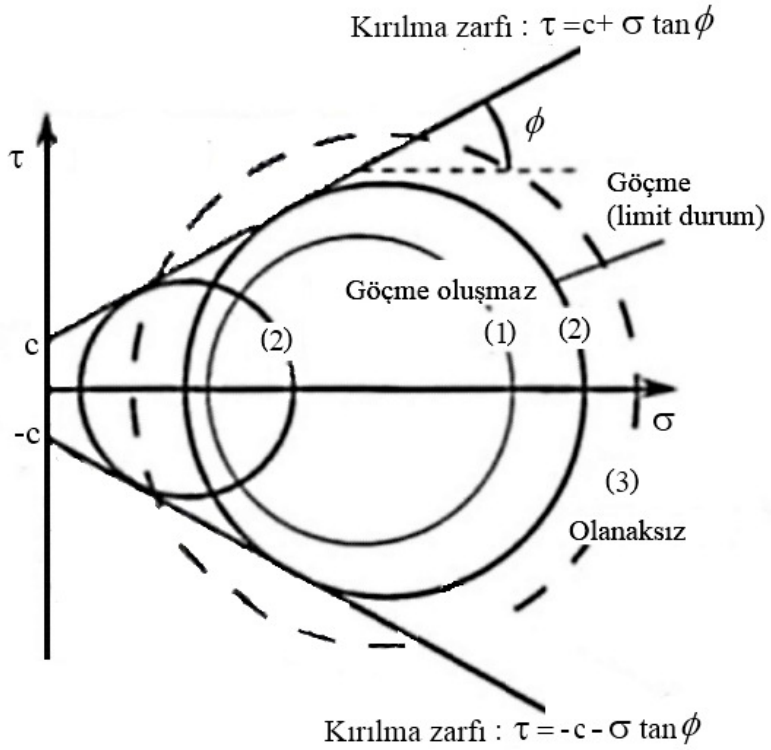
Zeminlerin kayma direncinin matematiksel bir ifade ile gösterimi Coulomb (1776) ve Tresca (1869) ile başlamıştır. Zeminler için ilk geçerli göçme hipotezi ilk kez 1911 yılında Mohr tarafından geliştirilmiştir. Zeminler için uygulanabilirliği her durumda geçerli olan Mohr hipotezini yıllar içinde başka teoriler izlemiştir. Bunlar arasında en basit ve uygulamada en yaygın olarak kullanılanı Mohr - Coulomb göçme hipotezidir. Bu hipoteze göre zeminlerin kayma mukavemeti Coulomb sürtünme yasasına dayanmaktadır. Şekil 2.1.a'da bir düzlem üzerinde kaydırılmaya çalışılan bir blok yer almaktadır. Hareketin gerçekleşmesi için uygulanan H kuvvetinin sürtünme kuvvetini yenmesi gerekir (Bardet, 1997). Şekilde W ağırlığına sahip blokla zemin arayüzünde kayma düzleminde N normal gerilme ile beraber oluşan T kayma gerilmesinin bileşke kuvveti R olarak gösterilmektedir. Bileşke kuvvetin düşeyle yaptığı açı $\phi'$ olarak ifade edilmiştir.




**Şekil 2.1 :** Coulomb sürtünme teorisi (Budhu, 2010).

Mohr hipotezi zamanla Coulomb'un yatay bağıntısı ile birleştirilerek Mohr-Coulomb göçme hipotezi oluşturulmuştur. Zeminlerin kayma mukavemetini kontrol eden mekanizma ise daneler arasında meydana gelen kayma düzlemi üzerinde daneler arası sürtünme kuvveti olarak tariflenebilir (Şekil 2.1.b). Şekilde kayma düzleminde

meydana gelen kayma gerilmesi $\tau_f$ ile kayma düzlemine dik eksenel gerilme ise $(\sigma'_n)_f$ olarak gösterilmiştir. Buna göre zeminin kayma mukavemeti bu sürtünme kuvveti ve daneler arası çekim kuvvetlerinin birlikte oluşturduğu ve Şekil 2.2'de verilen kırılma zarfı ile temsil edilebilmektedir.

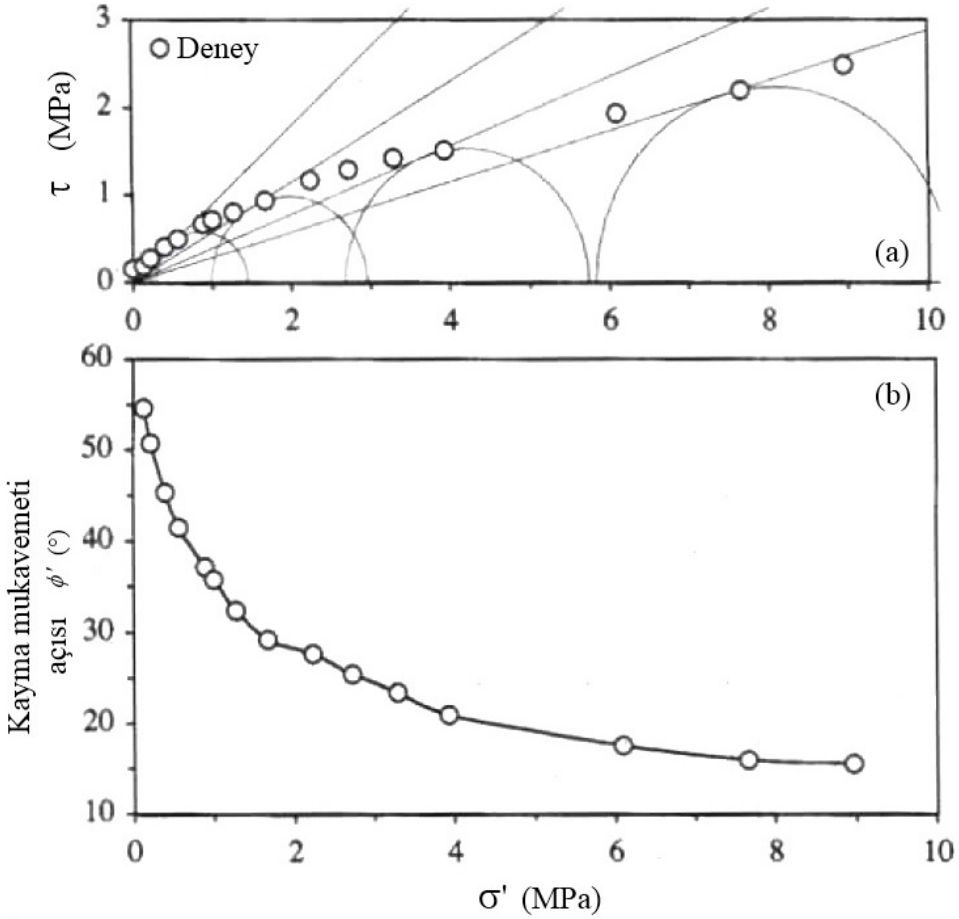



**Şekil 2.2 :** Mohr daireleri ve göçme zarfları (Bardet, 1997).

Bu şekilde normal gerilmeler yatay eksende, kayma gerilmeleri düşey eksende gösterilmektedir. Kırılma zarfının altında kalan gerilme durumları için göçme meydana gelmemektedir (1), ancak (2) dairesinde olduğu gibi bu zarfa ulaşıldığı anda zeminde göçme meydana gelmektedir. Bu zarfın dış bölgesi zemindeki göçme nedeni ile hiçbir zaman meydana gelmemektedir (3). Şekilde kırılma zarflarının dışında kalan alan içinde kalan ve kesikli çizgi ile gösterilen Mohr dairesi pratikte gerçekleşemesi mümkün olmayan bir durumu göstermektedir. Zeminin göçme zarfının doğrusal olmadığı bilindiği halde, uygulamada kırılma zarfı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi bir doğru olarak kabul edilir (Bardet, 1997). Bu doğrunun düşey ekseni kestiği nokta c ve yatay ile yaptığı açı $\phi$ ile gösterilirse, kayma mukavemetini veren bağıntı;

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

şeklinde yazılır. Bu eşitlikte, c ve $\phi$ kayma mukavemeti parametrelerini göstermektedir. $\phi$ açısı zeminin kayma mukavemeti açısı olarak bilinmektedir. Kayma mukavemeti açısı, dane yüzeyleri arası sürtünmeden kaynaklanan direnci ve danelerin birbirine göre hareketine engel olan kilitlenme etkisini de içeren toplam direnci temsil etmektedir. Mohr - Coulomb göçme hipotezindeki diğer kayma mukavemeti parametresi ise kohezyon olarak adlandırılıp c ile gösterilir. Bu katsayısının yaygın bilinen açıklaması danelerin birbirini tutma özelliğinden kaynaklandığı şeklindedir. Kayma mukavemeti parametreleri, belirli bir zemin için sabit olmayıp, deney sırasında hakim olan yükleme ve drenaj koşullarına göre değişirler (Özaydın, 2000). Şekil 2.3a'da verilen grafik incelendiğinde farklı düşey gerilme altında yapılan deney sonuçlarına göre göçme anındaki Mohr dairelerinin teğeti çizildiğinde özellikle düşük normal gerilme seviyelerinde doğrusal olmayan bir eğri görülmektedir.




**Şekil 2.3 :** (a) Mohr daireleri ve meydana gelen göçme zarfları (b) Bu zarflara ait kayma mukavemeti açısının düşey gerilme ile değişimi (Bardet, 1997).

Düşey normal gerilmenin yüksek değerlerinde ise doğrusallık sözkonusudur. Şekil 2.3b'de ise aynı deneylere ait veriler bu kez her gerilme seviyesi için kayma mukavemetinin kohezyon teriminin hesaba katılmayıp sadece sürtünme bileşeni tarafından oluştuğu kabulu ile elde edilen kayma mukavemeti açılarının düşey gerilme ile değişimi verilmiştir. Bu kabule göre şekilde kayma mukavemeti açısının aslında sabit olmadığı düşey gerilme ile azaldığı anlaşılmaktadır.

#### 2.1.1.1 Efektif Şartlarda Kayma Mukavemeti

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

$$\tau = c' + (\sigma - u)tan\phi' = c' + \sigma' tan\phi' \qquad \textbf{(2.2)}$$

şeklinde ifade edilmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981). Bu eşitlikte, ($\sigma$-u=$\sigma'$) göçme düzlemine etkiyen efektif gerilmeyi, c′ ve $\phi'$ efektif gerilmeler cinsinden kayma mukavemeti parametrelerini göstermektedir. Mohr gerilme dairelerini, toplam gerilmeler cinsi ile birlikte efektif gerilmeler cinsinden de çizmek mümkün olmaktadır. Şekil 2.4'te toplam ve efektif gerilme daireleri ve bu dairelere teğet olan göçme zarfları gösterilmiştir. Yükleme ve drenaj şartlarının kayma mukavemetini doğrudan etkileyen ana faktörlerden birisi olduğu bilinmektedir.

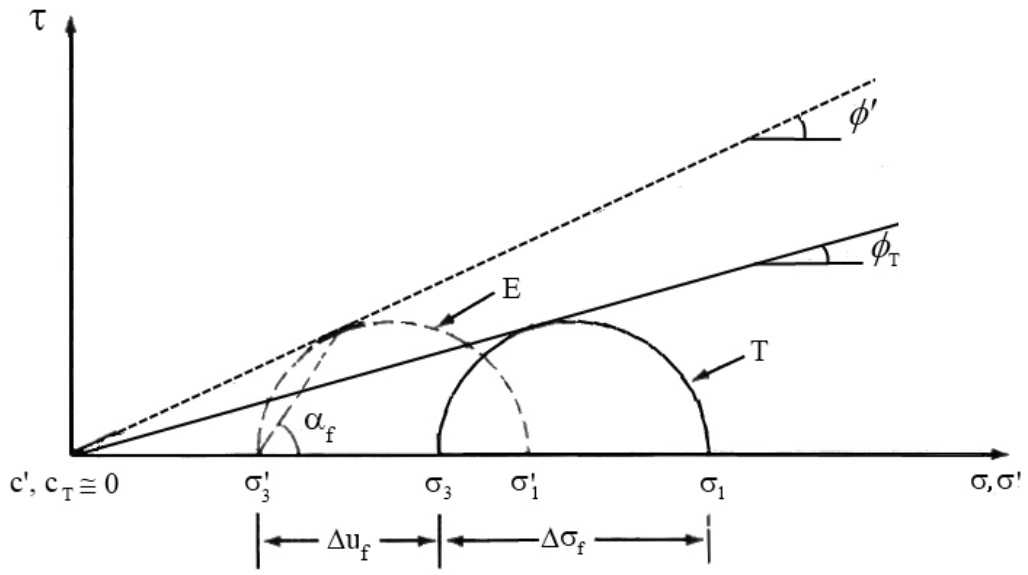
### 2.1.2 Tabii Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Kumlarda kohezyon (c) parametresi sıfır değerini aldığından kayma mukavemeti bağıntısı

$$\tau_f = \sigma \tan\phi \qquad \textbf{(2.3)}$$

şeklini almaktadır. Arazide statik yüklemeler altında kumlarda drenajlı koşulların geçerli olduğu kabul edilmektedir. Yükleme sırasında boşluk suyunun zeminden

drenajı, zemin içerisindeki boşlukların durumu ve permeabilitenin yüksek olması nedeniyle oldukça rahat gerçekleşmekte ve boşluk suyu basınçlarında herhangi bir değişiklik oluşturmamaktadır. Bu nedenle kumların arazi şartlarındaki davranışı incelenirken, drenajlı kayma mukavemeti açısının belirlenmesi yeterli olmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981).

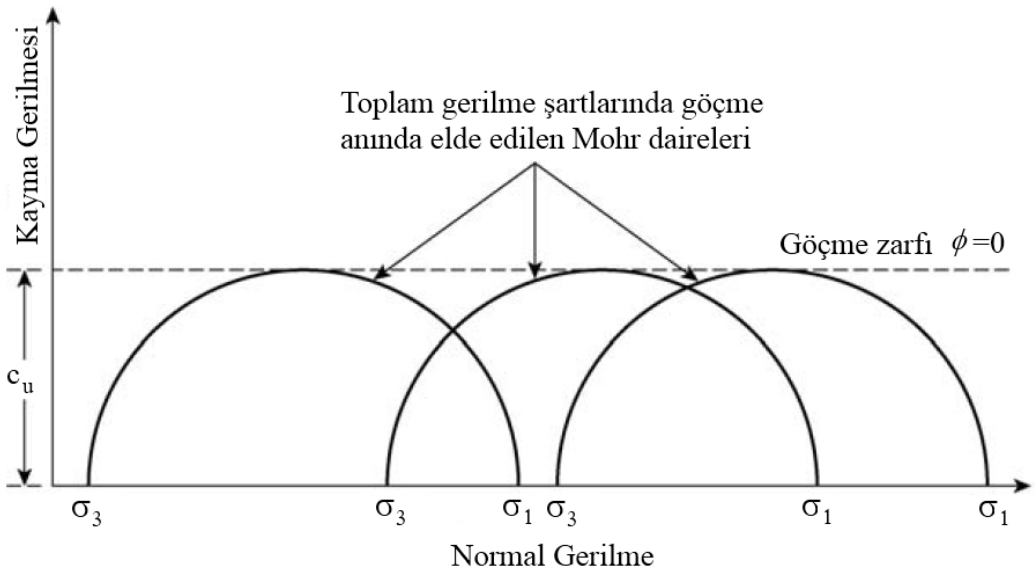



**Şekil 2.4 :** Göçme durumunu gösteren toplam ve efektif Mohr daireleri ve kırılma zarfları (Holtz ve Kovacs, 1981).

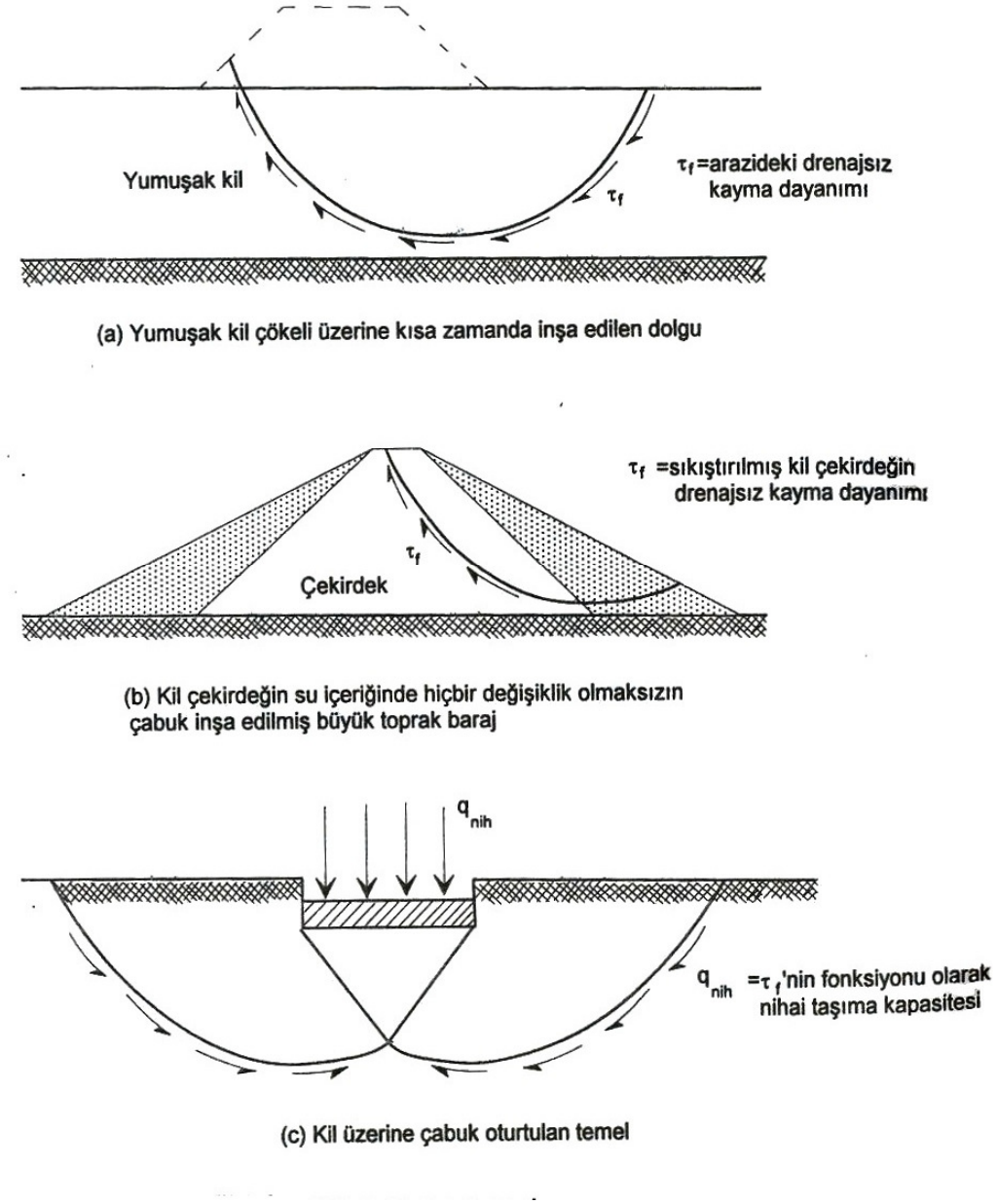
Suya doygun ince kum tabakalarının arazide deprem gibi dinamik yüklemelere maruz kalması durumunda yükleme çok hızlı olduğundan, zemin suyunun dışarı çıkmaya fırsat bulamaması nedeniyle boşluk suyu basınçlarında büyük artışlar meydana gelmektedir. Gevşek kumlarda boşluk suyu basınçlarının çevre basıncına eşit hale gelmesi durumunda kum tabakası mukavemetini tamamen kaybetmektedir. Geoteknik mühendisliğinde bu olay sıvılaşma olarak tanımlanmıştır (Özaydın, 2000). Kumlarda kayma mukavemeti açısı, kumun sıkılık derecesinden, dane çapı dağılımından, dane biçiminden ve danelerin mineral yapısından etkilenmektedir. Killerin kayma mukavemetinin arazide oluşacak koşullar altında belirlenmesi kumlara göre daha karışıktır. Arazide, bir kil tabakasının suya doygunluk derecesi, başlangıç gerilme durumu ile kayma gerilmelerinin oluşması sırasında geçerli yükleme ve drenaj koşulları zeminlerin kayma mukavemetini büyük ölçüde etkilemektedir. Killerde kayma mukavemeti parametrelerinin toplam ve efektif gerilmelere göre belirlenmesi tasarımların güvenli yapılabilmesi için önem taşımaktadır. Arazide hızlı yüklenecek killer için genellikle drenajsız kayma

mukavemeti parametrelerinin kullanıldığı toplam gerilme analizleri uygulanırken, yüklemenin yavaş olduğu durumlarda efektif kayma mukavemeti parametrelerinin kullanıldığı analizler yapılmalıdır.

Zeminlerin kayma mukavemetinin drenaj ve yükleme şartlarından etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle arazide meydana gelecek şartların kayma mukavemetin belirleneceği deney sisteminde de sağlanması ve kayma mukavemeti parametrelerinin bu doğrultuda belirlenmesi önem arzetmektedir. Genel itibari ile kayma mukavemeti deneylerinde statik durumda üç farklı yükleme ve drenaj koşulları sağlanabilmektedir. Bunlar sırasıyla konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajsız (CU) ve konsolidasyonlu-drenajlı (CD) olarak sıralandırabilir. Suya doygun normal konsolide killerde yapılan mühendislik uygulamalarının tasarımlarında kil tabakasının dayanımını modellemek üzere konsolidasyonsuz ve drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmaktadır. Bu koşullarda yapılan deneylerde normal konsolide killerde kayma mukavemeti zarfının Şekil 2.5'te gösterildiği gibi sadece kohezyon bileşeninden meydana geldiği ve kayma mukavemeti açının "0" olduğu kabul edilmektedir ($\tau=c_u$). Konsolidasyonsuz ve drenajsız şartlarda elde edilen kohezyon değerine drenajsız kayma mukavemeti adı verilir. Kayma mukavemeti parametrelerinin konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşullarda elde edildiği mühendislik uygulamaları Şekil 2.6'da verilmiştir.




**Şekil 2.5 :** Konsolidasyonsuz ve drenajsız koşullarda elde edilen Mohr daireleri ve elde edilen kırılma zarfları.

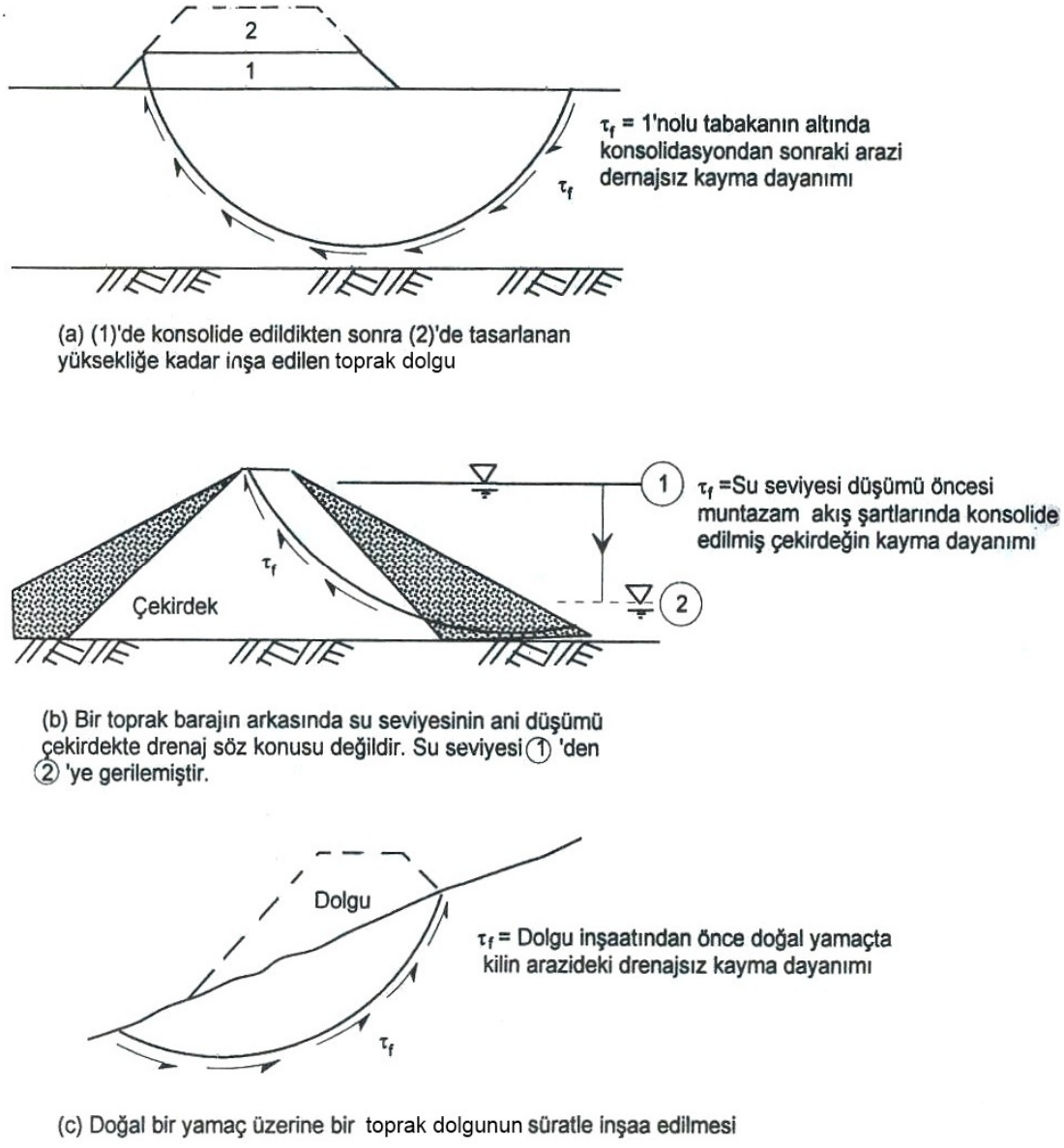



**Şekil 2.6 :** Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşullarda yapılan deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin uygulamada geçerli olduğu durumlar (Holtz ve Kovacs, 1981).

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşulların geçerli olduğu durumlar drenajın meydana gelemediği zeminde konsolidasyon tamamlanmadan hızlı yüklemenin uygulandığı durumlardır.

Bunun yanında zeminlerin kayma mukavemetinin belirlendiği bir diğer durum konsolidasyonlu drenajsız (CU) koşullardır. Şekil 2.7'de konsolidasyonlu drenajlı koşulların geçerli olduğu uygulamalar verilmiştir. Bu uygulamalar irdelendiği taktirde zeminin konsolidasyonunun tamamlandığı ancak yüklemenin drenajın

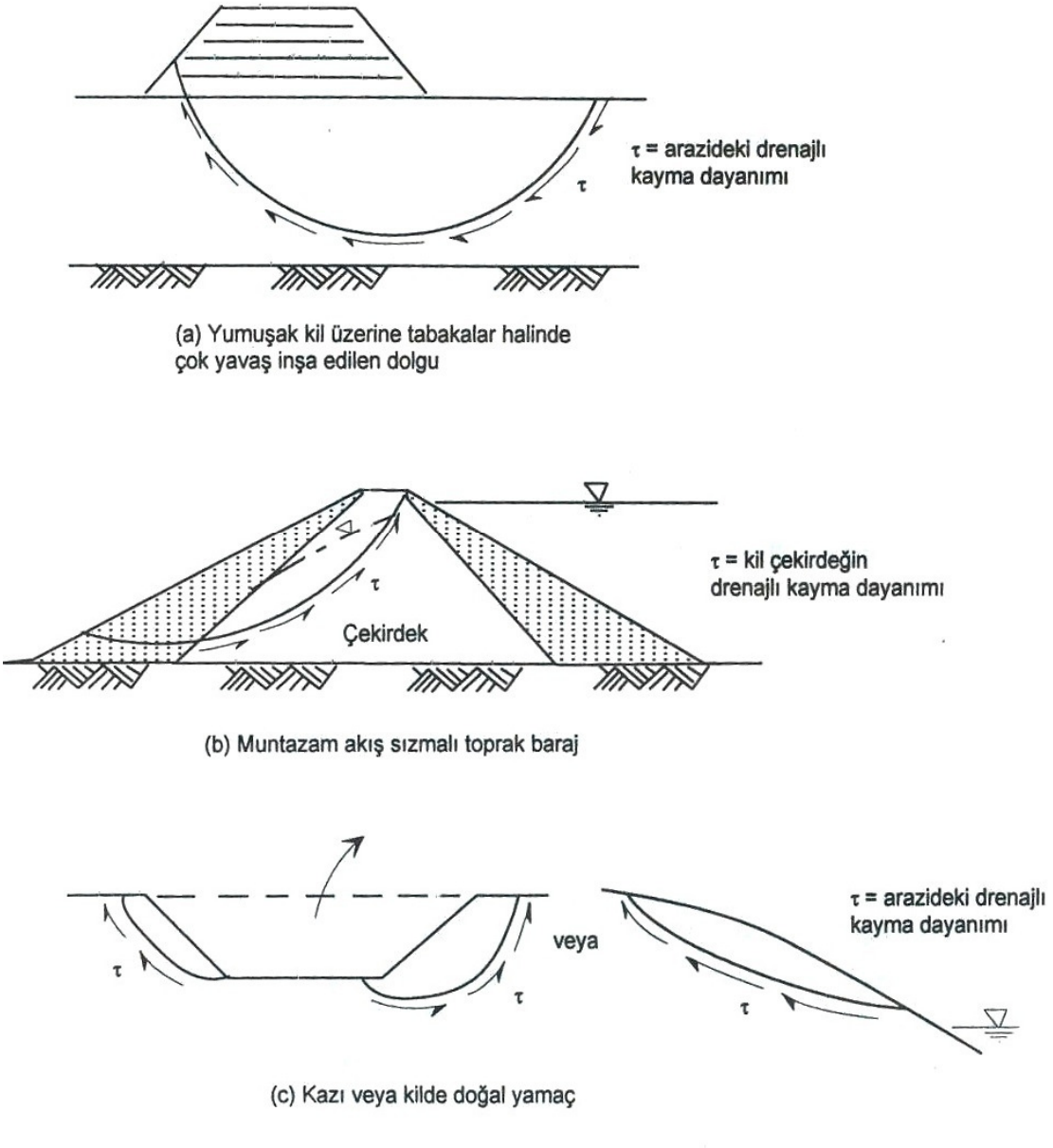
gerçekleşmesine yetecek kadar yavaş olmadığı durumlardır. Bu koşullarda yapılan deneylerde boşluk suyu basıncı ölçülebildiğinden dolayı hem toplam hemde efektif şartlar için kayma mukavemeti parametreleri belirlenebilmektedir.




**Şekil 2.7 :** Konsolidasyonlu-drenajsız (CU) şartlarda yapılan deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin uygulamada kullanıldığı durumlar (Holtz ve Kovacs, 1981).

Kayma mukavemeti parametreleri için konsolidasyonlu drenajlı koşulların geçerli olduğu durumlar ise Şekil 2.8'de verilmiştir. Konsolidasyonlu ve drenajlı (CD) koşullarda yapılan deneylerde drenajın meydana gelebilmesi için zeminlerde artık boşluk suyu basıncı oluşmaması gerektiğinden yükleme hızı diğer yükleme

koşullarına göre oldukça yavaş değerler almaktadır. Artık boşluk suyu basıncı oluşmadığından bu koşullarda yapılan deneyler sonucunda toplam gerilme ile efektif gerilmelere göre elde edilen kayma mukavemeti zarfları aynı olmaktadır.




**Şekil 2.8 :** Konsolidasyonlu-drenajlı (CD) şartlarda yapılan deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin uygulamada kullanıldığı durumlar (Holtz ve Kovacs, 1981).

Sonuç olarak mühendislik uygulamalarında yapılacak analizlerde kullanılacak olan zeminin kayma mukavemeti parametreleri için uygun deney yönteminin seçilmesi tasarım açısından büyük önem taşımaktadır.

Zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışının ve kayma mukavemetinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için deney koşulları ile doğal koşulların olabildiğince benzer olması gerekmektedir. Kayma mukavemeti, zeminin arazide yüklenmeden önce yerindeki başlangıç durumunu yansıtan konsolidasyon basıncı, boşluk oranı, su muhtevası, suya doygunluk derecesi, arazide yükleme türü ile hızından ve drenaj koşullarından etkilenmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981).

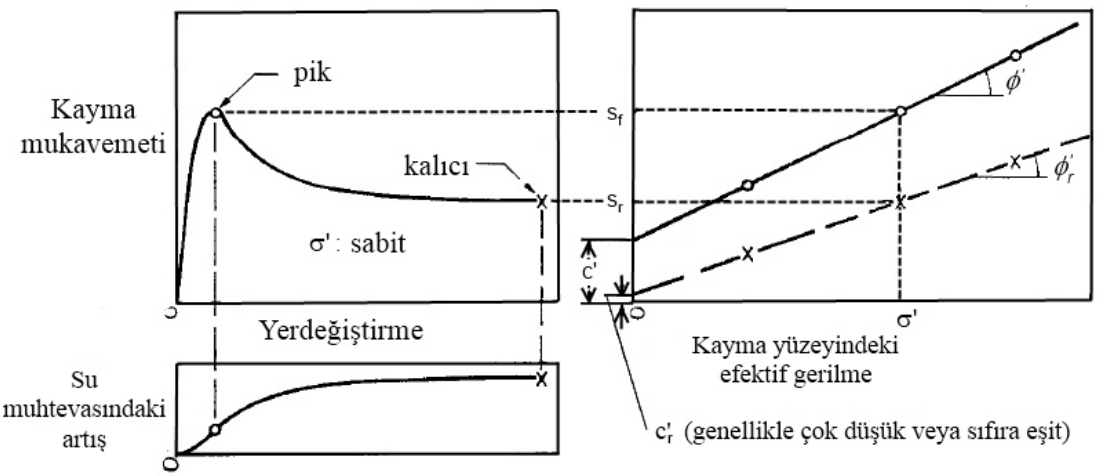
Uygulamada birbirinden farklı koşullar ile karşılaşılması nedeniyle, zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan birçok laboratuvar ve arazi deney yöntemleri geliştirilmiştir. Örselenmemiş numune almanın zor olduğu kumlu zeminlerde ve yumuşak killerde genellikle arazi deney sonuçlarından yararlanılmaktadır. Killi zeminlerin drenajsız kayma mukavemetleri ile arazi deneylerinde yapılan ölçüm sonuçları arasında geliştirilmiş çeşitli korelasyonlar bulunmaktadır. Kayma mukavemetini belirlemek amacıyla yapılan arazi deneylerinin başlıcaları; Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Arazi Veyn deneyidir.

Zeminlerin kayma mukavemetlerini belirlemek için kullanılan laboratuvar deney yöntemlerinden en yaygın olanları kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve üç eksenli basınç deneyidir. Basit kesme, halka kesme ve laboratuvar veyn deneyi ise diğer yöntemlerdir.

### 2.1.3 Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemeti

Kalıcı kayma mukavemeti en kısa ifade ile yüksek deformasyon seviyelerinde erişilen en düşük ve sabit mukavemet değeri olarak tanımlanabilir. Bilindiği gibi kesme sırasında zeminlerin kayma gerilmesi Şekil 2.9'da görüldüğü gibi önce göçme anına kadar içi boş yuvarlakla gösterilen pik bir değere ($s_f$) yükselmekte ve göçmeden sonra ise artan deformasyonla birlikte azalamaya başlamakta, belli bir yerdeğiştirme sonucunda ise x ile gösterilen noktanın karşılığı sabit bir değere ($s_r$) yaklaşmaktadır. Farklı düşey gerilmelerinde yapılan deneylerden elde edilen pik gerilmelere göre çizilen mukavemet zarfı c′ve $\phi'$ parametreleri ile tanımlanırken kalıcı kayma gerilmelerine göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti zarfı ise $c'_r$ ve $\phi'_r$ parametreleri ile tanımlanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde kalıcı kayma mukavemeti olarak tanımlanan bu değer özellikle daha önceden kaymış şevlerin stabilite tahkiklerinde olmak üzere çeşitli alanlarda mukavemet parametresi

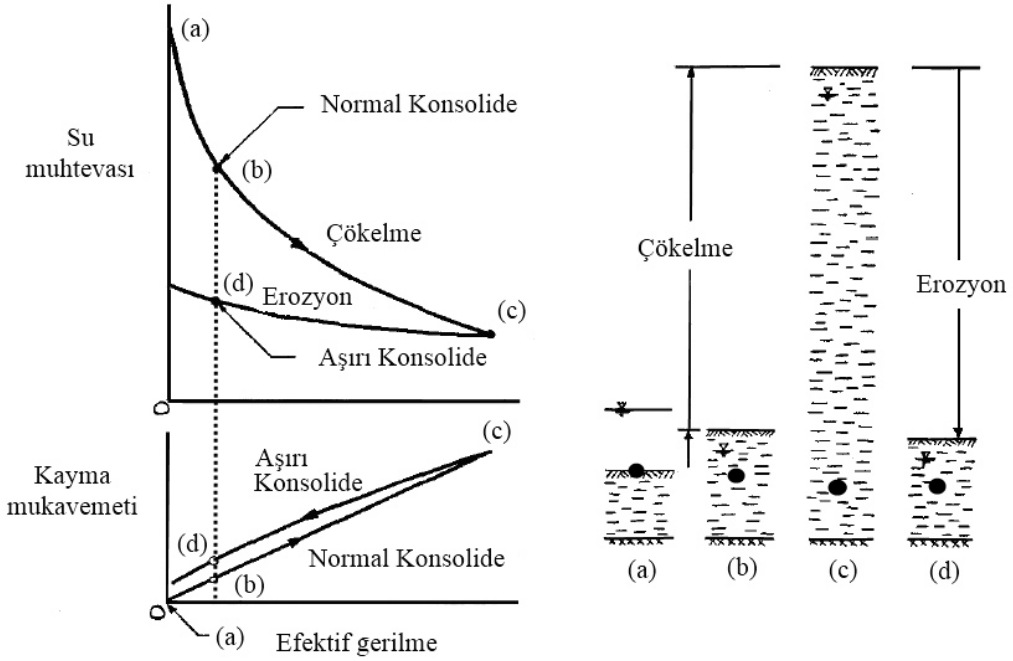
anlamında kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi yükleme boyunca zeminin su muhtevasında bir artış meydana gelmekte artan yerdeğiştirme ile birlikte su muhtevasıda sabit bir değere yaklaşmaktadır.




**Şekil 2.9 :** Sabit düşey gerilme altında gerilme-şekil değiştirme grafiği, elde edilen pik ve kalıcı mukavemet zarfları, su muhtevasının yerdeğiştirme ile değişimi (Skempton, 1964).

Zeminlerin konsolidasyon durumunun kayma mukavemetine doğrudan etki ettiği bilinmektedir. Şekil 2.10'da aşırı konsolide bir zemin numunesinin konsolidasyon süreci gösterilmektedir. Efektif gerilmenin 0 olduğu örneğin deniz dibindeki bir zeminin (a) çeşitli yollarla üzerine gelen zemin tabakaları nedeni ile çökelmeye başlamaktadır (b). Zamanla zemin üzerindeki çökelen tabaka kalınlığının artması dolayısıyla düşey efektif gerilmenin artması (c) ile gösterilen durumda numunedeki maksimum düşey gerilemeye çıkılmıştır. Bu gerilme altında konsolidasyonun tamamlanması ile birlikte görüldüğü gibi çökelme sürecinde efektif normal gerilmenin artışı ile su muhtevası azalmakta, kayma mukavemeti ise artmaktadır. Daha sonra (d) ile gösterilen durum erozyon gibi bir sebeple zemin üzerindeki düşey efektif gerilmenin düşmesi nedeniyle gerilme boşalması sonucunda boşluk oranı ve su muhtevasınında bir artış meydana gelmektedir. Düşey gerilmenin azalması ile birlikte kayma mukavemeti de düşmektedir. Ancak (b)'deki durumla aynı düşey efektif gerilme altında konsolide olsalar da (d) durumunda (b)'den daha yüksek bir kayma mukavemeti değeri gözlenmektedir. Zemin üzerindeki efektif normal gerilmenin azalması sonrasında zeminde bir ferahlama meydana gelmekte ancak elastik malzemelerde oluşan eski durumuna geri dönüş meydana gelmemektedir. Bu

nedenle aşırı konsolide durumunda zemin normal konsolide koşullara göre daha yüksek kayma mukavemeti parametreleri elde edilmektedir.

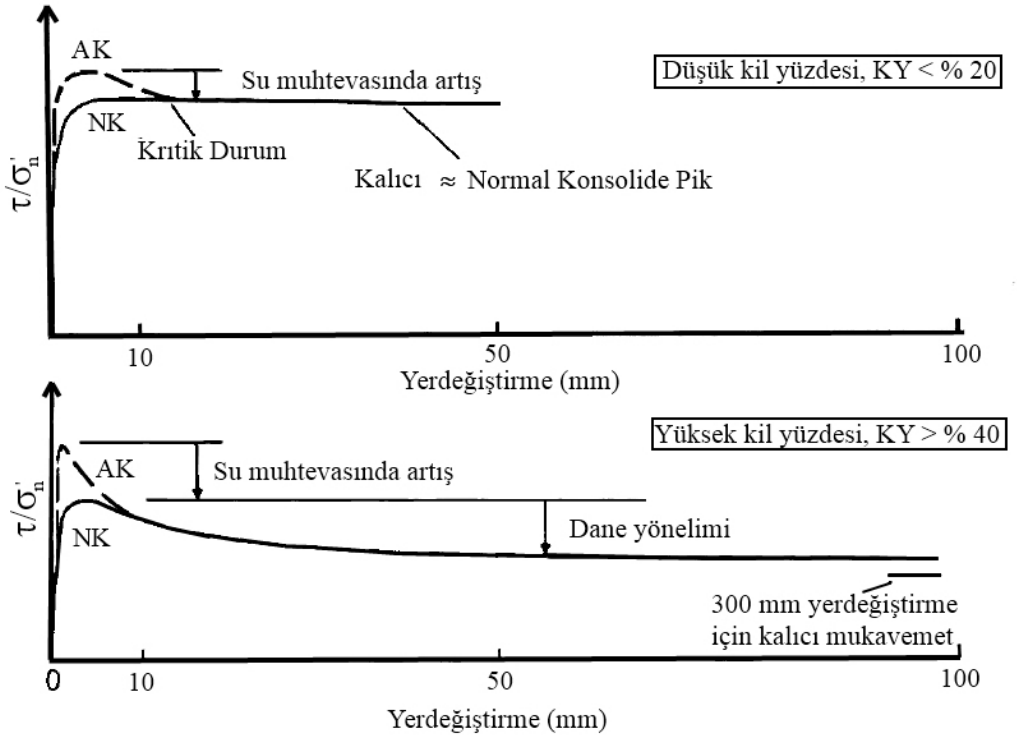



**Şekil 2.10 :** Aşırı konsolidasyonun oluşma süreci (Skempton, 1964).

Aşırı konsolide killerin drenajlı şartlarda pik mukavemet sonrası kayma mukavemeti artan yerdeğiştirme ile birlikte kil yüzdesine bağlı olarak iki kademeden meydana gelmektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi kil yüzdesine bağlı olarak önce göreceli olarak düşük deformasyon seviyelerinde tamamen yumuşamış veya kritik durum olarak tariflenen değere düşen mukavemet, dilatasyon nedeni ile su muhtevasında artışa sebep olmaktadır. Daha sonra ise büyük deformasyonlar sonucunda mukavemet kalıcı bir değere düşerek sabit hale gelmektedir. Bu aşamada özellikle yapraksı kil mineralleri kayma düzlemi ile paralel hale gelmekte ve dane yönelimi adı verilen olay gerçekleşmektedir. Kil minerallerinin dane şeklinin plaka şeklinde olması artan yerdeğiştirme ile birlikte kil daneciklerinin birbirlerine paralel hale gelmesine sebep olmakta dolayısı ile oluşan kayma gerilmelerinin sadece paralelleşen kil daneciklerinin birbirine sürtünmesinden kaynaklanmaktadır (Skempton, 1964).

Normal konsolide killerde ise pik mukavemet sonrası düşüş sadece dane yönelimi nedeni ile meydana gelmektedir. Bu nedenle mukavemet davranışında kademeli bir düşüş söz konusu olmamaktadır. Sonuç olarak kalıcı kayma mukavemeti genellikle ilk defa harekete geçecek şevlerde, göçmemiş kil tabakalarında ve kil dolgularda

kullanılmaz, aksine daha önce harekete geçmiş ve tekrar hareketlenen şev kaymalarında, kayma yüzeylerinde veya kayma yüzeyine yakın bölgelerde, yapraklanma düzlemleri üzerindeki hareketlerde ve göçmenin meydana geldiği dolgularda stabilite tahkiklerinde kullanılmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin göçmenin olmadığı kil tabakalarında kullanılması her ne kadar güvenli tarafta kalınsa da ekonomik açıdan çok doğru olmayacaktır.




**Şekil 2.11 :** Farklı kil yüzdeleri için sabit düşey gerilme altında gerilme-şekil değiştirme grafikleri (Skempton, 1985).

Aşırı konsolide killerde meydana gelen dane yönelimi özellikle kil yüzdesinin %20~25'ten fazla olduğu durumlarda ve yapraksı kil minerallerine sahip zeminlerde meydana gelmektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi kil yüzdesi düşük siltli ve kumlu killerde ise normal konsolide killerde görülen pik mukavemet sonrası düşüş sadece su muhtevası artışından kaynaklanmaktadır.

Skempton (1964) tarafından ifade edildiği üzere aşırı konsolide Londra kilinden alınan numunelerde kayma yüzeyinde su muhtevası % 34 iken kayma yüzeyi dışındaki kesimlerde % 30 civarında su muhtevaları belirlenmiştir. Aynı durum Skemton (1985)'te verilen vaka analizinde de görülmektedir. Kalabagh Barajı ile ilgili olarak tektonik olarak harekete geçmiş ve % 60 kil yüzdesine sahip kil

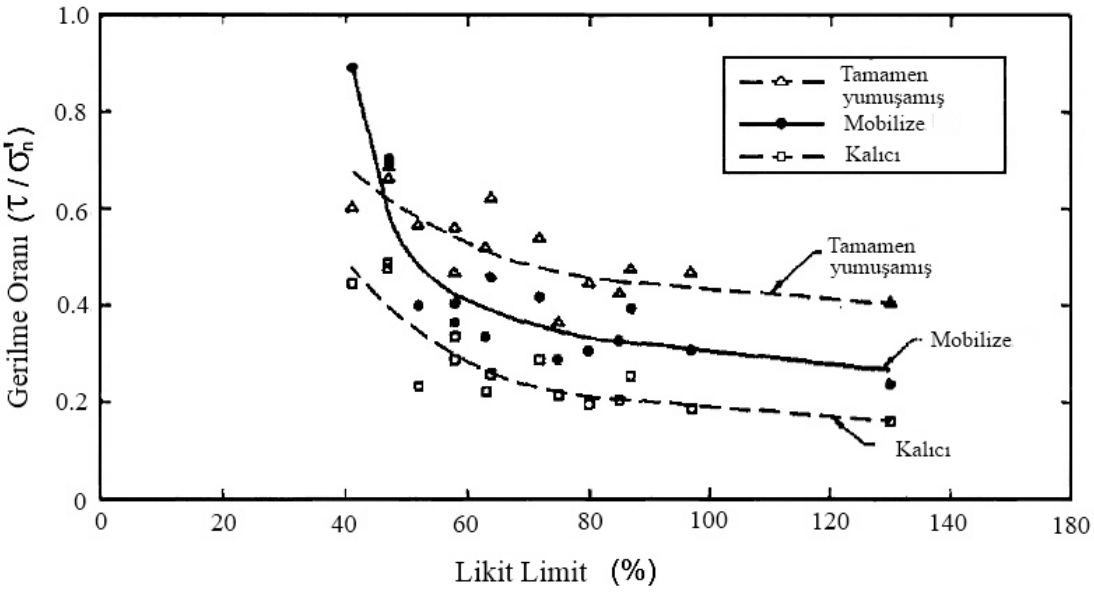
tabakasında kayma yüzeyinde su muhtevası % 23 iken kayma yüzeyi dışındaki bölgelerde % 15 civarında bir su muhtevası belirlenmiştir.

Aşırı konsolide killerde pik mukavemete normal konsolide killere nazaran daha düşük deformasyon seviyelerinde erişilmektedir. Göçme sonrası kayma mukavemetinin ani düşüşü ve su muhtevasında artışla birkte aşırı konsolide ve normal konsolide killerin yerdeğiştirmeye bağlı kayma mukavemeti değişimi benzer bir yol izlemektedir. Kritik durum olarak adı verilen bu aşamada Petley (1966)'ya göre sadece su muhtevasındaki artış nedeni ile kritik durum değerine azalan mukavemetteki değişim genellikle 10 mm'den daha az olmak kaydıyla ortalama olarak 5 mm'lik bir yerdeğiştirme sonrasında oluşmaktadır. Numune tipine bağlı olarak kalıcı kayma mukavemeti için ise normal şartlarda gereken yerdeğiştirme için 100 mm civarındadır. Yüksek plastisiteli, aşırı konsolidasyon oranı ve kil yüzdesi yüksek killi zeminlerde aynı yerdeğiştirme 500 mm değerine çıkabilmektedir. Bu şartlarda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı "$\phi_r$" olarak tanımlanırsa, kritik duruma karşılık gelen kayma gerilmeleri kullanılarak çizilen mukavemet zarfı için "$\phi_r$+1" kayma mukavemeti açısının elde edilmesi için gereken yerdeğiştirme miktarları kalıcı şartlar için gereken yerdeğiştirmelerin % 20~50'si arasında değişmektedir (Lupini, 1980).

Yüksek düşey gerilme seviyelerinde ise dane yöneliminin daha erken ve daha düşük yerdeğiştirme değerlerinde gerçekleşmesi beklenmektedir (Skempton, 1985). Skempton (1964) ve Skempton (1977)'de aşırı konsolide bir kilde fisür meydana geldiğinde fisür yüzeyinde kayma mukavemetinin kohezyon teriminin kaybolduğu ifade edilmektedir. Kayma mukavemetinde meydana gelen bu düşüşün fisür civarındaki su muhtevası artışından kaynaklandığı ancak "0" deformasyon nedeni ile dane yöneliminden söz edilemeyeceği ifade edilmektedir. Bu durum "kritik durum" veya bir başka ifade ile "tamamen yumuşamış" şeklinde tanımlanan durumla benzerlik taşımaktadır. Daha öncede ifade edildiği gibi göçme sonrası kritik durumdaki aşırı konsolide bir kilin mukavemeti aynı kilin aynı düşey gerilmedeki normal konsolide halinin pik mukavemetine yaklaşık olarak eşittir (Stark ve Eid, 1997).

Şekil 2.12'de Stark ve Eid (1997) tarafından vaka analizlerine dayalı olarak verilmiş olan ve $\tau/\sigma'_n$ şeklinde tanımlanan gerilme oranının likit limite göre değişimleri görülmektedir. Grafikte tamamen yumuşamış olarak ifade edilen gerilme oranları

göçme sonrasında dane yöneliminin henüz gerçekleşmediği durumda elde edilmiş değeri, kalıcı olarak verilen değerler ise büyük yerdeğiştirmeler sonrasında elde edilmiş ve dane yöneliminin tam olarak sağlandığı deney sonuçlarıdır. Mobilize şeklinde verilen değerler ise vaka analizlerinde geri analiz yöntemi ile gerçek durumda zemin tabakalarındaki gerilme oranlarını vermektedir.

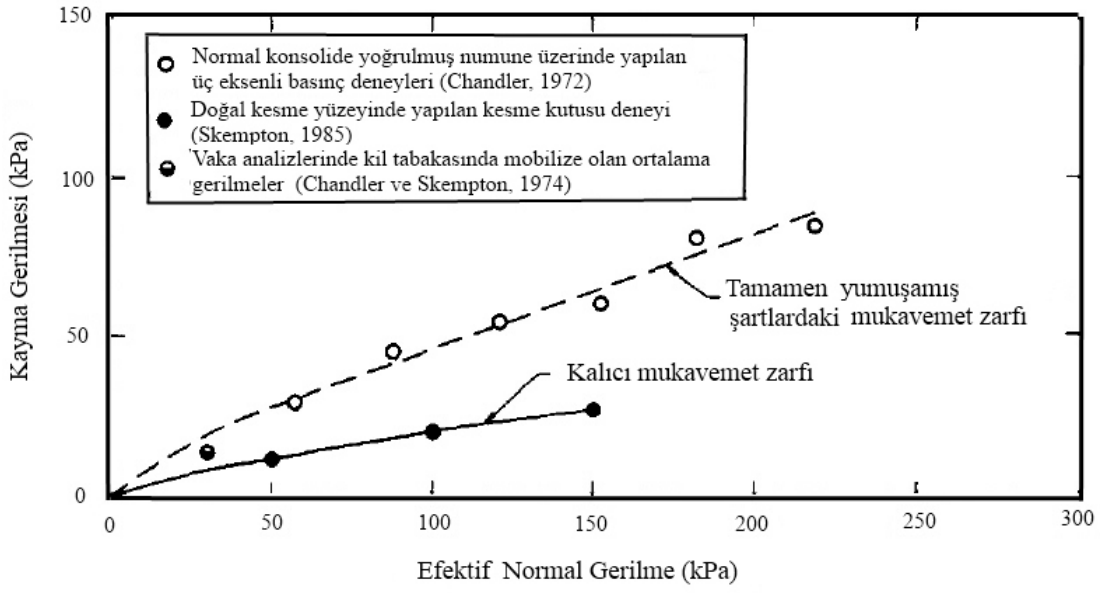



**Şekil 2.12 :** Vaka analizlerinden elde edilen kalıcı şartlarda, tamamıyla yumuşamış şartlarda ve mobilize olmuş gerilme oranlarının karşılaştırması (Stark ve Eid, 1997).

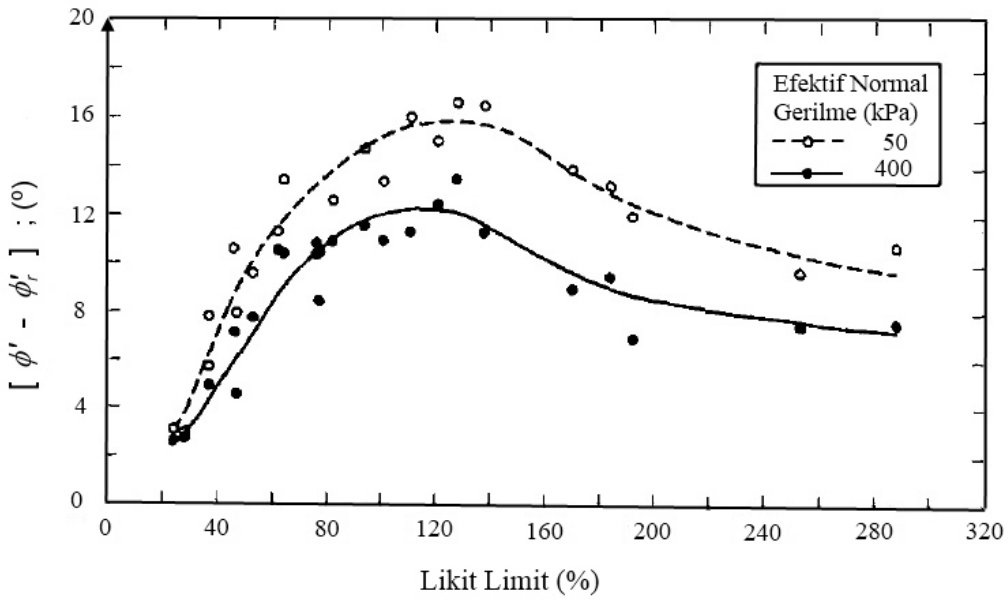
Görüldüğü üzere pratikte zemin tabakalarında meydana gelen kaymalarda, kayma yüzeyinde mobilize olan kayma gerilmeleri ne tamamiyle yumuşamış şartlardaki değerlere ne de kalıcı şartlardaki değerlere yakındır. Bu iki değer arasında bir değer almaktadır. Bu durum halka kesme deneyinden elde edilen kayma mukavemeti değerlerinin arazi şartlarına göre biraz daha düşük kalmasının da sebebi olarak görülmektedir. Aynı yayında yoğrulmuş normal konsolide killer üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyleri sonucunda elde edilmiş tamamen yumuşamış durumdaki mukavemet zarfı ile tekrarlı kesme kutusu deneyi ile elde edilmiş kalıcı şartlardaki mukavemet zarfı da verilmiştir (Şekil 2.13). Aynı durum bu grafikte de görülmektedir. Vaka analizinden elde edilen zemin tabakalarının ortalama kayma gerilmesi değeri yine bu iki zarf arasında kalmaktadır.

Stark ve Eid (1997) tarafından verilen bir diğer grafikte (Şekil 2.14) ise iki farklı düşey gerilme altında yapılan deney sonuçlarına göre tamamıyla yumuşamış

şartlardaki kayma mukavemeti açısı ile kalıcı kayma mukavemeti açısı farkı likit limite bağlı olarak verilmektedir.




**Şekil 2.13 :** Kalıcı şartlardaki ve tamamen yumuşamış şartlardaki mukavemet zarflarının vaka analizlerindeki mobilize olmuş ortalama gerilmelerle karşılaştırılması (Stark ve Eid, 1997).




**Şekil 2.14 :** Kalıcı şartlar ile tamamen yumuşamış şartlarda elde edilen kayma mukavemeti açıları farkının likit limit ile değişimi (Stark ve Eid, 1997).

Şekilde görüldüğü gibi likit limitin yaklaşık % 120 değeri civarında optimum bir değer olarak en büyük kayma mukavemeti açıları farkı meydana gelmekte likit

limitin artışı ile birlikte bu fark azalmaktadır. Likit limitin % 120'den küçük değerlerinde ise likit limit azaldıkça bu farktaki düşüş daha hızlıdır.

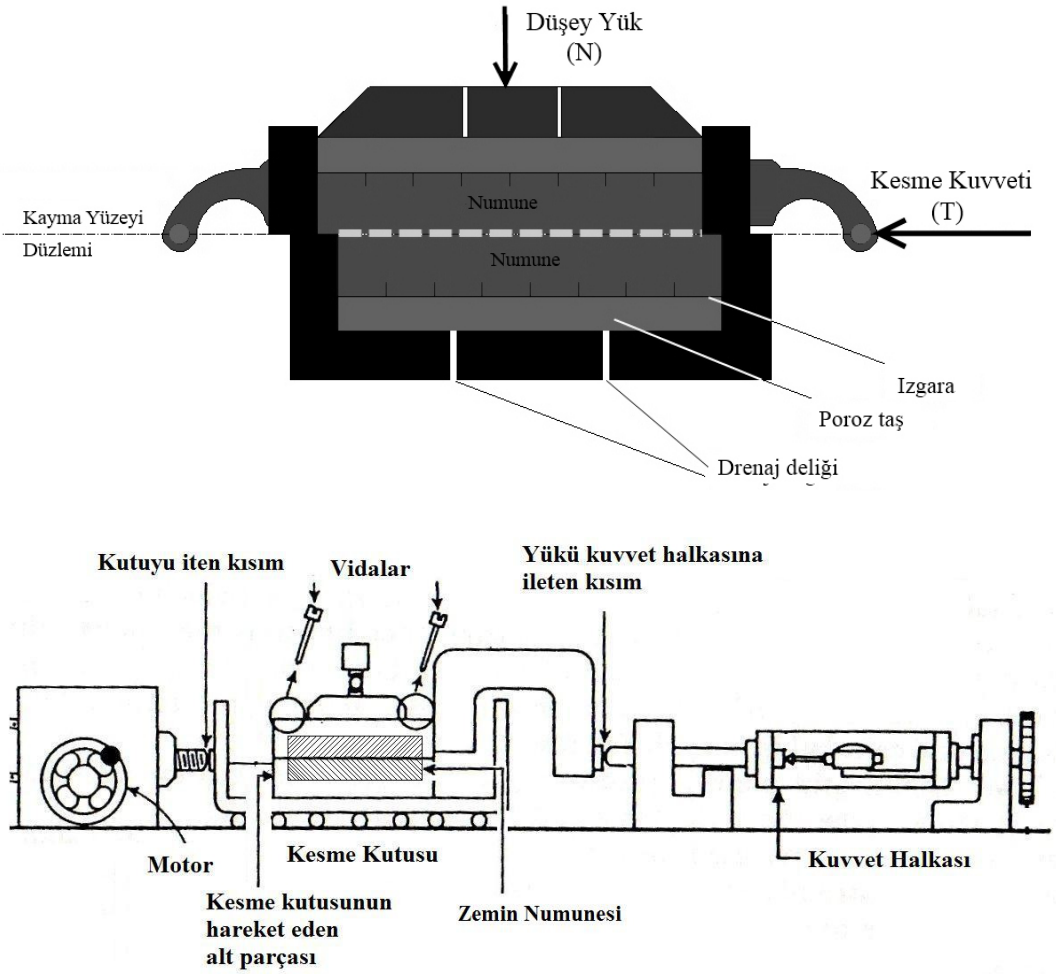
Skempton (1977)'de bazı geçmiş vaka analizlerine dayanarak harekete geçmiş bir şevdeki mukavemet için ancak 1 ila 2 m civarında bir yerdeğiştirme gerçekleştiği takdirde kayma yüzeyinde kalıcı kayma mukavemetinden söz edilebileceği vurgulanmaktadır. Doğal şevli bir arazideki yükleme ve drenaj şartları incelendiğinde drenajlı ve konsolidasyonlu şartları modelleyen uzun süreli stabilite şartlarından söz edilmelidir. Ancak bu durum herhangi bir kazı nedeniyle bozulduğu takdirde oluşan artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ile aylar hatta zemin tipinin permeabilitesine bağlı olarak yıllar sonra tekrar eski durumuna gelebilmektedir.

## 2.2 Kalıcı Kayma Mukavemetini Belirleme Yöntemleri

Laboratuvar şartlarında kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesine yönelik olarak üç deney sistemi öne çıkmaktadır. Bunlar sırasıyla tekrarlı kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve üç eksenli basınç deneyidir. Bu üç deney sisteminin birbirlerine karşı üstünlükleri ve sınırlamaları bulunmaktadır. Geoteknik uygulamalarında kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde en sık tekrarlı kesme kutusu kullanılırken, arazi şartlarını modellemesi açısından en uygun deney halka kesme deneyidir. Bu bölümde kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılan halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi ve üç eksenli basınç deneyi hakkında bilgi verilmiştir.

### 2.2.1 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi

Zemin mekaniği laboratuvar deneyleri içerisinde kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan kesme kutusu deneyi en eski ve en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Zemin numunesi kare veya daire kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içerisine yerleştirilip sabit düşey yük altında konsolide edildikten sonra uygulanan sabit bir kesme hızı altında kutunun üst parçası sabit dururken alt parçası yatay düzlemde hareket ederek numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca kesilmesine ya da diğer bir değişle kaymasına zorlanmaktadır (Şekil 2.15).




**Şekil 2.15 :** Kesme kutusu deney aletinin kesiti (Önalp, 2007; Ürkmez, 2010).

Bu işlem tercihen en az 3 farklı sabit düşey gerilme altında yapılarak farklı düşey gerilmelere ait kayma gerilmelerinin $\sigma$ - $\tau$ düzleminde işlenmesi ile kayma mukavemeti zarfı elde edilmektedir. Kesme kutusu deneyinde numuneyi kesme hızı zeminin arazideki drenaj şartlarına göre seçilir. Yüksek geçirimliliğe sahip olan kum ve çakıl gibi iri daneli zeminlerde drenajın sağlanmasıyla boşluk suyu basınçlarının sönümleneceği kabul edilmektedir. Düşük permeabiliteye sahip olan kil ve silt gibi zeminlerde ise kısa zamanlı stabilite analizlerinde toplam gerilmelere göre, uzun zamanlı stabilite analizlerinde ise drenajın sağlanacağı kabul edilerek efektif gerilmelere göre çalışılmalıdır (Mitchell, 1993).

Zeminlerde göçme, kayma gerilmesi ile kayma deformasyonu arasındaki ilişkide kayma gerilmesinin sabit kalıp deformasyonların hızla arttığı veya kayma gerilmesinin eriştiği bir tepe noktası sonrası hızla düştüğü durumlar olarak tanımlanabilir. Zeminin sünekliği ve gevrekliği bu anlamda davranış özelliklerini belirlemekte; akma veya gevrek kırılma olarak göçme meydana gelmektedir.

Çoğunlukla numunenin zemin sınıfı, su muhtevası ve fiziksel özelliklerine bağlı olmak kaydıyla akma ve kırılma düşük deformasyon seviyelerinde meydana gelmektedir. Bu duruma ek olarak zemin mekaniğinde genel bir yaklaşım olarak numune boyunun % 20'si civarında yerdeğiştirme veya deformasyona ulaşıldığında, zemin henüz göçmemişte olsa bile göçmenin gerçekleştiği kabul edilmektedir (Head, 2006).

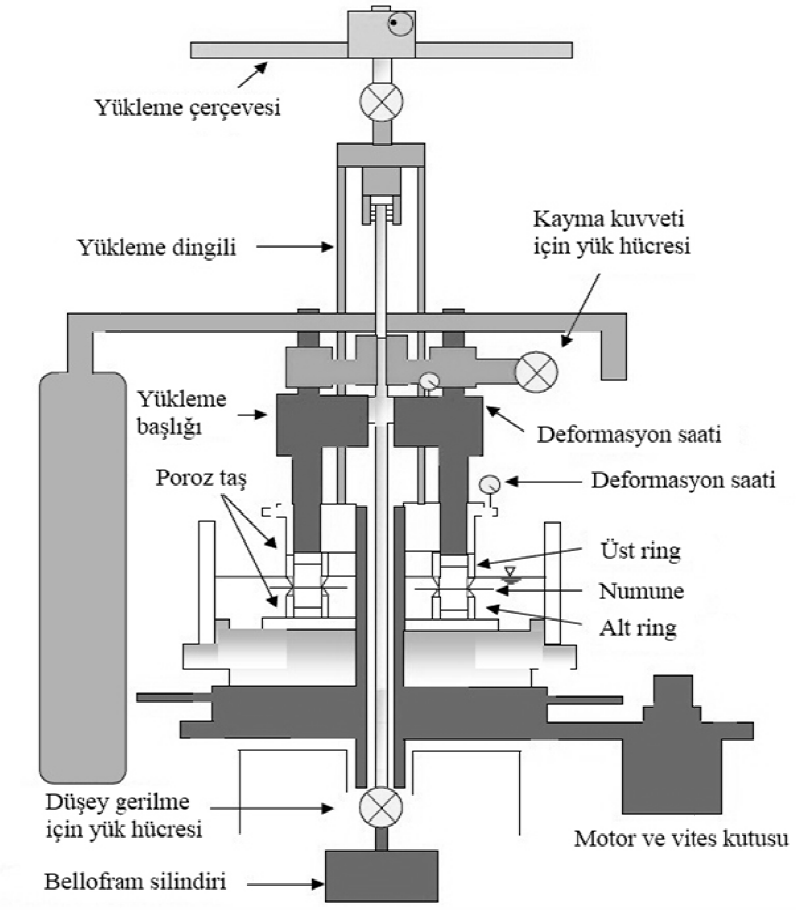
Tekrarlı kesme kutusu deneyinde direk kesme kutusu deneyinden farklı olarak numunede kalıcı mukavemete erişilmesi için gereken deformasyon seviyelerine erişebilmek amacıyla, kesme işlemi sonrasında oluşmuş kayma yüzeyinin tekrar tekrar kesilmesi ile kalıcı kayma mukavemeti değeri belirlenmektedir. 6 cm x 6 cm numune boyutlarına sahip kesme kutusu deneyi düzeneklerinde genellikle standart olarak 12 mm yerdeğiştirmeye müsaade edilmektedir. Kesilmiş yüzeyin tekrar başa geri çekilmesi ve aynı yüzeyin birkaç tekrar halinde kesilmesi ile kalıcı kayma parametreleri için gerekli yerdeğiştirme seviyelerine ulaşıldığı kabul edilmektedir. Yerdeğiştirme miktarının artışı ile beraber kayma gerilmesinin sabitleşmesi görülene kadar işlemin tekrar edilmesi gerekmektedir. Uygulamada pratik amaçlar doğrultusunda 3 – 4 tekrar sonucunda kalıcı mukavemete erişildiği kabul edilmektedir. Tekrarlı kesme kutusu deneyinin normal kesme kutusundan diğer bir farkı da kesme hızıdır. Kalıcı kayma mukavemetine erişilmesi için drenajlı koşulların sağlanması amacıyla numunede artık boşluk suyu basınçlarının oluşmaması gerektiğinden oldukça düşük kesme hızları kullanılmaktadır.

Kesme kutusu deneyinin bazı sınırlayıcı yanları bulunmaktadır. Zemin numunesi hangi hızla kesilirse kesilsin drenaj şartları tam olarak belirlenememekte ve kontrol edilememektedir. Bunun yanı sıra kesme kutusu deneyinde boşluk suyu basıncı da ölçülememektedir. Göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması da kesme kutusu deneyinin sakıncalarından biridir. Kesme kutusunun diğer bir sakıncası ise kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmamasıdır. Bunun nedeni de numune sınırlarında oldukça fazla gerilme yığılmalarının oluşmasıdır. Kesme işlemi sırasında zorlanan kayma yüzeyinin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmama ihtimali kesme kutusu deneyinin diğer bir sakıncalı yanıdır. Deney sırasında deformasyona bağlı olarak kesme yüzeyinin kesit alanının sabit olmaması ve tekrarlar nedeniyle numunenin geri çekilmesi esnasında kayma yüzeyinin yapısının bozulması bu dezavantajlara ek

olarak sayılabilir. Bütün bu sakıncalı yanlarına karşın tekrarlı kesme kutusu deneyi bilinen en eski ve günümüzde de kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde çok yaygın olarak kullanılan laboratuvar deney yöntemidir. Bunda deney sisteminin yaygın olması ve deney düzeneğinin basitliği önemli rol oynamaktadır (Head, 2006).

### 2.2.2 Halka Kesme Deneyi

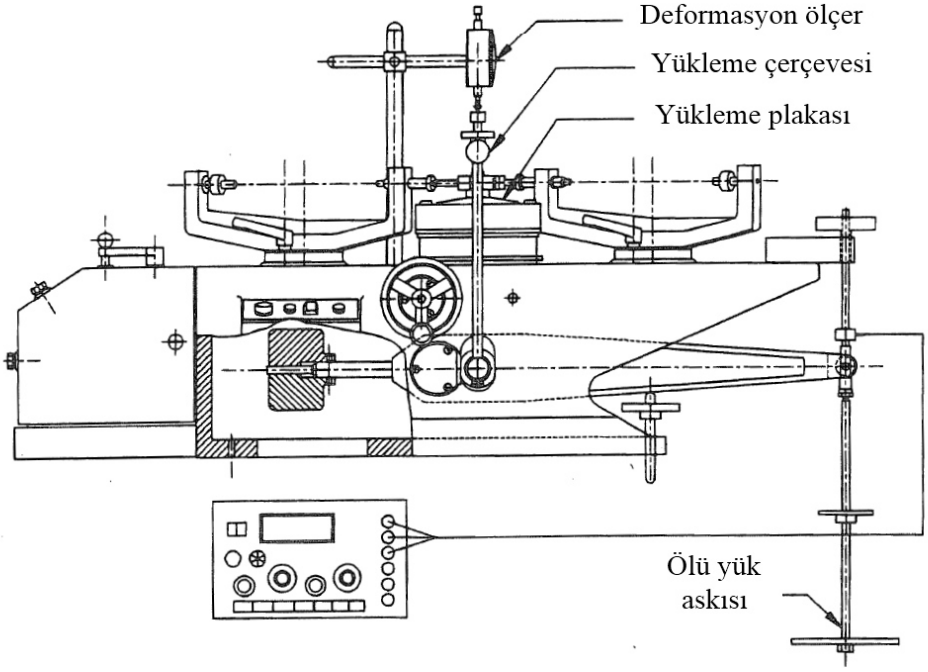
Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla günümüze kadar geliştirilen en uygun deney sistemlerinin başında halka kesme deney yöntemi gelmektedir. Diğer deney sistemlerine olan üstünlükleri nedeniyle daha doğru ve gerçekçi sonuçlar vermektedir. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda kullanılan başlıca iki tür halka kesme deney düzeneği bulunmaktadır. Bunlarda birincisi Şekil 2.16'da verilen ve "NGI-tipi" olarak adlandırılan A. W. Bishop ve Norveç Geoteknik Enstitüsü araştırmacıları tarafından ortak olarak geliştirilen deney düzeneğidir.




**Şekil 2.16 :** NGI-tipi halka kesme deney aleti (Suzuki, 2001).

NGI-tipi halka kesme deney düzeneğinin ayrıntıları Bishop ve diğ. (1971)'de verilmiştir. NGI-tipi halka kesme deney düzeneğinde düşey gerilme belofram

silindirine bağlı mile sabitlenen yükleme başlığı ile etkitilmektedir. Kayma gerilmesi tek yük hücresi ile ölçülmektedir. Deney sırasında düşey gerilme, kayma gerilmesi, çevre sürtünmesi, düşey deformasyon, yatay açısal yerdeğiştirme ve ringler arası mesafe ölçülmektedir. Diğer deney düzeneği ise Şekil 2.17'de verilen ve Amerika'da E.N. Bromhead tarafından geliştirilmiş olması sebebiyle Bromhead halka kesme deney olarak adlandırılan deney düzeneğidir.



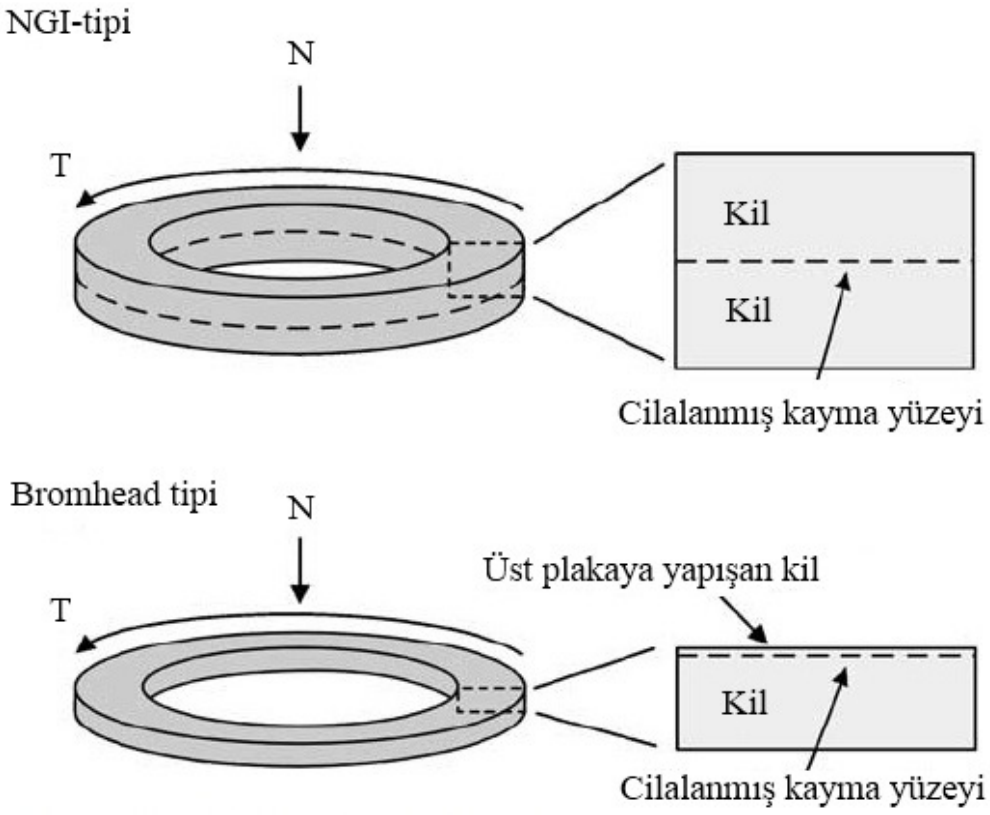



**Şekil 2.17 :** Bromhead tipi halka kesme aleti (Stark ve Conteras, 1996; Bromhead, 1986).

Bu iki deney düzeneği arasında önemli düzeyde farklılıklar bulunmaktadır. Her iki deney düzeneğinin birbirlerine karşı üstünlükleri ve sınırlayıcı yanları bulunmaktadır. Temel mantık olarak aynı prensipte çalışmalarına rağmen özellikle

kesme yüzeyinin yeri, numune boyutları, numuneyi çevreleyen ringlerin sayısı ve yerleşimi ile numuneye yük aktarımı farklılık göstermektedir (Meehan ve diğ., 2008). NGI-tipi deney düzeneğinde genellikle 20 mm yüksekliğinde bir numune kullanılırken Bromhead tipi deney düzeneğinde 5 mm yüksekliğinde bir numune kullanılmaktadır. Bromhead tarafından tasarlanan sistemde halka şeklindeki numunenin iç çapı 70 mm, dış çapı ise 100 mm olarak tasarlanmışken, NGI-tipi deney düzeneklerinde ise numune çapları değişkenlik göstermekle birlikte dış çap genellikle 100 mm veya 150 mm olurken iç çap 60 mm veya 100 mm olarak tasarlanmıştır (Bishop ve diğ., 1971; Bromhead, 1986).

Şekil 2.18'de görüldüğü gibi kayma yüzeyi, NGI-tipi deney düzeneğinde bulunan üst üste konumlandırılan iki sınırlayıcı ringin birbirlerine temas noktası civarında olmak üzere numune yüksekliğinin yarısı seviyesinde meydana gelmektedir.




**Şekil 2.18 :** NGI-tipi ve Bromhead tipi halka kesme deney numunelerinin kesme yüzeyleri (Meehan ve diğ., 2008).

Bromhead tipi deney düzeneğinde ise kayma yüzeyi numunenin alt veya üst bölgesinde (çoğunlukla üst) olmak üzere pürüzlendirilmiş plakalara çok yakın

seviyelerde, plakaya bağlanmış veya yapışmış zemin daneleri ile numune arasında oluşmaktadır. (Meehan ve diğ., 2008).

Her iki deney düzeneğinde numune deformasyon kontrollü burulmalı kesmeye maruz bırakılmaktadır. İstenilen düşey gerilme NGI-tipi ve Bromhead tipi deney düzeneklerinde modelden modele değişmekle beraber ölü yükleme veya hava basıncı yardımıyla numuneye etkitilmektedir.

Kesme hızının etkisi üzerine yapılan araştırmaların çok büyük bir çoğunluğu NGI-tipi deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Meehan ve diğ., 2008). Bunun sebebinin deneyde kullanılan numune boyutları olduğu anlaşılmaktadır. Numune boyutları bu anlamda Bromhead tipi deney sistemi için bir sınırlama olarak ortaya çıksa da, numune hazırlığı açısından bakıldığında bu durum avantaja dönüşmektedir. Genellikle halka kesme deneyi hazırlanmış (reconsitute) numuneler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu açıdan bakıldığında deney sırasında gereksinim duyulan hazırlanmış numune miktarı NGI-tipi deney sisteminde Bromhead tipi deney sistemine göre birkaç kat fazla olmaktadır. Aynı kapsamda deney öncesi numuneye uygulanacak konsolidasyon basıncı etkisinde oluşacak konsolidasyon oturmaları da önem kazanmaktadır. 5 mm kalınlığa sahip Bromhead tipi deney düzeneğinde bu durum problem yaratabilir, bunun aksine NGI-tipi deney düzeneğinde ise numune istenilen konsolidasyon basınçlarında konsolide edilebilmektedir. NGI-tipi deney düzeneğinde ringler arası sürtünmeyi gidermek için numuneyi çevreleyen iki ring arasında boşluk bırakılmaktadır. Kesme yüzeyi bölgesinde açılan bu boşluk genellikle 0.2 ile 0.4 mm arasında seçilmektedir. Deney sırasında kesme yüzeyinden kopan daneler bu açıklıktan numune hızına ve kesme moduna bağlı olarak numune dışına kaçmaktadır. Bu zayiat özellikle yüksek kesme hızlarında deformasyonların çok ileri seviyelerinde kayma yüzeyinin bozulup tekrar tekrar oluşmasını sağlayabilmektedir. Çok ileri deformasyon seviyelerinde meydana gelen kayma gerilmesindeki ani küçük artış ve düşüşlerin bu durumdan kaynakladığı düşünülmektedir (Tika ve diğ. 1996; Parathiras 1995). Bromhead tipi deney düzeneğinde böyle bir durumun oluştuğuna dair bir bilgiye rastlanmamıştır.

Kesme hızının değişimi için farklı şartlar için farklı hızlar istenmektedir. Örneğin deprem şartlarının modellenmesi için 400 mm/dak'lık bir kesme hızına gereksinim duyulurken yüksek plastisiteli bir kilin kalıcı kayma mukavemetini belirleyebilmek için 0.02 mm/dak'dan daha düşük kesme hızları istenebilmektedir

(ASTM D6467 - 06a; BS 1377-7). Halka kesme deneylerinde numuneye uygulanan kesme hızı, deney aleti üreticilerine göre farklılık göstermekle beraber minimum 0.001 mm/dak ile maksimum 400 mm/dak arasında değişmektedir. Standart sistemlerde bu hız 0.02 mm/dak ile 2 mm/dak arasında bulunmaktadır (Wykeham Farrance, 2007; Seiken, 2006). Bu sınırlamaların temel sebebi çok geniş bir aralıkta değişen kesme hızının gereksiniminin olması ama bu aralıkta çalışabilen bir motorun uygun olarak sisteme yerleştirilmesindeki zorluklardır. Bu geniş aralıktaki kesme hızındaki deneylerden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerin değişimi araştırmacıları bu konuya sevk etmiştir. Literatürde kesme hızının değişimi ile kayma mukavemetindeki değişim incelenen konular arasında sıklıkla görülen konulardan biridir.

Halka kesme deney sistemi kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinin dışında geoteknik mühendisliğinde farklı amaçlar doğrultusunda da kullanılmaktadır. Kazıklı temellerin kapasitesinin belirlenmesinde hesaplanan çevre sürtünmesi bileşeninin belirlenmesi amacıyla zemin-çelik veya zemin-beton arayüzünde meydana gelen sürtünme direncinin elde edilmesinde kullanılmaktadır (Jardine ve diğ., 2005). Bu amaçla NGI-tipi halka kesme deney sistemi ile Broamhead tipi deney sistemlerinde farklı deney metotları kullanılmaktadır. Bunun sebebi kullanılan numune boyutları ve deney düzeneklerinin çalışma prensipleridir. Bunun dışında geosentetiklerin zeminle oluşturdukları donatılı yapıda aderans bölgesinde zemin-geosentetik arayüzündeki sürtünme kuvvetinin belirlenmesinde halka kesme deneyleri kullanılmaktadır (Tan ve diğ., 1998).

### 2.2.3 Üç Eksenli Basınç Deneyi

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla çok sıklıkla tercih edilmese de kullanılan deneylerden birisi de üç eksenli basınç deneyidir. Deney öncesi numunende konsolidasyona izin verilmesi ve numunede artık boşluk suyu basınçlarının oluşmaması istenildiğinden tercih edilen kesme hızlarının düşüklüğü nedeniyle özel olarak konsolidasyonlu-drenajlı (CD) şartlarında yapılan üç eksenli deneyi kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Üç eksenli basınç deneyinde uygulanan sınırlayıcı drenaj şartları gerçek arazi şartlarını modellemeye yönelik olarak oluşturulmaktadır. Boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde çok yavaş hızda yapılan drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde, en büyük

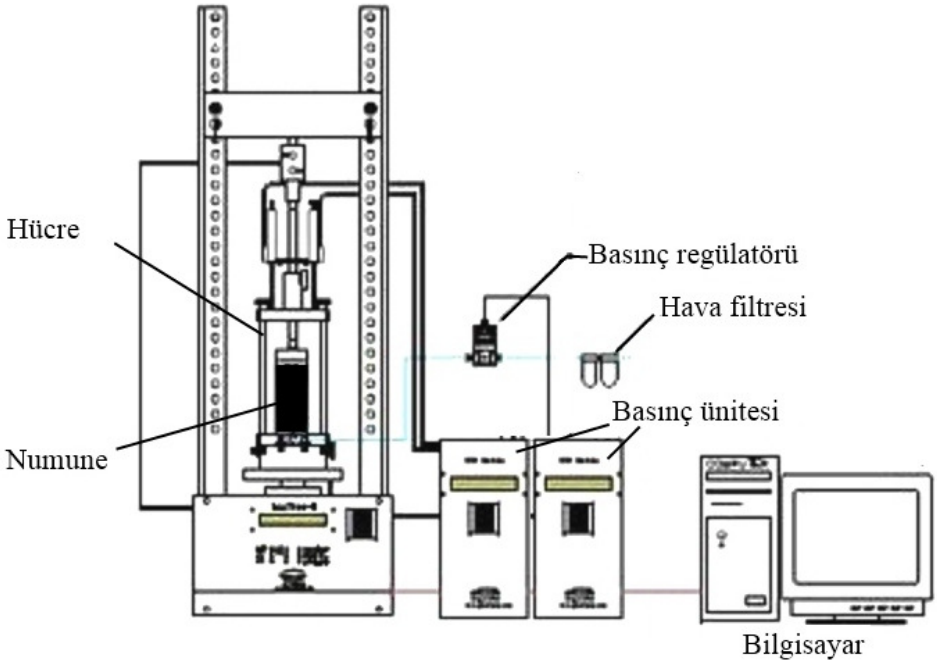
kayma gerilmesine ulaşıldıktan sonra numuneye uygulanabilir şekil değiştirmeler sınırlı kalmaktadır. Yükseklik/çap oranının iki olduğu numuneler üzerinde yapılan deneyler uzun zaman almaktadır. Ancak diğer deneylere bir üstün yan olarak drenaj kontrol edilebilmekte ve boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir. Şekil 2.19'da örnek bir üç eksenli basınç deney sistemi ve kesiti görülmektedir.

Aşırı konsolide zeminlerin kayma gerilmeleri, drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde artan deformasyonla birlikte önce artma eğilimi göstererek bir pik değere ulaşır ve ardından gerilme düşüş eğilimi göstererek azalır. Ancak, drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde kullanılan zemin numunesine uygulanabilir yer değiştirmenin bir sınırının bulunması kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi açısından sınırlayıcı faktör olarak görülmektedir. Çünkü zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine büyük kayma deformasyonlarından sonra erişilmektedir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde, belirli bir hücre basıncı altında numune konsolide edilmekte, konsolidasyon tamamlandıktan sonra istenilen çevre basıncı altında uygulanan deviatorik eksenel yük altında zemin numunesi kesilmeye zorlanmaktadır. Deney farklı hücre basınçları altında tekrarlanarak Mohr-Coulomb'a göre kayma mukavemeti parametrelerini pik ve kalıcı olarak elde etmek mümkün olmaktadır.

## 2.3 Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkiyen Faktörler

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini etkileyen faktörler günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yapılan araştırmaların sonuçlarında, kalıcı kayma mukavemetinin en çok zeminin mineralojik yapısı, jeolojik yük ve kesme hızından etkilendiği ortaya konulmuştur (Mitchell,1993). Bunun dışında mineralojik yapıyı da temsil edebilen kıvam limitleri, aşırı konsolidasyon oranı, kil yüzdesi ve kesme modu kalıcı kayma mukavemetine etki eden diğer faktörler olarak sayılabilir. Aşağıda konu üzerinde önceki çalışmaların ışığında kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörler ve etkileri özetlenmiştir.






**Şekil 2.19 :** Loadtrac II üç eksenli basınç deney aleti (İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarı, 2011; Geocomp, 2011 ).

### 2.3.1 Mineraloji ve Dane Yapısı

Doğal zeminleri oluşturan daneler, kayaların mekanik ve kimyasal ayrışma sonucu küçük parçalara bölünmesi ile oluşmaktadır. Daneleri oluşturan kayaların birbirinden

farklı mineralojik yapılara sahip olmaları ve ayrışmaya yol açan faktörlerin çok çeşitli olması nedeni ile doğal zeminler içinde farklı boyutlarda ve biçimlerde daneler yer almaktadır. Kayalar içindeki daha duraylı mineraller ayrışma sonucu iri daneli mineralleri meydana getirirken, daha az duraylı mineraller kimyasal ayrışma sonucu ikinci minerallere dönüşmektedir. Kırılgan ve plakalı bir yapıya sahip bu mineraller çok küçük parçalara bölünerek ince daneleri oluşturmaktadır (Mitchell, 1993; Özaydın, 2000). Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine etki eden en önemli faktörlerden birisi mineralojidir. Zeminlerin dane boyu dağılımları, içerdiği mineral tipi ve dane şekilleri bu anlamda önem taşımaktadır. Dane çapı, mineroloji ile dane şekli ilişkisi Çizelge 2.1'de verilmiştir.

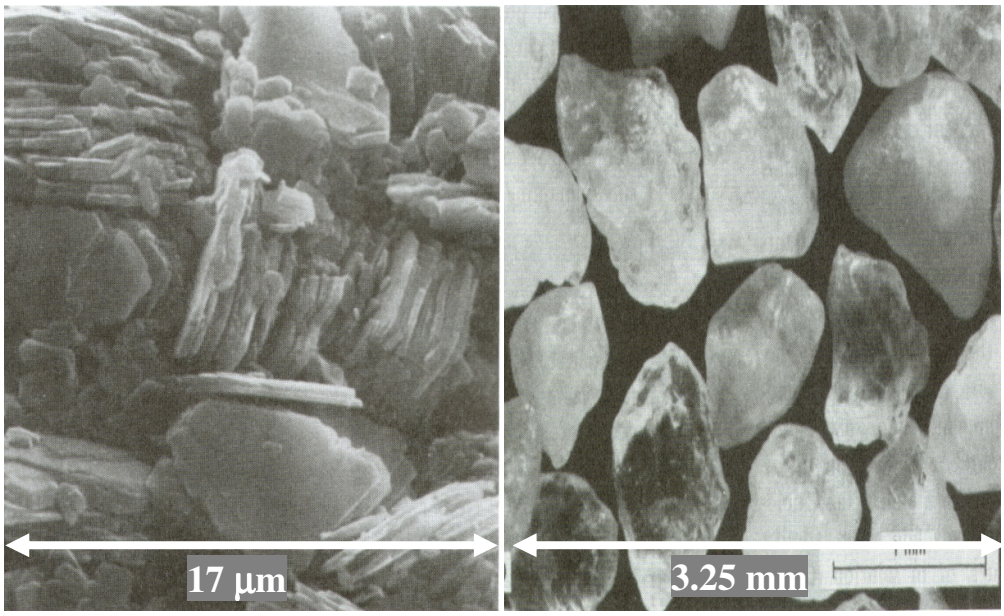
**Çizelge 2.1 :** Dane çapı, mineroloji ve dane şekli ilişkisi (Mitchell,1993).

<table>
<tr><th colspan="2">Zemin Cinsi</th><th>Çakıl</th><th>Kum</th><th>Silt</th><th>Kil</th></tr>
<tr><td colspan="2">Çap (mm)</td><td colspan="4">4.76 0.074 0.002</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Mineral Tipleri</td><td>Tortul Kayalar</td><td colspan="3">Dolamit, Alçıtaşı, Killi Şist, Kuvarsit, Konglomera, Kalker, vs</td><td rowspan="3">Kaolinit<br>Halosit<br>Montmorillonit<br>İllit<br>Vermikülit<br>Klorit<br>Atapulgit<br>Alofan</td></tr>
<tr><td>Volkanik Kayalar</td><td colspan="3">Granit, Diorit, Siyenit, Andezit, Bazalt, vs</td></tr>
<tr><td>Metamorfik Kayalar</td><td colspan="3">Mermer, Gnays, Mika Şist, Serpantin, vs</td></tr>
<tr><td>Dane Şekli</td><td colspan="4">Çoğunlukla hacimli, toparlak (bulky) daneler</td><td>Çoğunlukla yassı, yapraksı (platty) daneler</td></tr>
</table>

Genelde kil boyutuna sahip danelerin şeklinin yassı olduğu bilinmektedir. Dane şekli için yassılık arttıkça dane çatısı gelişi güzel dizilmiş olsa bile ilerleyen deformasyonla birlikte daneler aynı düzleme paralel olacak şekilde yönelmekte ve yüzey-yüzey etkileşimi meydana gelmektedir. Bununla birlikte yassı şekilli dane miktarı arttıkça kalıcı kayma mukavemetinin azaldığı bilinmektedir (Mitchell, 1993).

Doğada yaygın olarak görülen yassı şekilli kil minerallerinden olan kaolinit, illit ve montmorillonit gibi kil minerallerinin farklı kalıcı kayma mukavemetlerine sahip olması nedeniyle zemin içeriğinde bulunan danelerin minerolojisinin kalıcı kayma mukavemetinin değerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. İri daneli zeminlerin içeriğinde bulunan minerallerden kuvars, feldspat ve kalsit gibi minerallerin kalıcı kayma mukavemetleri ile pik mukavemetleri arasında çok büyük farklar bulunmamaktadır.

Ayrıca bu minerallerin kayma mukavemeti parametreleri de değer olarak diğer ince daneli zeminlere göre daha yüksek değerler almaktadır. Buna karşın kil yüzdesi yüksek ince daneli zeminlerde ise mineral cinsine bağlı olarak pik mukavemet ile kalıcı kayma mukavemeti arasında birkaç kata varan büyük farklar oluşabilmektedir. Bu yüzden ince daneli zeminlerden oluşan şevli yüzeylerin stabilite tahkiklerinde sadece pik mukavemet parametrelerinin kullanımı tasarımların güvenliği açısından sorun yaratabilmektedir. Şekil 2.20'de yassı kaolinit ve büyük hacimli kuvars minerallerinin elektron mikroskobu altındaki görünüşleri verilmiştir (Mitchell, 1993). Şekilde görüldüğü gibi kaolinit yassı ve yapraksı bir görünüme sahipken iri daneli kuvars danecikleri daha toparlak şekiller alabilmektedir. Aynı zamanda resimlerdeki ölçeklere dikkat edilirse dane boyutları arasındaki fark ta açıkça görülmektedir.




(a) b)

**Şekil 2.20 :** (a) Kaolinit minerallerinin elektron mikroskobu altındaki görünümü. Resim genişliği 17 μm'dur. (b) Kuvars minerallerinin elektron mikroskobu altındaki görünümü (Mitchell, 1993).

Kil daneleri arasında elektriksel çekim ve itki kuvvetleri meydana gelmektedir. Bunun nedeni danelerin su molekülleri ve diğer kimyasal maddelerle farklı elektriksel yüke sahip olmalarıdır. Oluşan bu elektriksel yüklerin şiddeti genellikle mineral cinsine bağlı olarak değişmektedir. Bu kuvvetler etkisinde su molekülleri danelere yapışmakta ve absorbe su tabakasını oluşturmaktadır. Absorbe su tabakasının miktarına göre daneler arası temas ve yük aktarım miktarları değişmektedir. Su muhtevası arttıkça daneler birbirinden uzaklaşmakta ve temas yüzeyleri azalmaktadır. Likit limit ve diğer kıvam limitleri ince daneli zeminlerin su tutma kabiliyetlerinin bir göstergesidir. Bilindiği üzere likit limit zeminin plastik kıvamdan sıvı kıvama geçtiği su muhtevası, plastik limit ise zeminin plastik özelliklerini koruduğu en düşük su muhtevası olarak tanımlanmaktadır. Plastisite indisi ise bu iki sınır değer arasındaki fark olarak tariflenmektedir.

Zeminlerin özgül yüzeyleri, özgül alanlarının ağırlıklarına veya hacimlerine oranıdır. Dane boyutu azaldıkça özgül yüzey artmakta, dolayısıyla su tutma kapasiteleri ve likit limitleri de artmaktadır. Bu doğrultuda mineraloji ile likit limit ve diğer kıvam limitleri arasında bir ilişkinin varlığından söz edilebilir. Pratikte zeminlerin dane şekilleri geometrik şekillere uymadığından özgül yüzey hesabı mümkün olamamaktadır. Ancak aynı hacmi dolduran ince daneli ve kaba daneli zeminler karşılaştırıldığında ince daneli zeminlerin özgül yüzeylerinin kaba daneli zeminlere göre daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Doğada yaygın olarak görülen bazı kil minerallerinin ortalama dane boyutları ve özgül yüzey değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi dane çapı ve dane kalınlığı en düşük olan montmorillonit minerallerinin ortalama özgül yüzey alanları diğer minerallere göre çok daha yüksek değerler alırken dane çapı ve ve dane kalınlığı açısından en büyük kil minerallerinden olan kaolinitin ise özgül yüzey alanı en düşük değer olarak göze çarpmaktadır. Kıyaslama açısından bir örnek verilirse 1 gram kum daneciğinin toplam yüzey alanı 0.1 $m^2$ civarında iken montmorillonit mineralinde bu değer 800 $m^2$ civarında değerler alabilmektedir. Daneciklerin özellikle su molekilleri ile olan ilişkilerinde bu yüzey alanının büyümesi elektriksel çekim kuvvetleri nedeni ile su tutma kapasitesini arttırmaktadır.

Kil minerallerinin dane boyutu arttıkça dane şekli olarak yassılığının azaldığı bilinmektedir. Mesri ve diğ. (1986)'ya göre, dane boyutu ile yassılık arasında

yukarıda bahsedilen ilişkinin olmasına rağmen dane şekli ile likit limit arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır.

**Çizelge 2.2 :** Bazı kil minerallerinin ortalama dane boyutları ve özgül yüzey değerleri (Bardet, 1997).

| **Mineral** | **Çap** (μm) | **Kalınlık** (μm) | **Özgül Yüzey** ($m^2$/gr) |
|---|---|---|---|
| Kaolinit | 0.3-4.0 | 0.050-2.000 | 15 |
| Montmorillonit | 0.1-1.0 | 0.003 | 800 |
| İllit ve Klorit | 10.0 | 0.030 | 80 |

Bu duruma örnek olarak attapulgit adı verilen iğnemsi dane şekline sahip kil mineralinin % 345 gibi oldukça yüksek bir likit limit değerine sahip olduğu aynı araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Doğada görülen bazı kil minerallerinin kıvam limitleri (likit limit ve plastik limit) ve aktivite değerleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

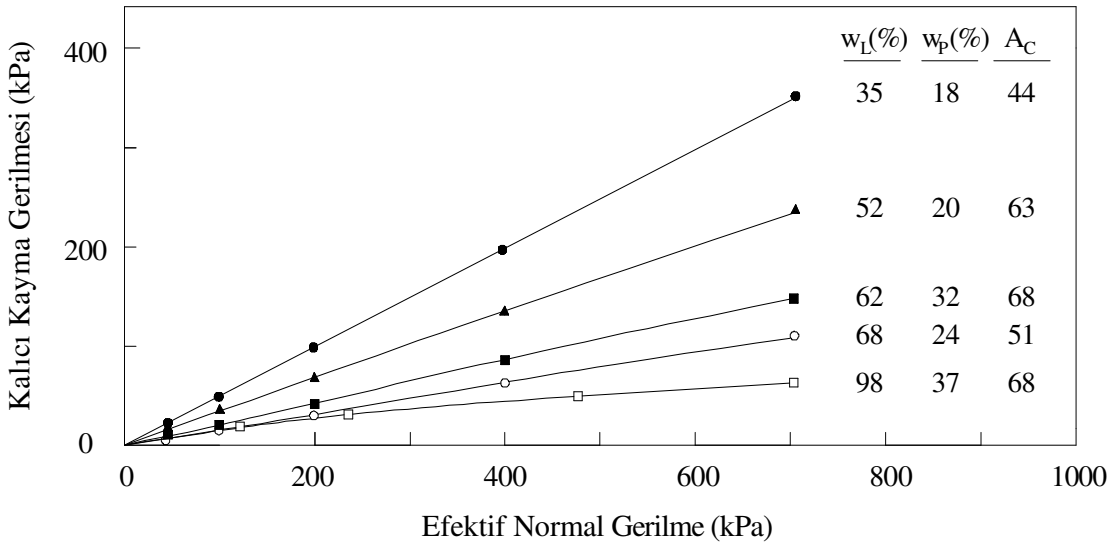
**Çizelge 2.3 :** Kil minerallerinin kıvam limitleri ve aktivite tipik değerleri (Das, 2002).

| **Mineral** | **Kıvam Limitleri** | | **Aktivite** $A_c$ |
|---|---|---|---|
| | **Likit Limit** (%) | **Plastik Likit** ($w_p$) (%) | |
| 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 |

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bütün kil minerallerine özgü olmasa da genel bir eğilim olarak zeminlerin likit limitlerinin artmasıyla birlikte kalıcı kayma mukavemetlerinin azaldığı görülmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti ile likit limit arasında sözü edilen ilişki Şekil 2.21'de verilen grafiklerde görülmektedir. Stark ve Eid (1994) tarafından yapılan bu çalışmada farklı likit limit değerlerine sahip numuneler üzerinde yürütülen deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma

mukavemet zarfları yukarıda bahsedilen genel eğilimi doğrulamaktadır. Yazarlara göre kil minerallerinin kalıcı kayma mukavemetleri ile likit limitleri arasında bir ilişki kurulabilir ve bu durum dane şekli ve dane boyutu açısından bir gösterge olarak kabul edilebilir.

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




**Şekil 2.21 :** Kıvam limitleri ve aktivite ile kalıcı mukavemet arasındaki ilişki (Stark ve Eid, 1994).

Kalıcı mukavemetleri ile pik mukavemetleri arasında kaydadeğer fark olan kil mineralleri için efektif normal gerilme seviyesinin etkisi diğer kil minerallerine göre daha fazladır. 0.002 mm'den küçük çaplı ve montmorillonit, illit ve kaolinit gibi yassı şekilli kil minerallerinin efektif kalıcı kayma mukavemet açıları ifade edilmesi gerekirse yaklaşık olarak 5, 10, 15 derece olarak sıralanabilir. 0.002 mm'den daha küçük olmasına rağmen attapulgit, allophane ve halloysite gibi kil minerallerinin yassı şekilli olmamasından dolayı efektif kalıcı kayma mukavemet açıları daha büyük değerlere sahiptir. Ayrıca bu tür kil mineralleri iğnemsi veya boru şekilli danelerden oluşmaktadır. Kuvars, feldspat ve kalsit gibi kil mineralleri dışındaki minerallerin kalıcı kayma mukavemetleri pik mukavemetlerinden farklı olmamakta

ve efektif kalıcı kayma mukavemeti açıları yaklaşık aynı değerlerdedir ($\phi'_r \approx 35°$). Ayrıca efektif normal gerilmelerden önemli ölçüde etkilenmemektedir (Mitchell, 1993).

#### 2.3.1.1 Kıvam limitleri

Kalıcı kayma mukavemetinin Atterberg kıvam limitleri ile ilişkisini incelemek amacıyla yapılmış literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda temel varsayım kıvam limitlerinin bir şekilde mineraloji ve ince malzeme yüzdesi ile ilişkisinin olduğunun düşünülmesidir. Mineral tipinin ve kil boyutlu malzeme miktarının değişimi ile kalıcı mukavemetin değiştiği bilindiği için bu iki ilişkinin birbirine bağlanması, kalıcı kayma mukavemeti kavramının ilk olarak ortaya atıldığı zamandan günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Bu konuda bazı araştırmacılar bir ilişkinin olamayacağı savını ileri sürse de geoteknik literatürüne girmiş ve uygulamada kullanılan birçok korelasyon bulunmaktadır. Herhangi bir malzemenin kalıcı kayma mukavemetini belirlemek maksadıyla sadece kıvam limitleri kullanan korelasyonların kullanılmasında bazı sakıncalar doğmaktadır. Bu bölümde de verilmiş olan literatürde geoteknik mühendislerinin kullanımına sunulmuş korelasyonların veri aralıkları ve verilerin saçılımları göz önüne alındığında sadece kıvam limitlerinin temel alındığı korelasyonların çok farklı sonuçlar doğuracağı görülmektedir. Örneğin killi zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti açısının genellikle 5° ile 20° arasında değiştiği kabul edilirse bazı korelasyonlarda mineraloji değişiminden dolayı 10°'lik farklar ortaya çıkabilmektedir. Bu fark kalıcı kayma mukavemeti açısını kapsayan aralığa göre oldukça yüksek bir değerdir. Bu nedenle söz gelimi sadece likit limit kullanılarak kalıcı kayma mukavemetini tahmin etmek, mineralojiye göre farklı sonuçlar ortaya çıkarabilir. Bu noktada konservatif tarafta kalarak aşırı güvenli (overdesign) veya güvensiz tarafta kalarak yetersiz tasarımlara yol açabilir. Bu noktada şunu da belirtmekte fayda bulunmaktadır; kıvam limitlerine dayanan korelasyonlar pratik kullanım yönünden çok kullanışlıdır. Korelasyonların kalıcı kayma mukavemetine etkiyen parametrelerle birlikte değerlendirilmesi ve tabii ki eğer mümkünse laboratuvar şartlarında gerçekleştirilecek deneyler yardımıyla mukavemet parametrelerinin daha sağlıklı olarak tayini en doğru yollardır.

Odell ve diğ. (1960)'a göre organik malzeme miktarında %1 - %2'lik küçük bir artış nedeniyle numunenin likit limitinde kil yüzdesinin %10 - %20'lik bir artışın sebep olacağı artış kadar değişime yol açabilmektedir. Bu nedenle organik malzeme içeren numunelerin kıvam limitlerinin belirlenmesi esnasında bu durumun göz önüne alınması ve dolayısıyla kıvam limitlerini temel alan korelasyonların kullanımında dikkatli davranılması doğru olacaktır. Aşağıda kalıcı kayma mukavemetinin kıvam limitleri ile ilişkisi için literatürde yer alan başlıca çalışmalara yer verilmiştir.

R.E. Gibson (1953), T.C. Kenney (1959 ve 1967), B. Voight (1973), P.K. De ve B. Furdas (1973), J.K. Mitchell (1976), R.D Holtz ve W.D Kovacs (1981) ve A.W. Skempton (1985) gibi bir çok araştırmacı tarafından yapılan yayınlarda, zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti ile plastisite indisleri ve plastik limitleri arasında bir ilişki kurulabileceğini ifade etmişlerdir.

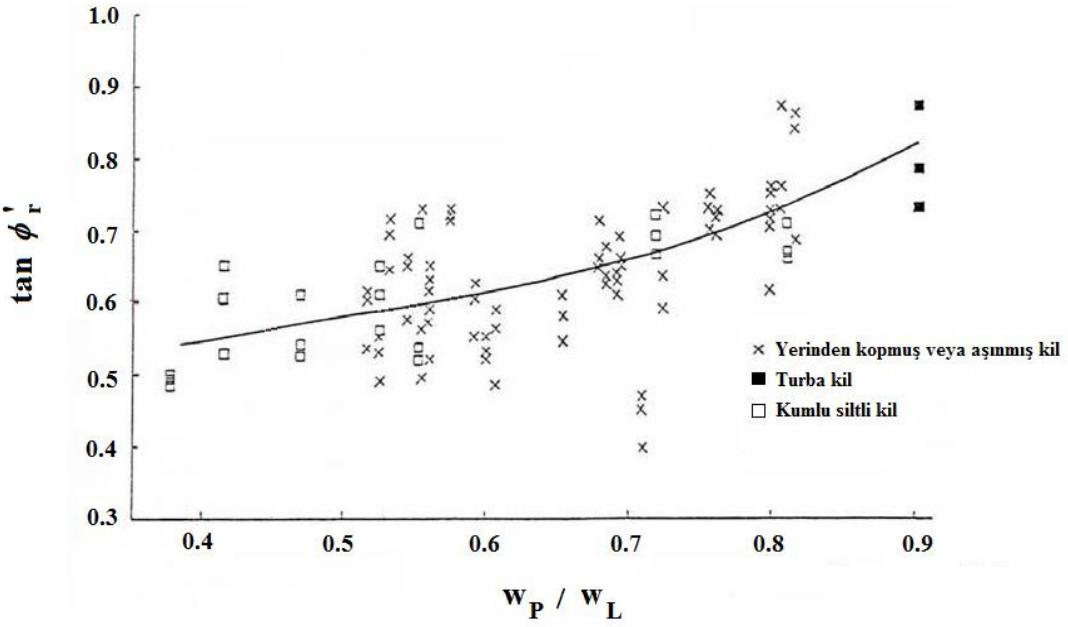
Bu yönde yapılan çalışmalardan bir tanesi De ve Furdas (1973) tarafından yapılan çalışmadır. Araştırmacılar Galler bölgesinde görülen aşırı konsolide zeminler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmaların sonuçları ile daha önce literatürde verilen çalışmaların sonuçlarına göre plastik limitin likit limite oranı ile kalıcı kayma mukavemeti arasında bir ilişki olduğunu iddia etmektedirler. Şekil 2.22'de görüldüğü üzere genel bir eğilim olarak plastik limit/likit limit oranının artmasıyla kalıcı kayma mukavemeti açısının tanjantı artmaktadır. Ancak bu değerlendirme yapılırken deney sonuçlarının birbiriyle çok fazla uyumlu olmadığı ve dağınık bir yerleşimin olduğu hesaba katılmalıdır.

Yazarlar verilerin bu dağınık yerleşim için bazı sebepler ileri sürmüşlerdir.

(i) Deney sonuçları değerlendirilirken ortalama değerlerin göz önüne alınması,

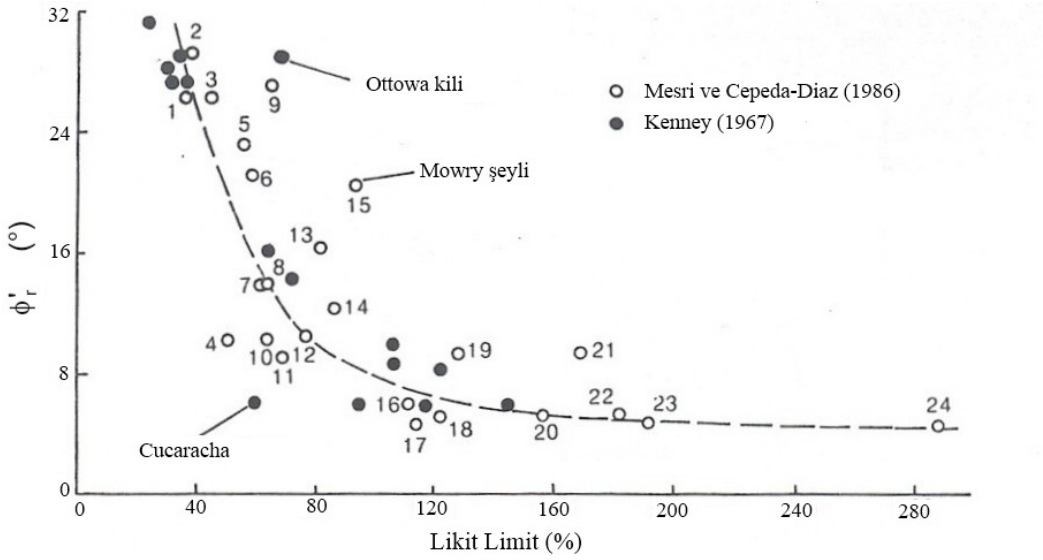
(ii) Grafikte görülen bazı verilerin drenajlı şartlarda yapılan deney verileri olarak bilinmekle beraber pik mukavemet ve kalıcı mukavemet ayrımının sağlıklı olmaması,

(iii) Farklı çalışmalardan alınan verilerin birbirinden farklı mineralojik yapıya sahip olmaları.




**Şekil 2.22 :** Güney Galler aşırı konsolide zeminlerinin $w_P/w_L$ oranı ile kalıcı mukavemet açısı arasındaki ilişki (De ve Furdas, 1973).

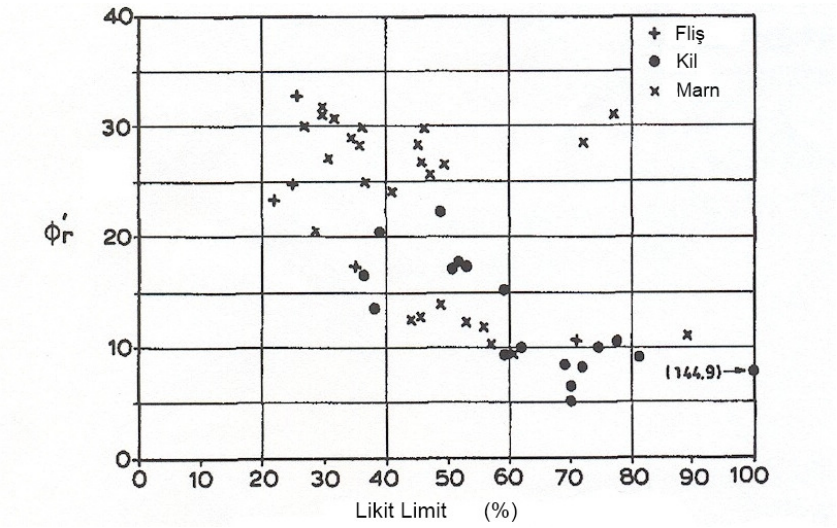
Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonuçları ile Kenney (1967)'de kullanılan veriler birlikte değerlendirmiş ve likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi için Şekil 2.23'te görülen ilişkinin ortaya çıktığını göstermişlerdir. Grafikte görülen en düşük kalıcı kayma mukavemete sahip numuneler % 30 ile % 80 arasında montmorillonit minerali içeren şeyl numuneleridir.




**Şekil 2.23 :** Mesri ve Cepeda-Diaz, (1986)'ya göre likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki.

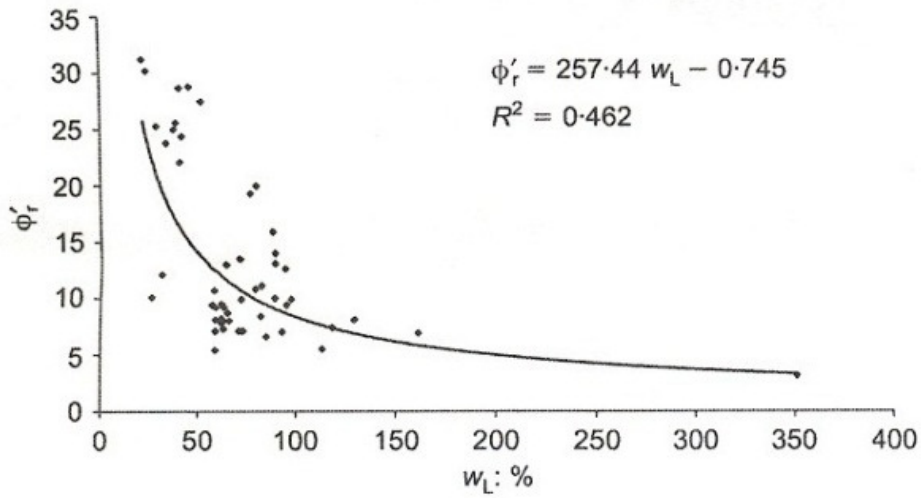
Şekilden görüldüğü gibi likit limitin artması kalıcı mukavemetin azalmasına yol açmaktadır. Kalıcı mukavemet açısının azalma hızı likit limitin yaklaşık % 80 değerine kadar oldukça fazla iken bu değerden sonra kademeli olarak azalma miktarı düşmekte ve % 200'den sonra ise çok anlamlı bir düşüş gözlenmemektedir. Çalışmada kullanılan numunelerin bazıları genel eğilimin dışına çıksa da uyumlu bir ilişkiden söz edilebilir.

Şekil 2.24'te Kalteziotis (1993) tarafından yapılan çalışmada verilen fliş, kil ve marnlar üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre likit limit ve kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre herhangi bir korelasyon verilmemiştir. Ayrıca likit limiti % 90'dan daha fazla olan numune sayısı bir tane olduğu için sınırlı bir aralık için geçerlidir. Ayrıca çalışmada kullanılan özellikle marn zeminlerin kalıcı mukavemeti çok dağınık bir dağılım sergilemektedir. Örneğin % 45 likit limit için 13° ve 30°'lik kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir. Aynı şekilde % 75 likit limit değeri için yaklaşık 10° ve 30°'lik kalıcı kayma mukavemeti açıları görilmektedir. Bu farklılıkların kil minerallerinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.




**Şekil 2.24 :** Kalteziotis, (1993)'e göre likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki.

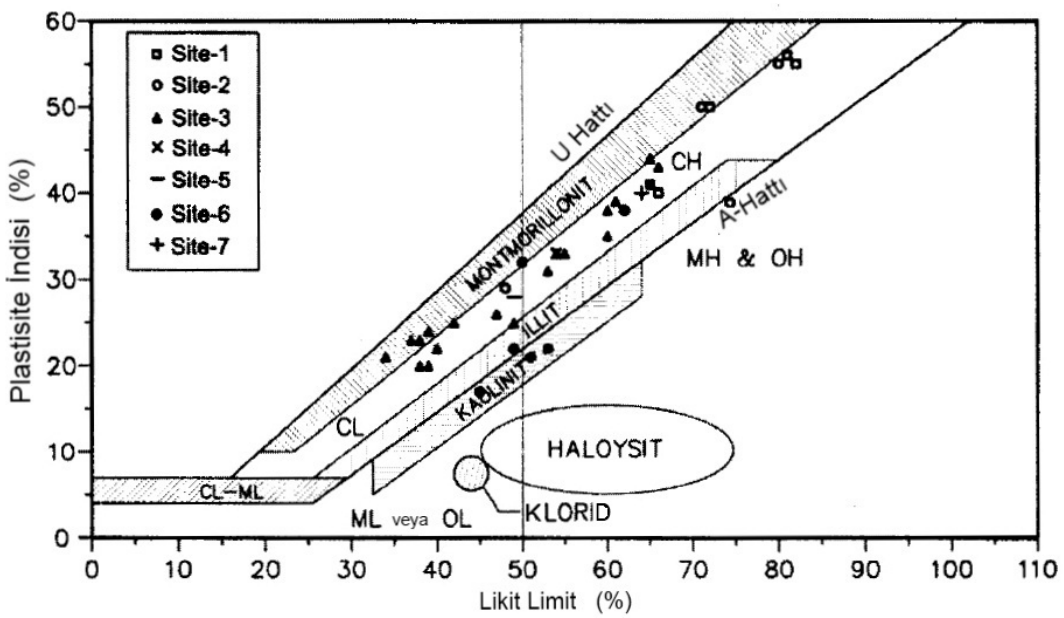
Sridharan ve Rao (2004), Wesley (2003) tarafından yapılan çalışmada kullanılan verileri kullanarak likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki Şekil 2.25'teki gibi vermiştir.




**Şekil 2.25 :** Sridharan ve Rao (2004) tarafından verilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkisi.

Verilerin dağılımına göre çıkarılan korelasyonun belirleme katsayısı $R^2$= 0.462 gibi düşük bir değer olarak gözükmektedir. Bu nedenle genel eğilim açısından bir anlam taşısa da verilerin saçılımı göz önüne alındığında korelasyonun uyumlu sonuç verdiği tartışmalıdır. Bu çalışma orijinal çalışmada kullanılan volkanik küllere ait verileri içermemektedir. Buna sebep olarak volkanik küller içeren zeminlerin yüksek likit limit değerlerine karşılık beklenenin çok üstünde mukavemete sahip olmaları gösterilmiştir. Elde edilmeye çalışılan korelasyonlara volkanik küllerin dahil edilmesi durumunda korelasyonları olumsuz yünde etkileyeceği açıktır. Aynı çalışmada, Wesley (2003) tarafından Casagrande kartında A-hattına uzaklık olarak tanımlanan ΔPI parametresinin likit limit ile toplamı ile kalıcı kayma mukavemeti arsındaki ilişki de incelenmiştir. Bu ilişkide de likit limit davranışına benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. ΔPI parametresi ile ilgili daha detaylı bilgi ileriki bölümlerde verilecektir.

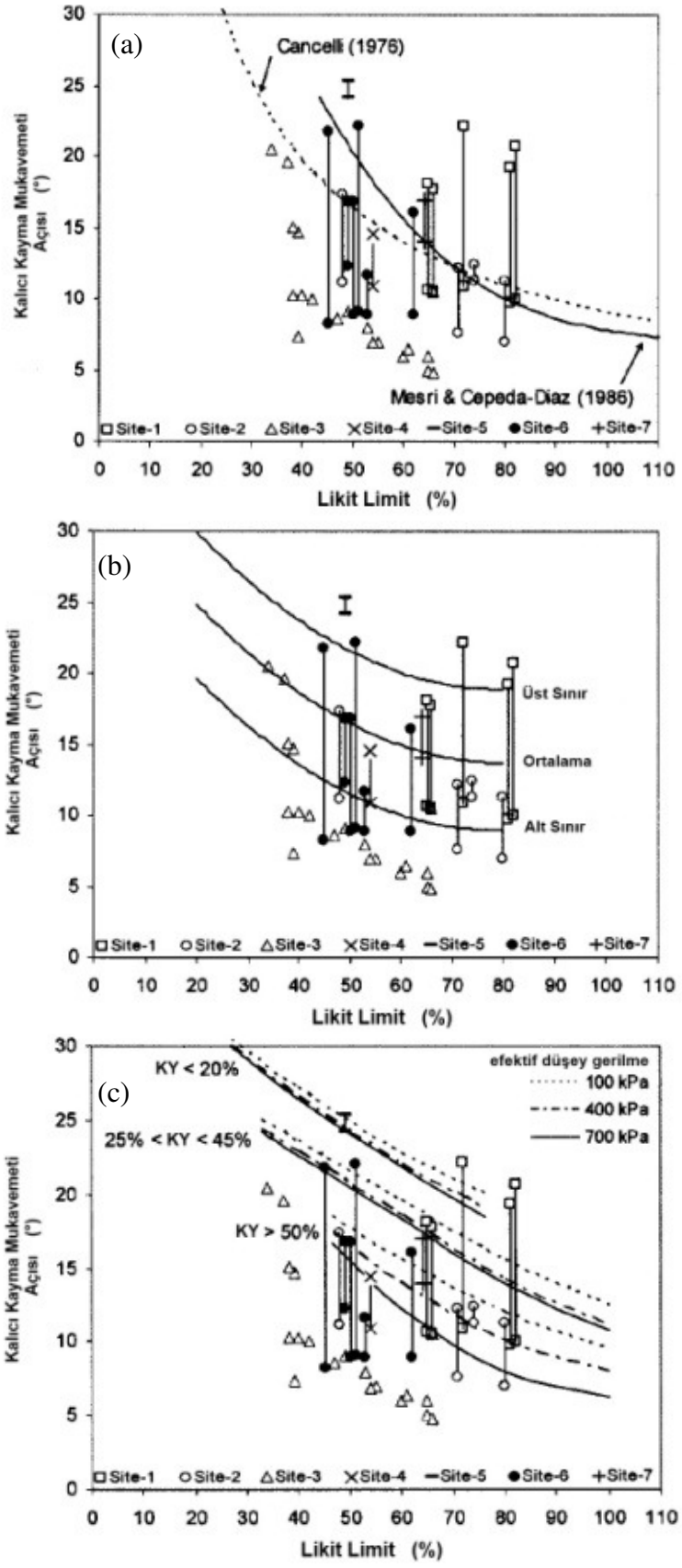
Amerika Birleşik Devletlerinin Colorado eyaleti sınırları içerisinde bulunan yedi farklı bölgeden alınan kiltaşı numuneleri üzerinde Dewoolkar ve Huzjak (2005) tarafından tekrarlı kesme kutusu ve Bromhead tipi halka kesme deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler literatürde verilen bazı korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin Holtz ve Kovacs (1981)'de verilen ve mineralojinin de göz önüne alındığı Casagrande kartındaki yerleşimi Şekil 2.26'da görülmektedir.



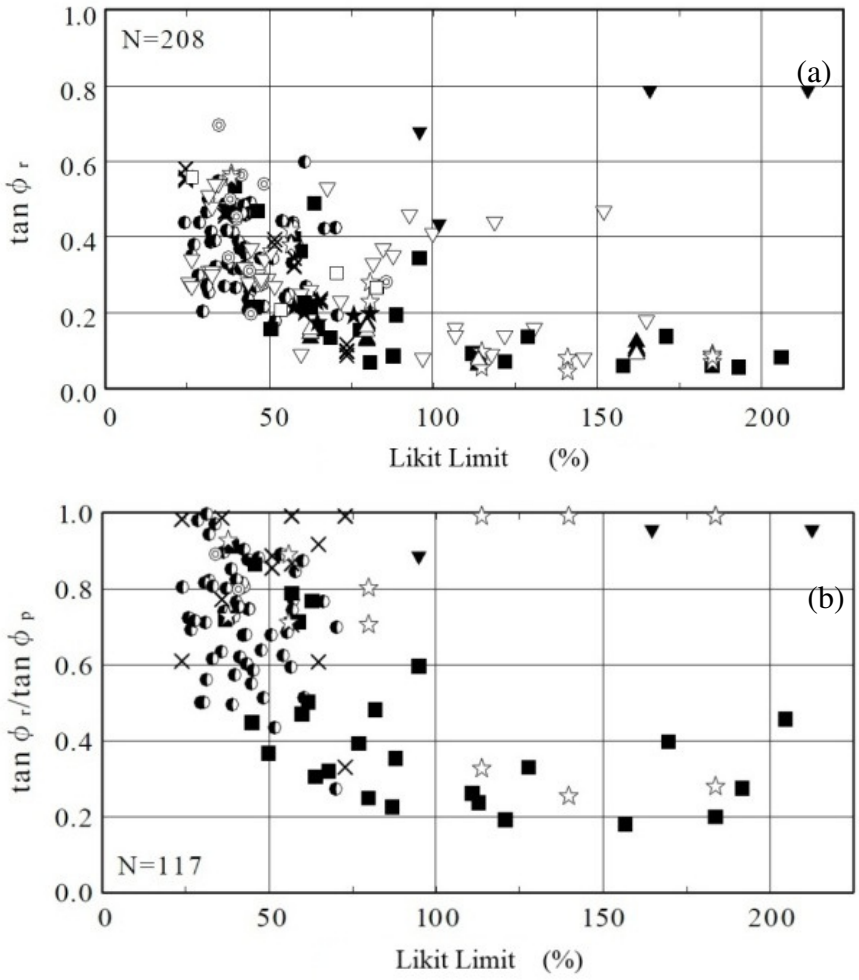

**Şekil 2.26 :** Dewoolkar ve Huzjak (2005)'te kullanılan numunelerin plastisite kartındaki yerleşimi.

Şekilde görüldüğü gibi numunelerin çoğunluğu tekil kil minerali bölgesine girmemektedir. Kalolinit ve Montmorillonit minerallerini kapsayan bölgelerde bir kaç numune gözlenmektedir. Dewoolkar ve Huzjak (2005) likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi geçmişte incelemiş olan (a) Cancelli (1977), Mesri ve Cepeda-Diaz (1986), (b) Deere (1974) ve (c) Stark ve Eid (1994) tarafından verilen korelasyonlar ile kendi yaptıkları deney sonuçlarını Şekil 2.27'de verildiği gibi birlikte sunmuşlardır. Yazarlara göre plastisite indisi tabanlı korelasyonlar likit limit tabanlı korelasyonlara göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Suzuki ve diğ. (2005)'te ise literatürde verilen bazı deney sonuçları ile yazarların kendi yaptıkları deneyler birlikte değerlendirilmiş ve likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi üzerinde çalışılmıştır. Sözü geçen yayında likit limit ile kalıcı kayma mukavemetinin tanjantı arasındaki ilişkiye ek olarak tanjantlar cinsinden kalıcı kayma mukavemetinin pik mukavemete oranı ile likit limit bağlantısı araştırılmıştır (Şekil 2.28).




**Şekil 2.27 :** Dewoolkar ve Huzjak, (2005) tarafından verilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler.




**Şekil 2.28 :** a)Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısının tanjantı ilişkisi b)Likit limit ile kayma mukavemeti açılarının tanjantlarının oranı ilişkisi (Suzuki ve diğ., 2005).

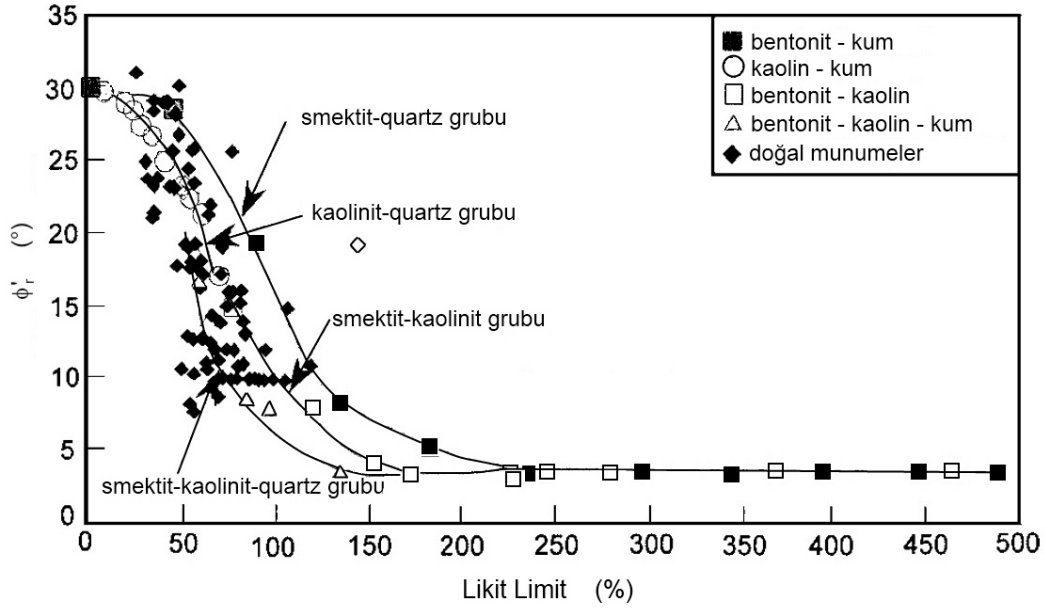
Grafikte verilen her bir şekil farklı araştırmacıların yaptığı araştırma verilerini simgelemekle birlikte çalışmada halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi ve kesme kutusu deneyi sonuçları birlikte kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan numunelerin hangi çalışmadan alındığı, deney tipi, veri sayısı ve numune tipleri Çizelge 2.4'te verilmiştir. Şekil 2.28 incelendiğinde kalıcı kayma mukavemeti için beklenen genel eğilim görülmekle beraber kalıcı kayma mukavemetinin pik mukavemete oranı göz önüne alındığında likit limiti % 100'den büyük numunelerde pik mukavemetten kalıcı mukavemete geçerken % 80 oranında düşüşler meydana gelebileceği görülmektedir.

**Çizelge 2.4 :** Suzuki ve diğ. (2005)'te kullanılan veriler.

| Numune tipi | Veri sayısı | Deney Tipi | Sembol | Kaynak |
|---|---|---|---|---|
| Doğal killer | 9 | TKK | □ | Skempton (1964) |
| Doğal killer | 99 | KK | ○ | De ve diğ. (1973) |
| Şeyl | 10 | TKK | △ | Townsend ve diğ. (1973) |
| | 22 | HK | ▲ | |
| Mineral karışımları | 48 | TKK | ▽ | Kenny (1977) |
| Endonezya rezidel zeminleri | 4 | HK | ▼ | Wesley (1977) |
| Ham nehiri kum mika karışımları | 30 | HK | + | |
| Happisburgh kili – Londra kili karışımları | 16 | HK | × | Lupini ve diğ. (1981) |
| Kum – bentonit karışımları | 16 | HK | ☆ | |
| Doğal killer | 6 | TKK | ★ | Skempton (1985) |
| Doğal killer, şeyl ve saf mineraller | 29 | TKK | ■ | Mesri ve diğ. (1986) |
| Doğal zeminler | 54 | TKK | ◇ | Collotta ve diğ. (1989) |
| | 62 | HK | ◆ | |
| Doğal killer ve saf mineraller | 8 | HK | ⦿ | Moore (1991) |
| Doğal killer | 60 | HK | ◐ | Yatabe ve diğ. (1991) |
| Bentonit | 4 | KK | ⋈ | Murakami ve diğ. (1993) |
| Kobe kili | 10 | - | ⧓ | Ikejiri ve diğ. (1993) |
| Doğal zeminler | 17 | HK | ◎ | Suzuki ve diğ. (2005) |
| | 1 | TKK | | |
| Kaolinit | 4 | HK | ◪ | Suzuki ve diğ. (2005) |
| Montmorillonit | 4 | HK | ◹ | Suzuki ve diğ. (2005) |

Bu nedenle özellikle yüksek plastisiteli killerde kalıcı kayma mukavemetinin sağlıklı bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir ve yapılacak tasarımlarda bu durumun dikkate alınması gerekmektedir.

Farklı bentonit, kaolin ve kum karışımlarında hazırlanmış numunelerle birlikte doğal numuneler üzerinde Tiwari ve Marui (2005) tarafından yapılan deney sonuçlarına göre likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 2.29'da verildiği gibi ortaya çıkmaktadır. Grafikte mineralojik olarak farklılık taşıyan kil minerallerinden oluşan karışım tiplerine ait önerilen korelasyonlar da işlenmiştir.




**Şekil 2.29 :** Tiwari ve Marui (2005) tarafından verilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler.

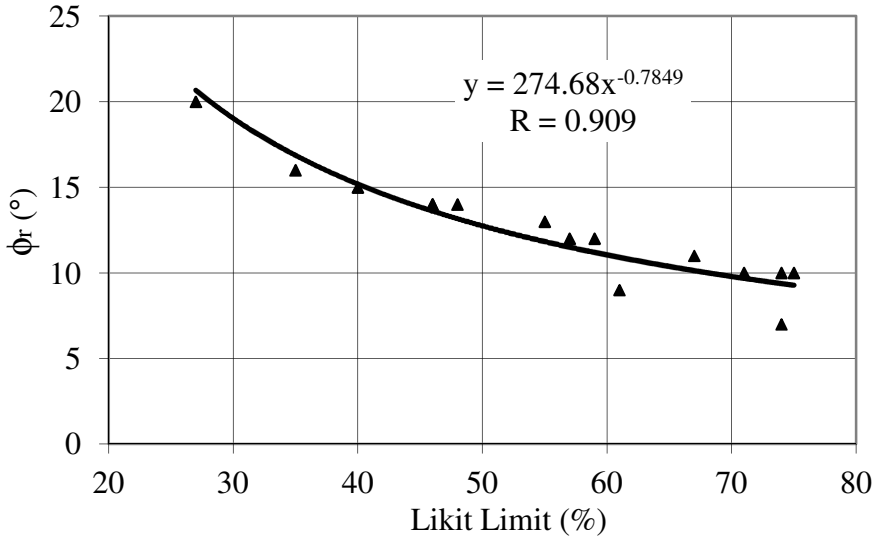
Şekil 2.29'da verilen farklı mineralojiye sahip karışımlara ait korelasyon eğrileri incelendiğinde aynı likit limit değeri için 13°'ye kadar farklı kalıcı kayma mukavemeti açısı değerleri elde edilebilmektedir. Özellikle doğada sıkça görülen yüksek plastisiteli killerin likit limit değerleri genellikle % 50 ile %100 aralığında değiştiğinden dolayı bu fark oldukça önemlidir. Bu sebeple tekil olarak likit limiti değerine dayanan korelasyonlar yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Buna ek olarak mineralojinin kalıcı kayma mukavemetine etkisinin ciddi derece etki ettiği de ortaya konmaktadır.

Literatürde kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemetine etkisinin incelendiği çalışmaları özetleyen bölümde verilen ve Stark ve Eid (1994) tarafından yapılan çalışmada likit limit kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki kil yüzdesi ile

beraber efektif gerilme seviyesini de içerecek şekilde kalıcı kayma kukavemeti ile kil yüzdesi ilişkisinin incelendiği bölümde verilen Şekil 2.81 ve Şekil 2.82'de görülmektedir. Bu çalışmalar literatürde verilen en doğru sonuçları veren çalışmalardan bazılarıdır.

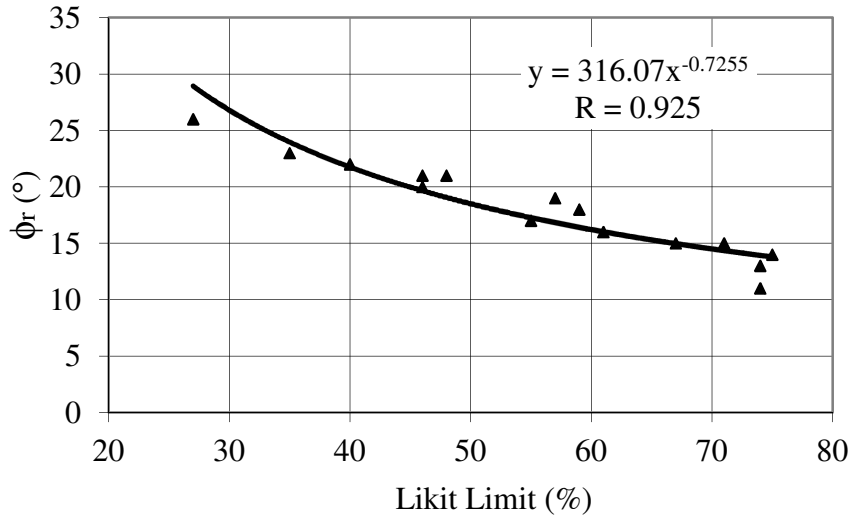
Ülkemizde bu konuda yapılan çalışmalarda yapılan deney sonuçları kullanılarak kıvam limitleri ile kalıcı kayma mukavemeti arasında şeşitli bağıntılar ve korelasyonlar üretilmiştir. Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında elde edilen bağıntılardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Yılmaz (2006) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit ilişkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda halka kesme ve tekrarlı kesme deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin likit limite bağlı değişimleri Şekil 2.30 ve Şekil 2.31'de verildiği elde edilmiştir.

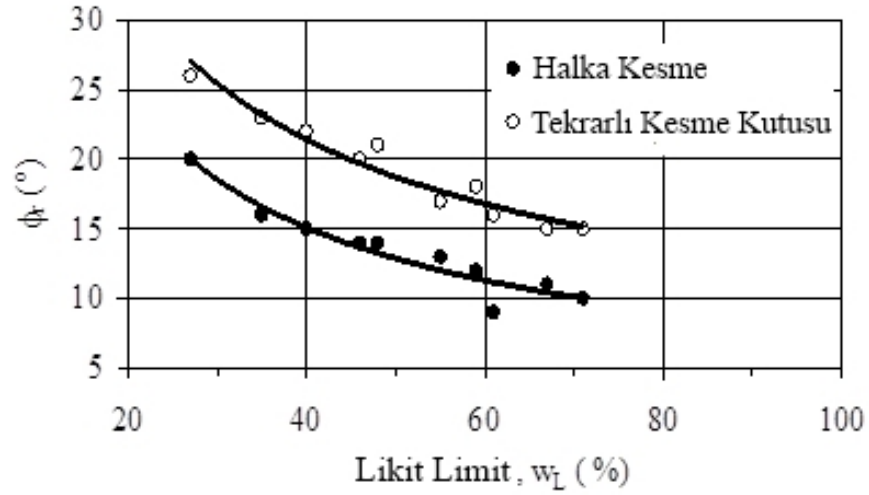



**Şekil 2.30 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).

İyisan ve diğ. (2006a) tarafından yapılan çalışmada 10 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin likit limite bağlı değişimi Şekil 2.32'de görüldüğü gibi verilmiştir. Çalışmada kullanılan numunelerin likit limit değerleri incelendiğinde en büyük likit limite sahip numunenin likit limitinin % 70 olduğu bu nedenle elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının yüksek değerler olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.




**Şekil 2.31 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).




**Şekil 2.32 :** Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri (İyisan ve diğ., 2006a).

Aynı çalışmada halka kesme deneyi sonuçlarına göre likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında aşağıdaki bağıntı önerilmektedir. Likit limit değerinin yüzde cinsinden kullanıldığı bu bağıntının belirleme katsayısı $R^2$= 0.87 olarak elde edilmiştir.

$$\phi_r = 213\, w_L^{-0.718} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre elde edilen aşağıdaki bağıntının belirleme katsayısı ise $R^2$= 0.93 olarak elde edilmiştir.

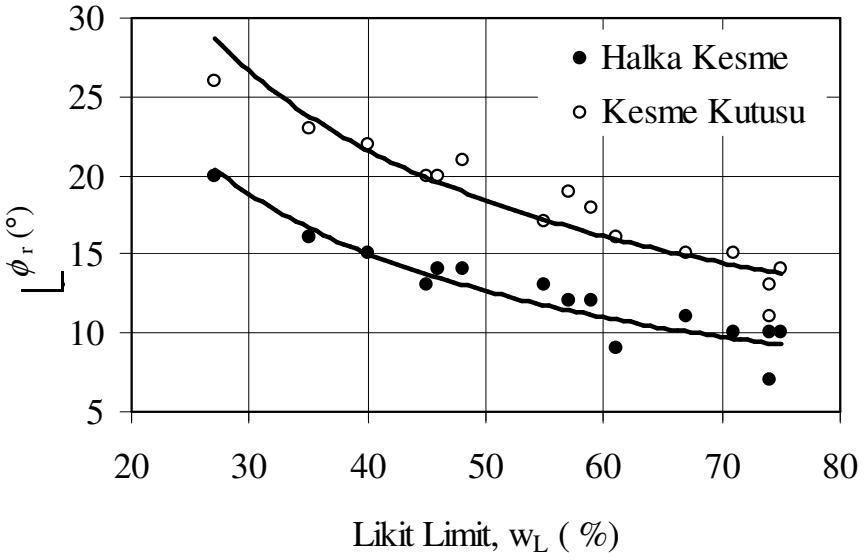
$$\phi_r' = 201\ w_L^{-0.605} \quad \textbf{(2.5)}$$

İyisan ve diğ. (2006b) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin likit limite bağlı değişimi incelenmiştir. Şekil 2.33'te verilen kalıcı kayma mukavemeti açısı likit limit ilişkisi için halka kesme deney sonuçlarına göre

$$\phi_r^* = 260\ w_L^{-0.773} \quad \textbf{(2.6)}$$

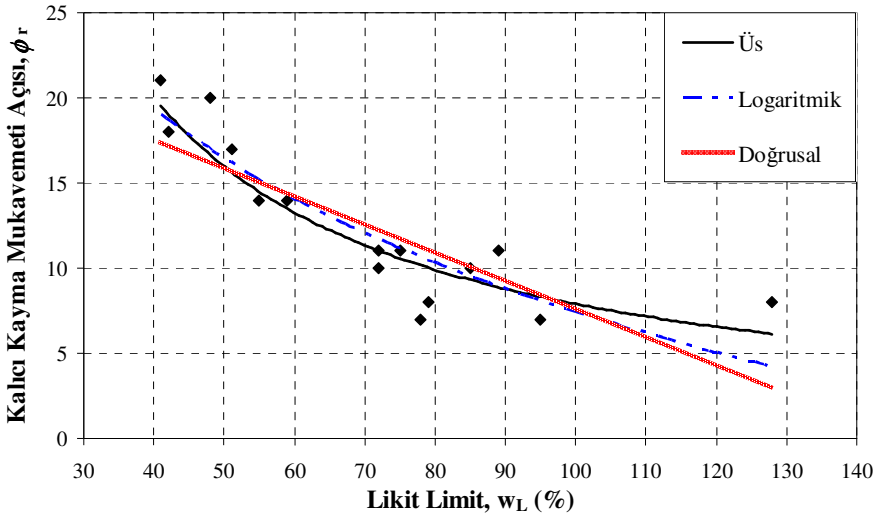
bağıntısı elde edilmiştir ($R^2$= 0.82). Aynı çalışmada tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen bağıntının belirleme katsayısı $R^2$= 0.86 olup aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\phi_r = 305\ w_L^{-0.718} \quad \textbf{(2.7)}$$




**Şekil 2.33 :** İyisan ve diğ. (2006b) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

Ataç (2009) tarafından yapılan çalışmada 15 farklı numune üzerinde yapılan halka kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında bağıntılar önerilmiştir. Önerilen bağıntılar Çizelge 2.5'te ve Şekil 2.34'te verilmiştir.

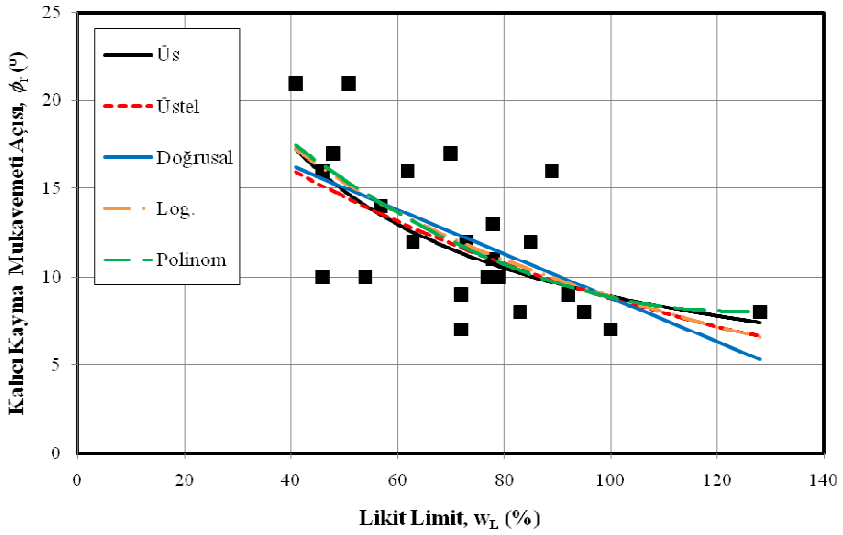



**Şekil 2.34 :** Ataç (2009) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.5 :** Ataç (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_L$ bağıntıları

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

Ürkmez (2009) tarafından yapılan çalışmada ise tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti likit limit ilişkisi incelenmiştir. 24 numune üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılarak Çizelge 2.6 ve Şekil 2.35'te verilen bağıntılar elde edilmiştir.

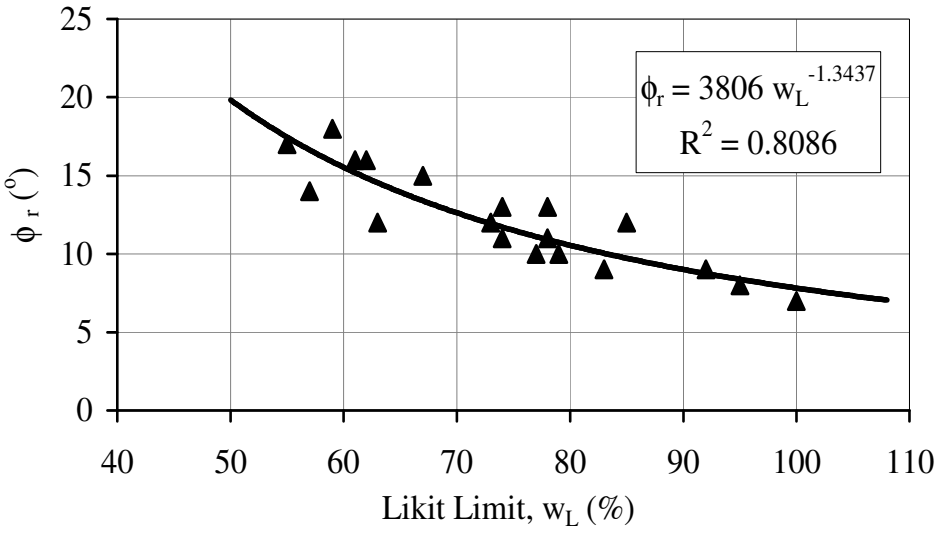



**Şekil 2.35 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.6 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_L$ bağıntıları.

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

İyisan ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada 19 numune üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin likit limite bağlı değişimi incelenmiştir. Şekil 2.36'da verilen kalıcı kayma mukavemeti açısı likit ilişkisinin belirleme katsayısı $R^2$= 0.81 olarak elde edilmiştir.




**Şekil 2.36 :** İyisan ve diğ. (2009) tarafından verilen likit limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi.

Bayın (2011) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti likit limit ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen bağıntılar Çizelge 2.7 ve Şekil 2.37'de verilmiştir.

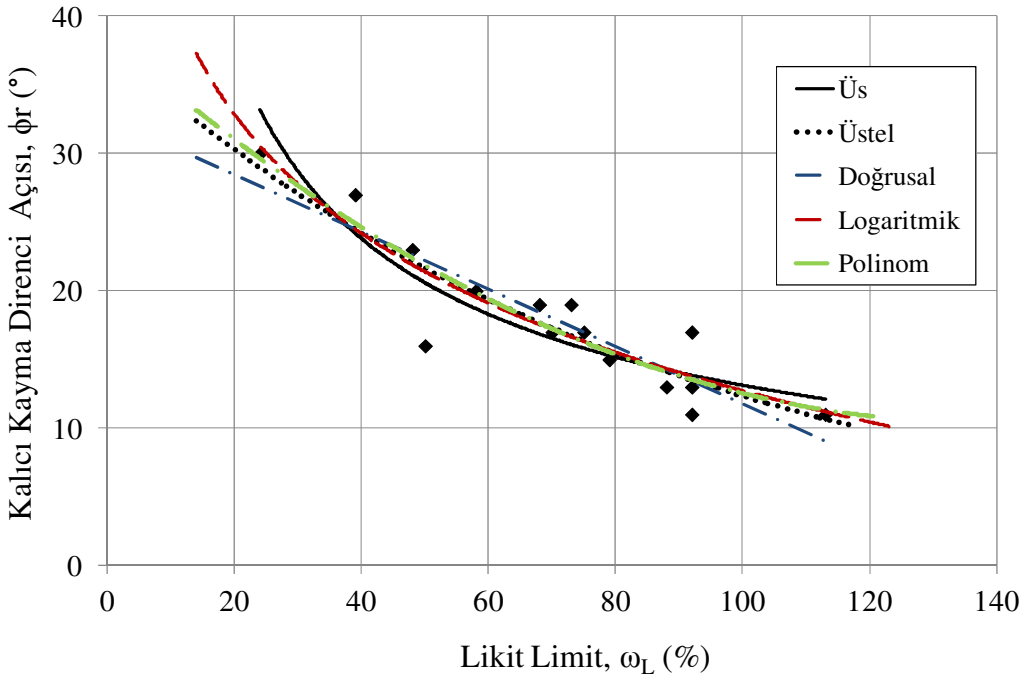
Aynı çalışma kapsamında yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ile Ürkmez (2009)'de verilen deney sonuçları birlikte değerlendirilmiş ve kalıcı kayma mukavemeti için likit limite bağlı olarak

$$\phi_r = 774 w_L^{-0.97}, \qquad (R^2=0.86) \qquad \textbf{(2.8)}$$

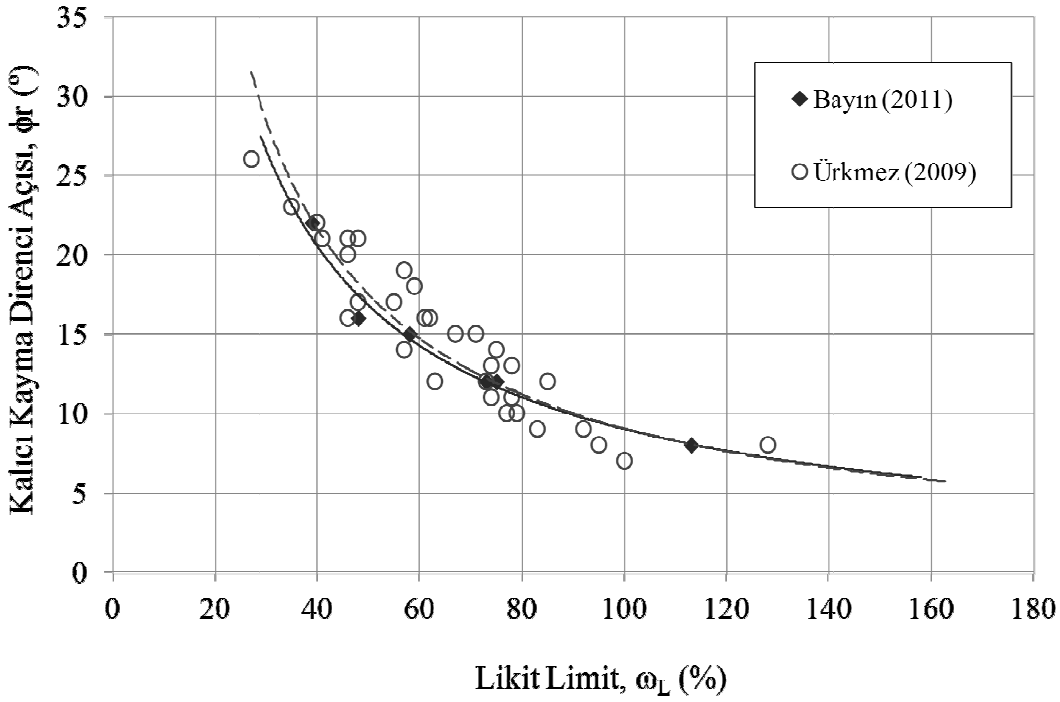
denklemi elde edilmiştir. Bu korelasyonun grafik gösterimi Şekil 2.38'de verilmiştir.

**Çizelge 2.7 :** Bayın (2011) tarafından verilen $\phi_r$-$w_L$ bağıntıları.

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




**Şekil 2.37 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.



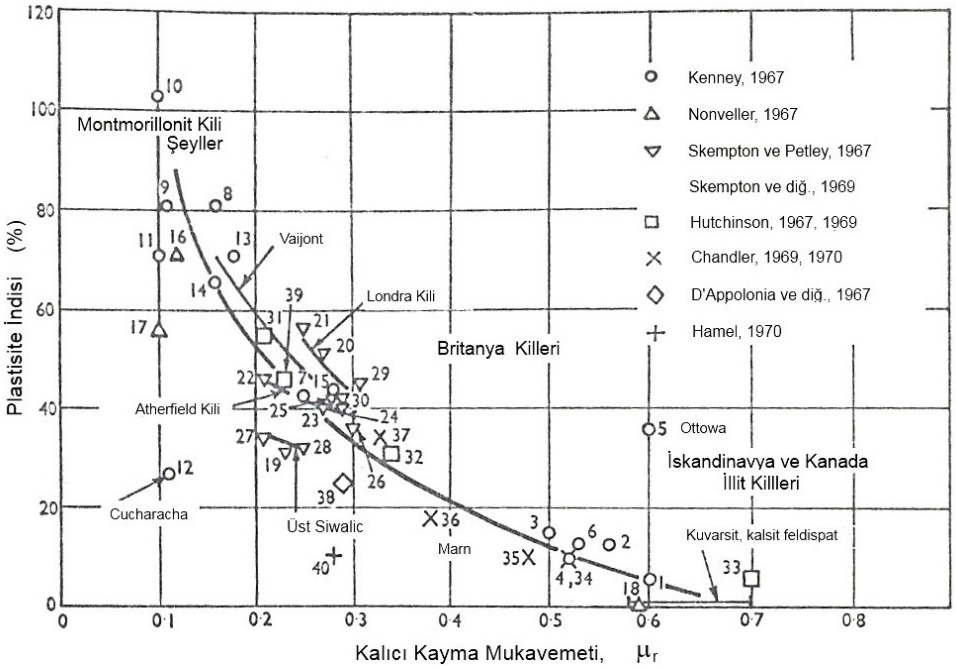

**Şekil 2.38 :** Yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarının Ürkmez (2009) nin tekrarlı kesme kutusu çalışmaları ile birlikte değerlendirilmesi (Bayın, 2011).

Geoteknik literatüründe kalıcı kayma mukavemetinin plastisite indisine bağlı değişimini içeren birçok korelasyon bulunmaktadır. Bu kapsamda verilen ilişkilerden bazıları aşağıda sunulmuştur. Voight (1973) literatürde verilen çeşitli deney sonuçlarını toplayarak yaptığı çalışmada kalıcı kayma mukavemeti ile plastisite indisi ilişkisini belirlemeye çalışmıştır (Şekil 2.39). Korelasyonun verildiği grafikte literatürde verilen diğer korelasyonlardan farklı olarak kalıcı mukavemet yatay eksende verilmiş, plastisite indisi ise düşey eksende gösterilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti olarak adlandırılan değeri ise $\mu_r = \tan \phi_r$ olarak tanımlanmıştır. Bazı çok ayrık sonuçlar veren numuneler haricinde genel eğilim olarak korelasyonla veriler birbirine uyumlu gözükmektedir.

Kanji ve Wolle (1977)'de ve Kanji (1974)'te literatürde verilen bazı veriler ile yazarlar tarafından yapılan çalışmalar ortak olarak değerlendirilmiş ve kalıcı kayma mukavemeti ile plastisite indisi arasında için aşağıdaki korelasyonu önermişlerdir.

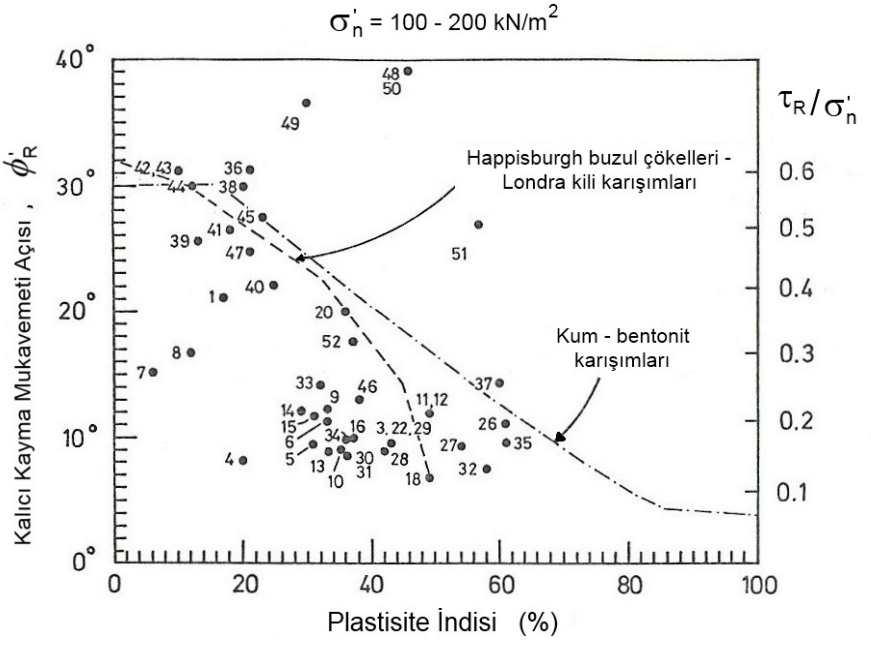
$$\phi_r' = \frac{46.6}{I_p^{\,0.446}} \qquad \textbf{(2.9)}$$

Bu denklemde plastisite indisi Ip yüzde cinsinden verilmektedir.




**Şekil 2.39 :** Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki (Voight, 1973).

Lupini ve diğ. (1981)'de plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi yaptıkları deney sonuçlarına göre Şekil 2.40'taki gibi verilmiştir.

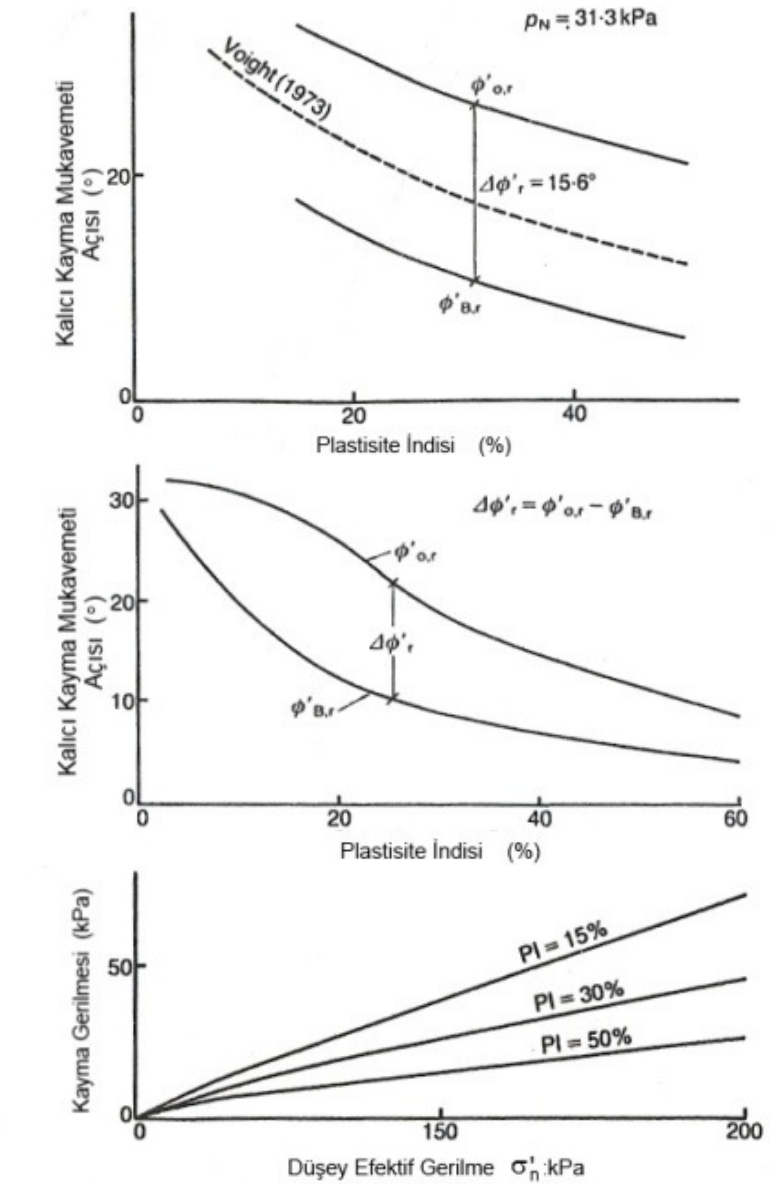



**Şekil 2.40 :** Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981).

Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi incelendiğinde Voight (1973) ve Kalteziotis (1993)'te öne sürülen % 27 plastisite indisi civarında bir süreksizlik olduğu iddiasına paralel olarak Wesley (2003)'de % 30 plastisite indisi civarında bir

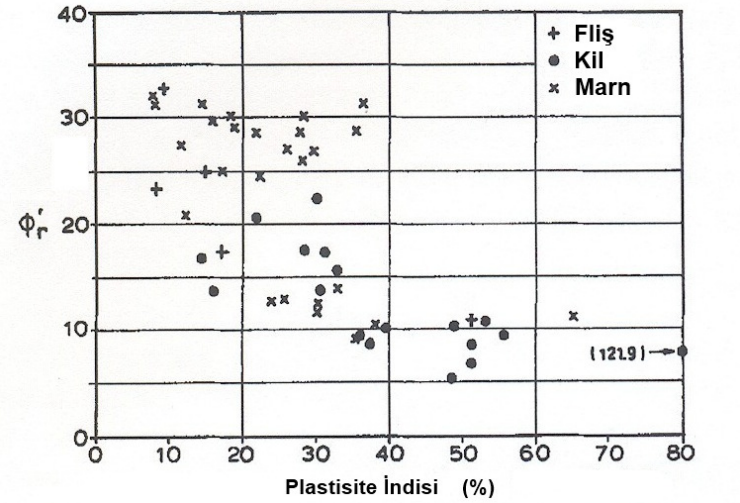
süreksizlik olduğunu, Lupini ve diğ. (1981)'de bu süreksizliğin türbülanslı kesme modundan, kayma kesmesi moduna geçiş nedeniyle oluştuğunu ileri sürmektedir. Kesme modu ile daha detaylı bilgi ilerideki bölümlerde verilecektir.

Maksimoviç (1989)'da kalıcı kayma mukavemeti zarfının eğriselliği hakkında yapılanı çalışmada yazarların tanımladığı kalıcı kayma mukavemeti zarfı eğrisellik parametrelerinin (bu konuda daha detaylı bilgi efektif gerilme etkisinin incelendiği Bölüm 2.3.2 de verilmektedir) plastisite indisi ile ilişkisi Şekil 2.41'deki gibi verilmiştir.




**Şekil 2.41 :** Maksimoviç (1989)'ta verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.

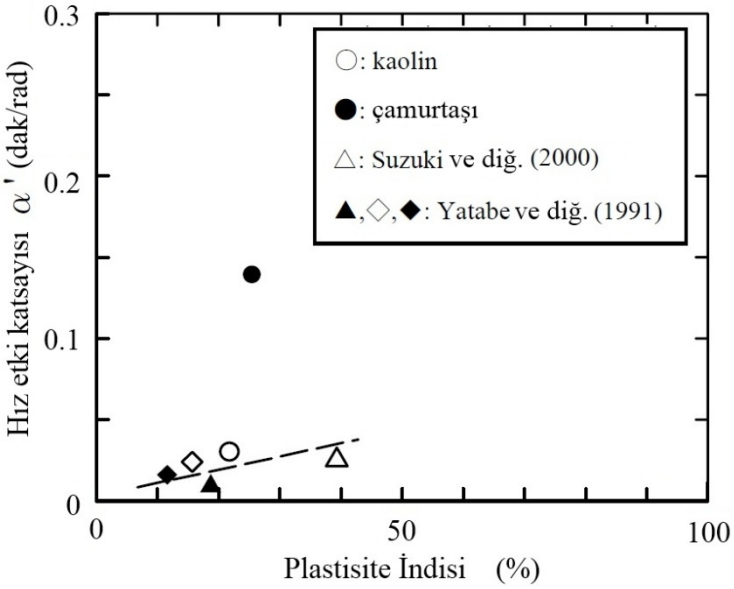
Yunanistan'da şev stabilitesi problemleri bulunan çeşitli arazilerden alınan numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti ile plastisite indisi arasındaki ilişki Kalteziotis (1993) tarafından Şekil 2.42'te verildiği gibi ifade edilmiştir. Yazar literatürdeki bazı çalışmaları da kaynak göstererek plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisinde plastisite indisinin % 27 değeri civarındaki değerinde bir süreksizliğin bulunduğunu iddia etmektedir.



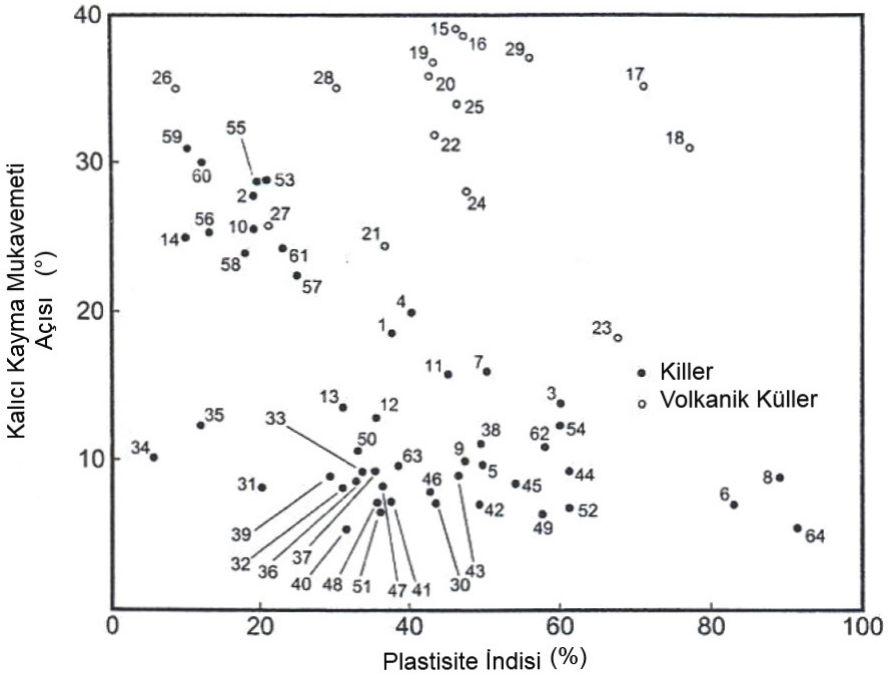

**Şekil 2.42 :** Kalteziotis (1993)'e göre plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.

Kesme hızını kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisinin araştırıldığı ve hız etki faktörünün ($\alpha$) tanımlandığı Suzuki ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmada plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti hız etki faktörü ilişkisi Şekil 2.43'teki gibi verilmiştir.

Wesley (2003) tarafından yapılan çalışmada verilen kalıcı kayma mukavemeti plastisite indisi ilişkisi Şekil 2.44'te görülmektedir. Genel itibarı ile anlamlı bir ilişki gözlenemese de bazı kümelenmelerin olduğu aşikârdır. Yazar tarafından belirtildiği üzere doğal çökel zeminlere göre volkanik kökenli zeminler plastisite özellikleri ve kalıcı kayma mukavemeti olarak farklılık göstermektedir. Ayrıca başka araştırmacılar tarafından öne sürülen % 30 plastisite indisi değeri civarındaki süreksizlik bu şekilde de göze çarpmaktadır. Yazar sadece likit limit veya sadece plastisite indisine bağlı bir korelasyon yerine kalıcı kayma mukavemeti ilişkisini numunenin kıvam limitleri değerlerine göre Casagrande kartında yer aldığı noktanın A-hattına uzaklığı ($\Delta$PI) ile kurmayı önermektedir. Bu yayınla ilgili daha detaylı bilgi ileride sunulmuştur.

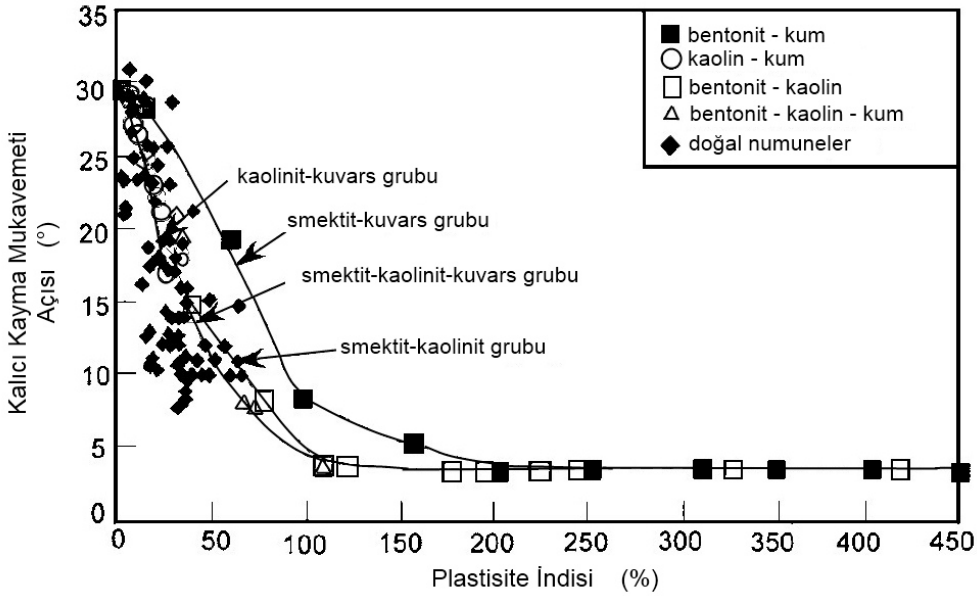



**Şekil 2.43 :** Plastisite indisi ile hız etki katsayısı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).



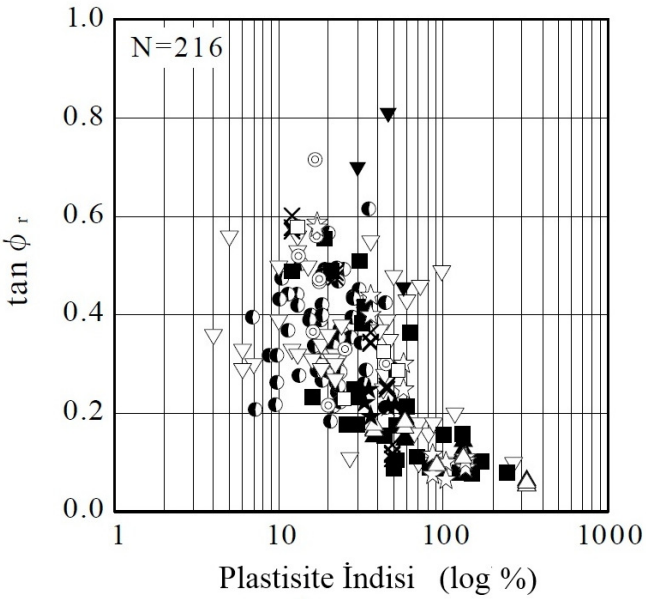

**Şekil 2.44 :** Wesley (2003)'te verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.

Tiwari ve Marui (2005)'te farklı kum-bentonit ve kaolin karışımları ile doğal numuneler kullanıldığı çalışmada kalıcı kayma mukavemetinin plastisite indisine bağlı değişimini vermiştir (Şekil 2.45). Genel olarak likit limitin kalıcı kayma mukavemetine bağlı değişimine benzer bir davranış gözlenmekle beraber daha iyi bir uyum gözlenmektedir. Aynı grafikte farklı mineralojiye sahip numunelerin kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile değişimleri de verilmiştir.




**Şekil 2.45 :** Tiwari ve Marui (2005)'e göre plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.

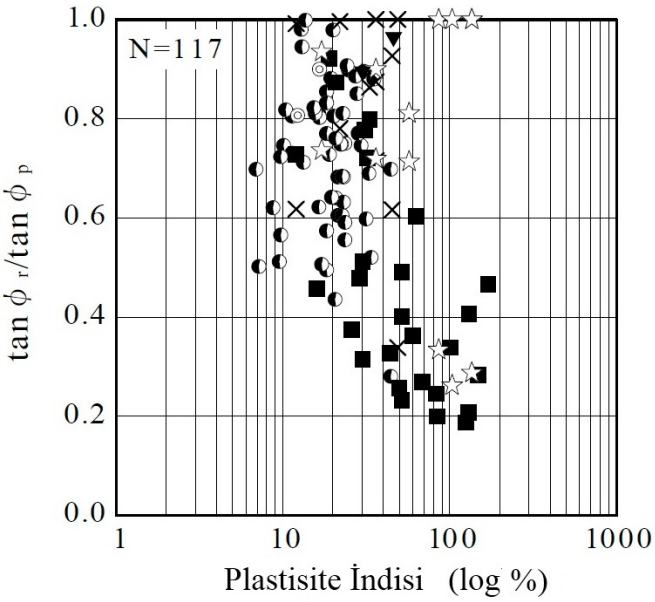
Literatürde yayımlanmış bazı deney sonuçları ile doğal numunelere ait deney sonuçlarının beraber değerlendirildiği ve toplamda 216 veri içeren, plastisite indisinin logaritmik ölçekte gösterildiği çalışmada, Suzuki ve diğ. (2007) kalıcı kayma mukavemeti plastisite indisi ilişkisini Şekil 2.46'daki gibi vermektedir.




**Şekil 2.46 :** Suzuki ve diğ. (2007) tarafından verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki.

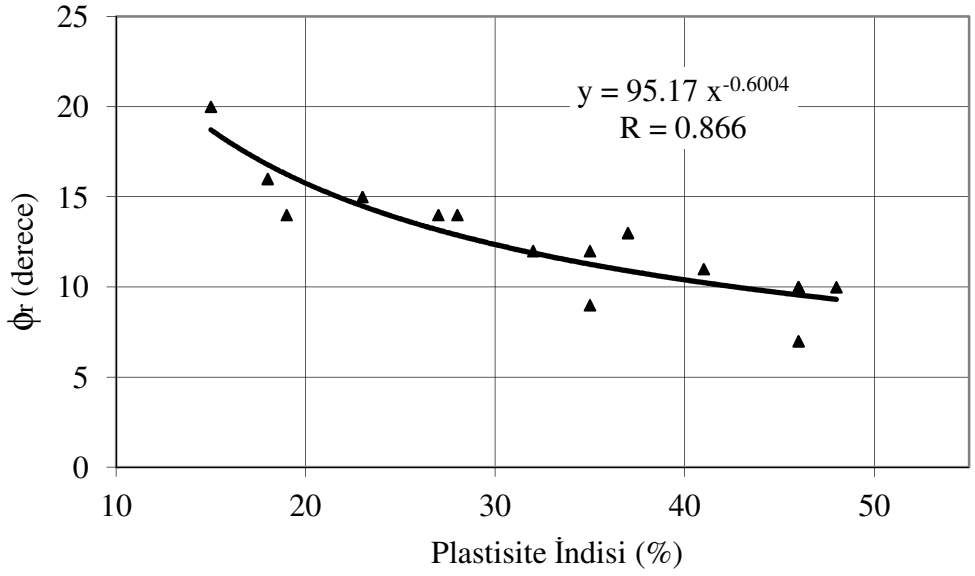
Logaritmik gösterimde plastisite indisi % 10 ile % 100 aralığında geniş bir alanda dağılım gösterdiğinden çok pratik ve kullanışlı bir gösterim olduğu söylenemez.

Ayrıca plastisite indisinin alabileceği değerler açısından, logaritmik eksenin en büyük ve en küçük değerleri farklı seçilebilirdi. Aynı yayında plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiye ek olarak kalıcı kayma mukavemetinin pik mukavemete oranı ile likit limit bağlantısı araştırılmıştır (Şekil 2.47).

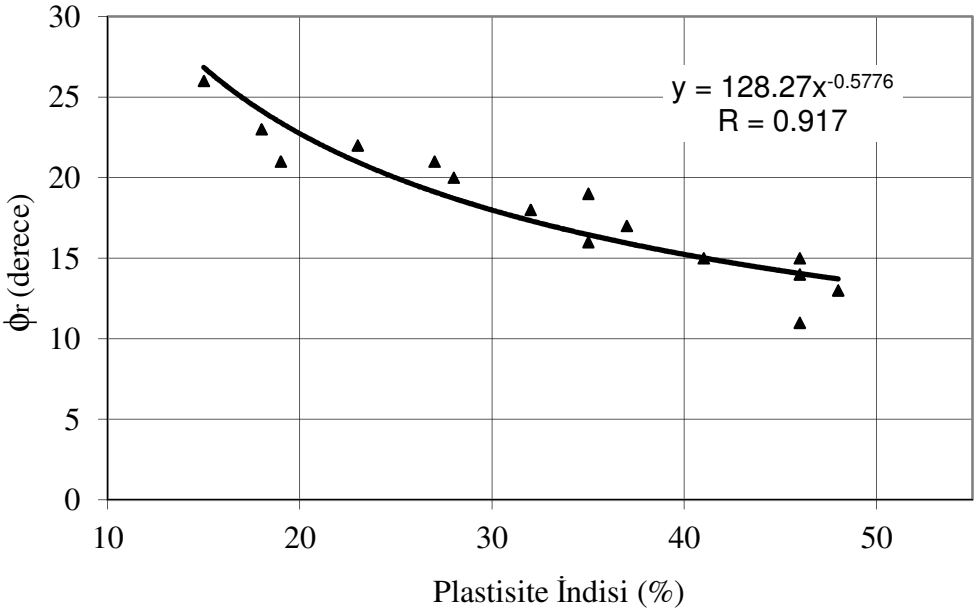



**Şekil 2.47 :** Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı/kayma mukavemeti açısı oranı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2007).

Yılmaz (2006) tarafından 15 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastisite indisi ilişkisi için Şekil 2.48 ve Şekil 2.49'da verilen korelasyonlar önerilmiştir.

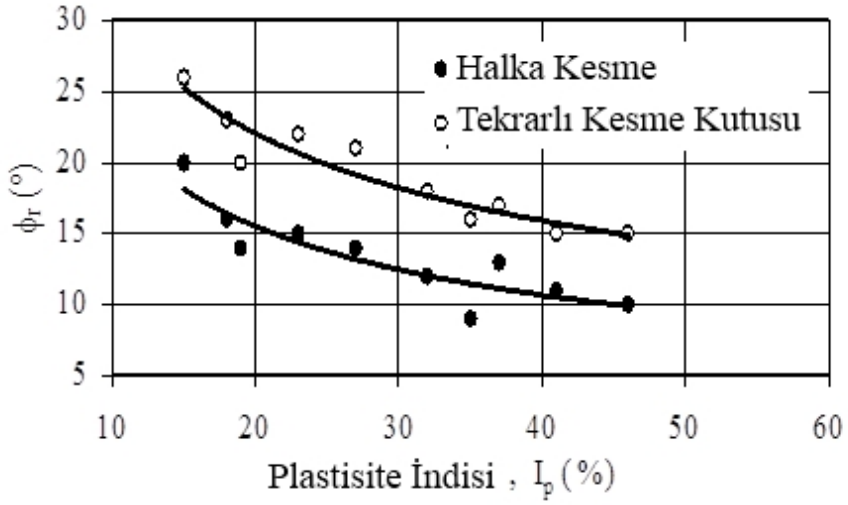



**Şekil 2.48 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).




**Şekil 2.49 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).

İyisan ve diğ. (2006a) tarafından yapılan çalışmada 10 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin likit limite bağlı değişimi Şekil 2.50'de görüldüğü gibi verilmiştir.




**Şekil 2.50 :** Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri (İyisan ve diğ., 2006a).

Aynı çalışmada halka kesme deneyi sonuçlarına göre plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında aşağıdaki bağıntı önerilmektedir. Plastisite indisi

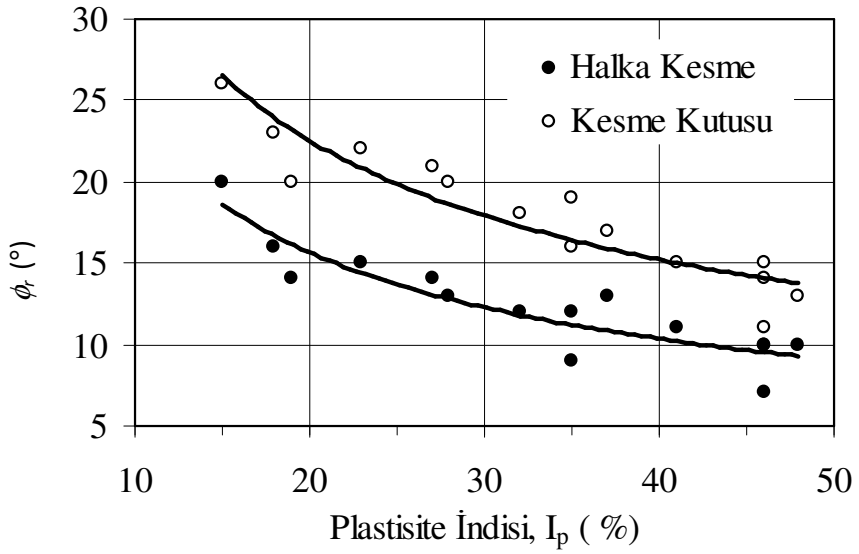
değerinin yüzde cinsinden kullanıldığı bu bağıntının belirleme katsayısı $R^2$= 0.76 olarak elde edilmiştir.

$$\phi_r = 78\, I_p^{-0.539} \qquad \textbf{(2.10)}$$

Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre elde edilen aşağıdaki bağıntının belirleme katsayısı ise $R^2$= 0.90 olarak elde edilmiştir.

$$\phi_r' = 90\, I_p^{-0.471} \qquad \textbf{(2.11)}$$

İyisan ve diğ. (2006b) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin plastisite indisine bağlı değişimleri Şekil 2.51'de verilmiştir.




**Şekil 2.51 :** İyisan ve diğ. (2006b) tarafından verilen plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

Şekil 2.51'de verilen kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisi ilişkisi için halka kesme deney sonuçlarına göre

$$\phi_r^* = 93\, I_p^{-0.596} \qquad \textbf{(2.12)}$$

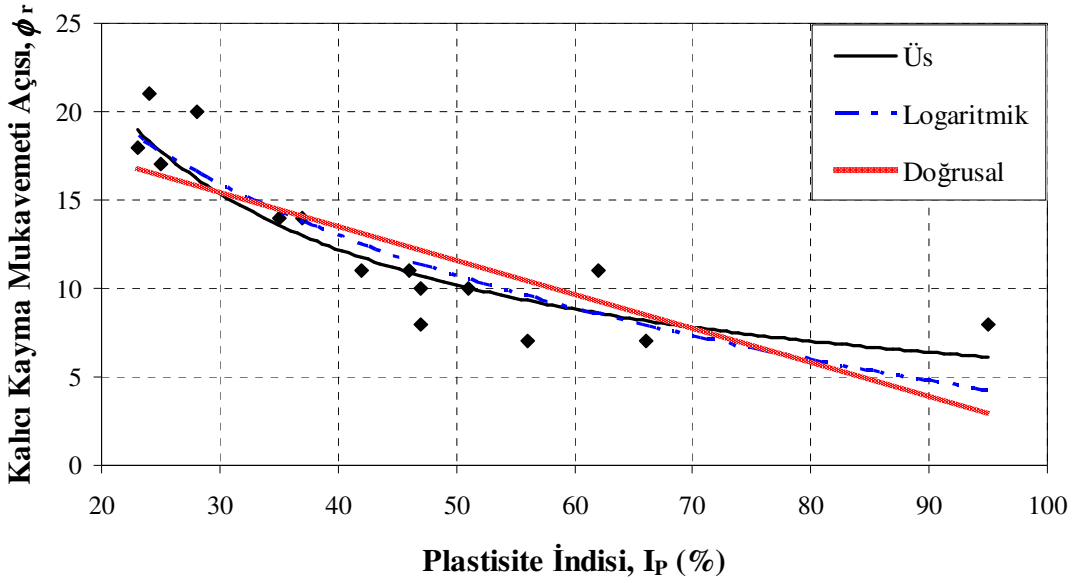
bağıntısı elde edilmiştir ($R^2$= 0.75). Aynı çalışmada tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen bağıntının belirleme katsayısı $R^2$= 0.82 olup aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\phi_r = 122\, I_p^{-0.565} \qquad \textbf{(2.13)}$$

Ataç (2009) tarafından yapılan çalışmada 15 farklı numune üzerinde yapılan halka kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında Çizelge 2.8'de verilen bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntıların grafik gösterimi ise Şekil 2.52'de verilmiştir.

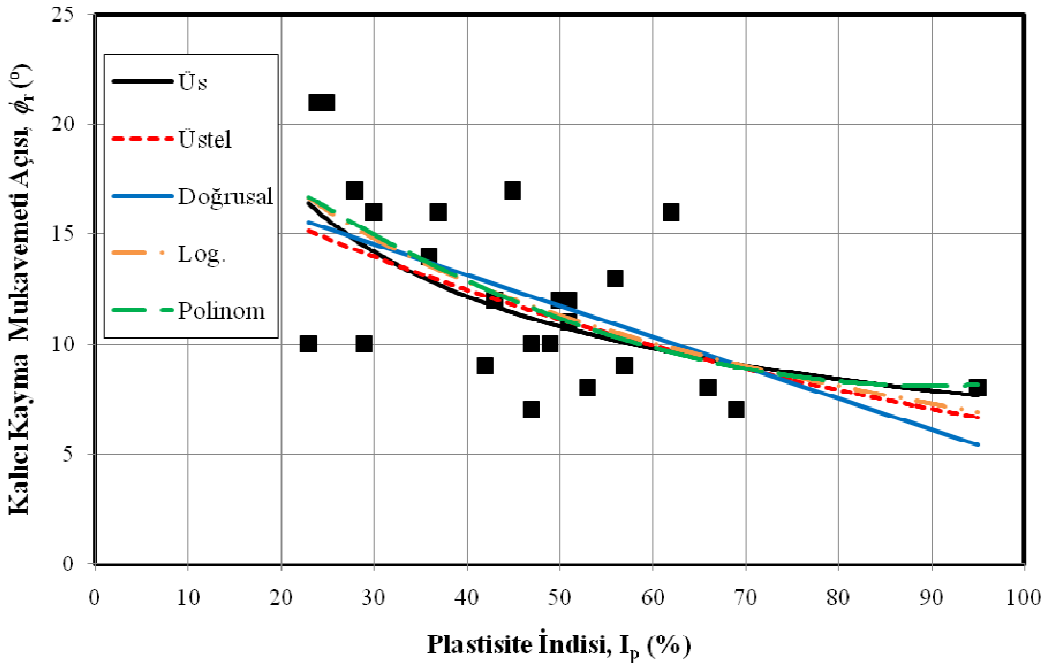
**Çizelge 2.8 :** Ataç (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$I_p$ bağıntıları.

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




**Şekil 2.52 :** Ataç (2009) tarafından verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

Ürkmez (2009) tarafından yapılan çalışmada ise tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti likit limit ilişkisi incelenmiştir. 24 numune üzerinde yapılan deney sonuçları kullanılarak Çizelge 2.9 ve Şekil 2.53'te verilen bağıntılar elde edilmiştir.

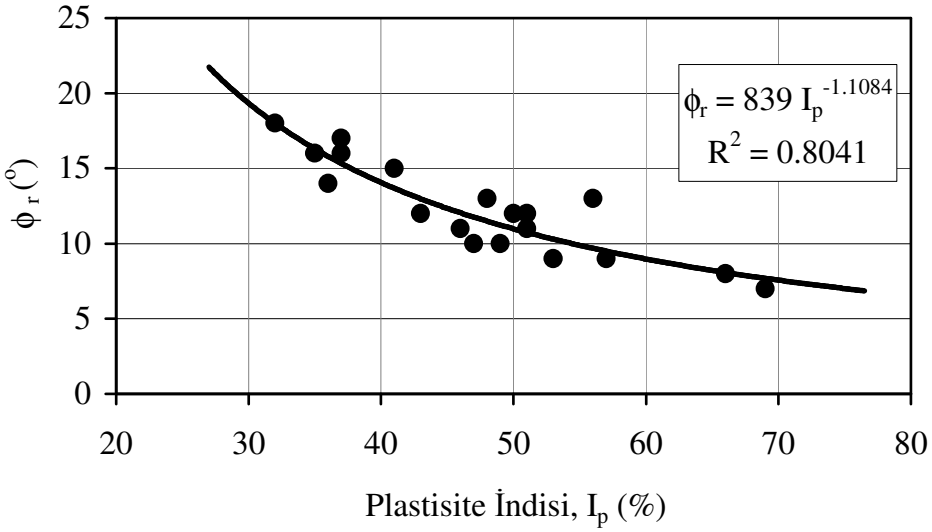



**Şekil 2.53 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.9 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$I_p$ bağıntıları.

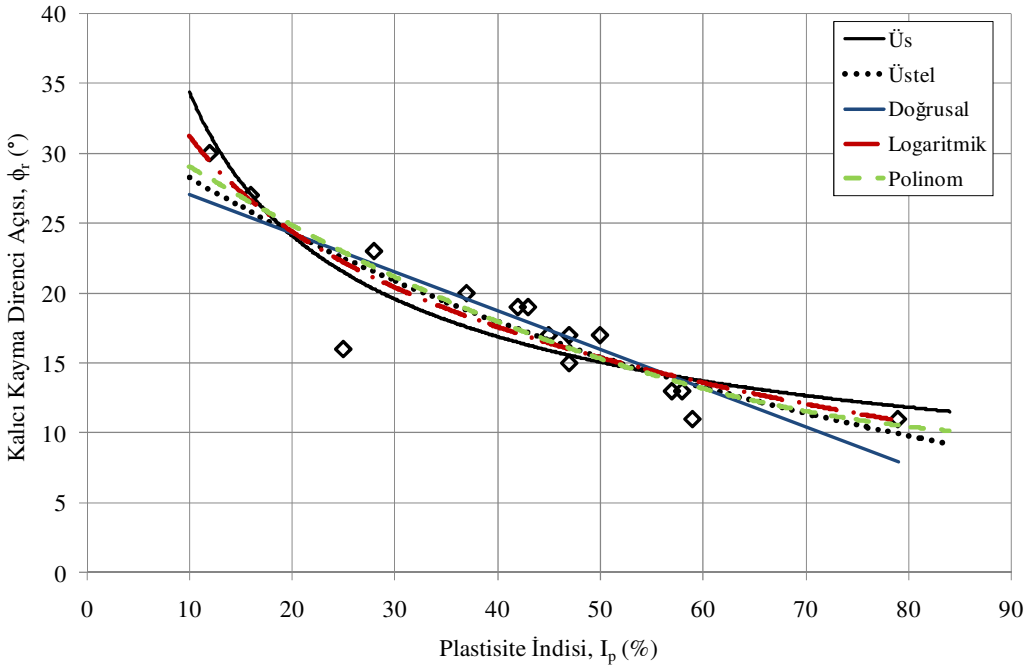
| Tip | Bağıntı | $R^2$ |
|---|---|---|
| Üs | $\phi_r = 88.6I_P^{-0.54}$ | 0.35 |
| Üstel | $\phi_r = 19.69e^{-0.01IP}$ | 0.33 |
| Doğrusal | $\phi_r = -0.14I_P+18.8$ | 0.32 |
| Logaritmik | $\phi_r = -6.85\ln(I_P)+38.1$ | 0.36 |
| Polinom | $\phi_r = 0.002w_P^2-0.34I_P+23.58$ | 0.36 |

İyisan ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada 19 numune üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemetinin likit limite bağlı değişimi incelenmiştir. Şekil 2.54'te verilen kalıcı kayma mukavemeti açısı likit ilişkisinin belirleme katsayısı $R^2$= 0.80 olarak elde edilmiştir.




**Şekil 2.54 :** İyisan ve diğ. (2009) tarafından verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi.

Bayın (2011) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti plastisite indisi ilişkisi için Çizelge 2.10 ve Şekil 2.55'te verilen bağıntılar önerilmiştir.

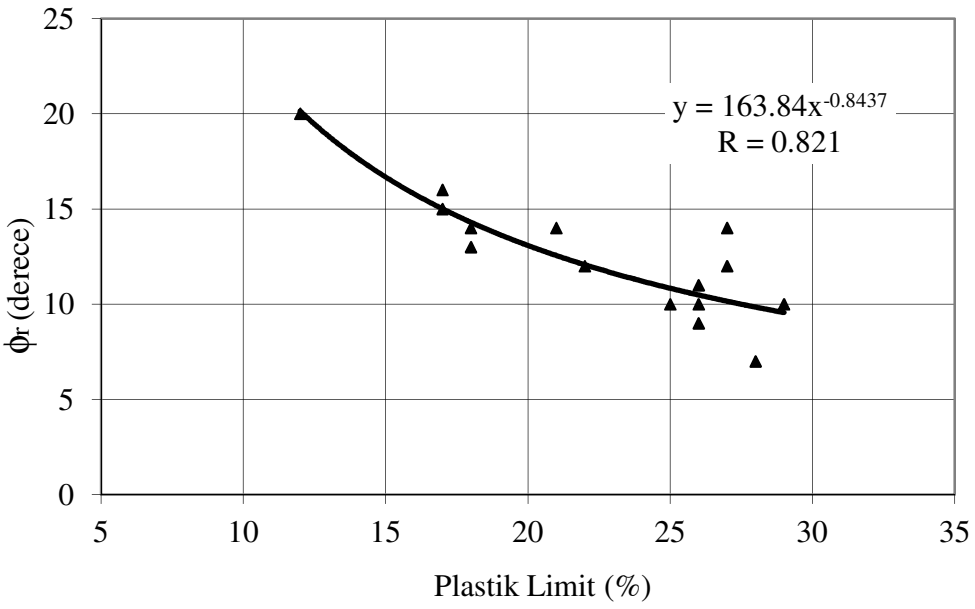



**Şekil 2.55 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.10 :** Bayın (2011) tarafından önerilen $\phi_r$-$I_p$ bağıntıları.

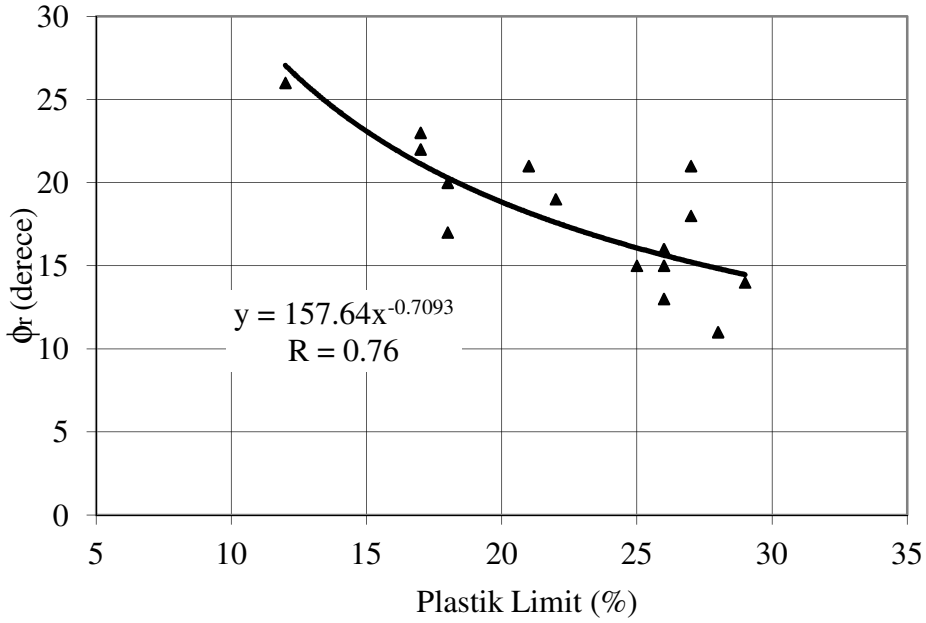
| Bağıntı Tipi | Bağıntı | $R^2$ |
|---|---|---|
| Üs | $\phi_r = 112.I_P^{-0.5}$ | 0.78 |
| Üstel | $\phi_r = 33e^{-0.02IP}$ | 0.81 |
| Doğrusal | $\phi_r = -0.3I_P+29.8$ | 0.79 |
| Logaritmik | $\phi_r = -9.8\ln(I_P)-54$ | 0.84 |
| Polinom | $\phi_r = 0.03I_P^2-0.45I_P-33.8$ | 0.82 |

Literatürde incelenen kalıcı kayma mukavemeti ile kıvam limitleri ilişkilerinden birisi de plastik limite bağlı ilişkilerdir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar diğer kıvam limitlerine göre daha sınırlı kalmaktadır. Yılmaz (2006) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastik limit ilişkisi Şekil 2.56 ve Şekil 2.57'de verilmiştir.




**Şekil 2.56 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).

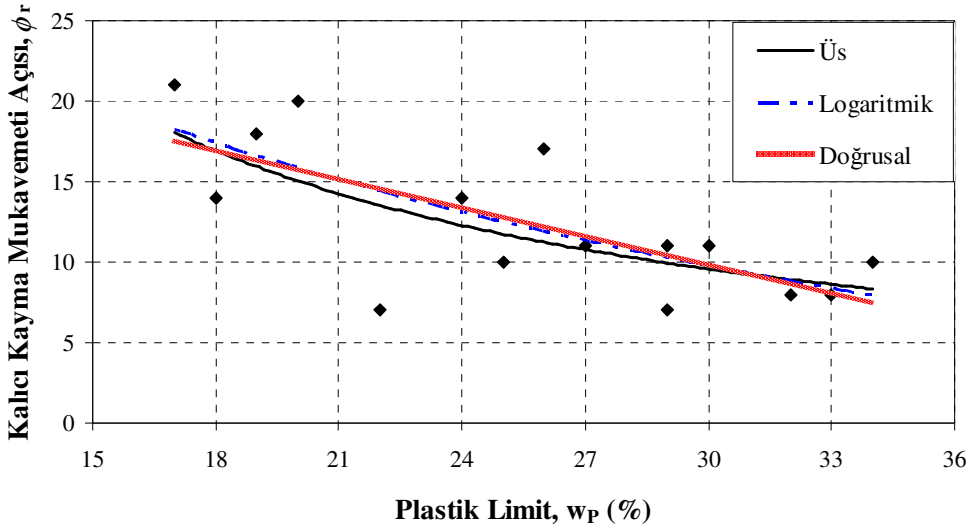
Ataç (2009) tarafında yapılan çalışmada 15 farklı numune üzerinde yapılan halka kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında Çizelge 2.11'de verilen bağıntılar elde edilmiştir. Bu bağıntıların grafik gösterimi ise Şekil 2.58'de verilmiştir.




**Şekil 2.57 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).

**Çizelge 2.11 :** Ataç (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_p$ bağıntıları.

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

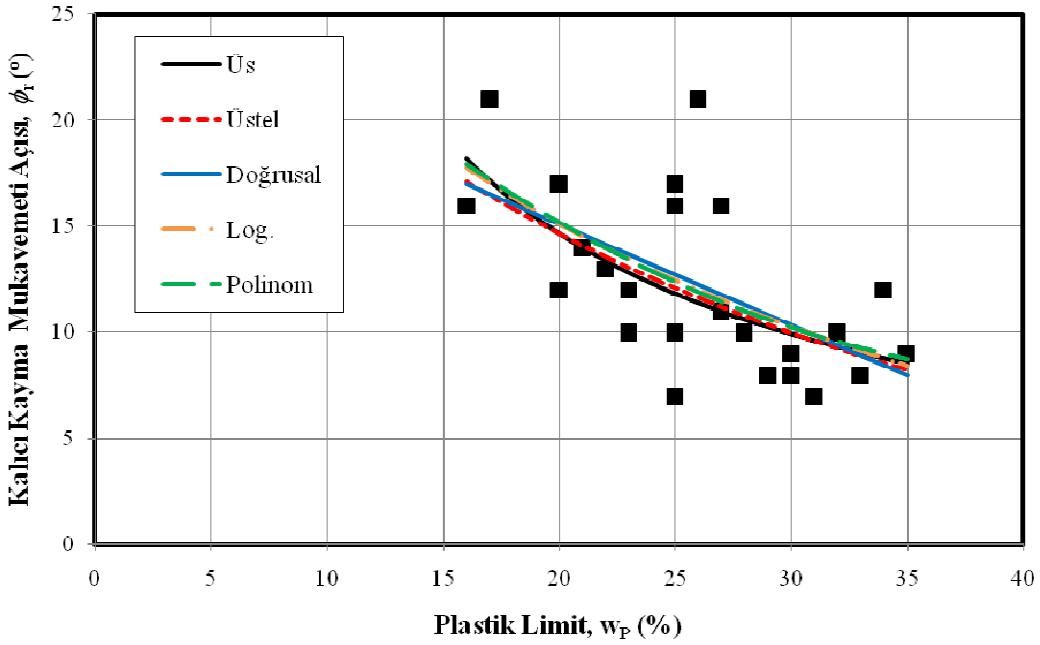



**Şekil 2.58 :** Ataç (2009)'da verilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

Ürkmez (2009) tarafından yapılan çalışmada tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kalıcı kayma mukavemeti plastik limit ilişkileri Çizelge 2.12 ve Şekil 2.59'da verilmiştir.

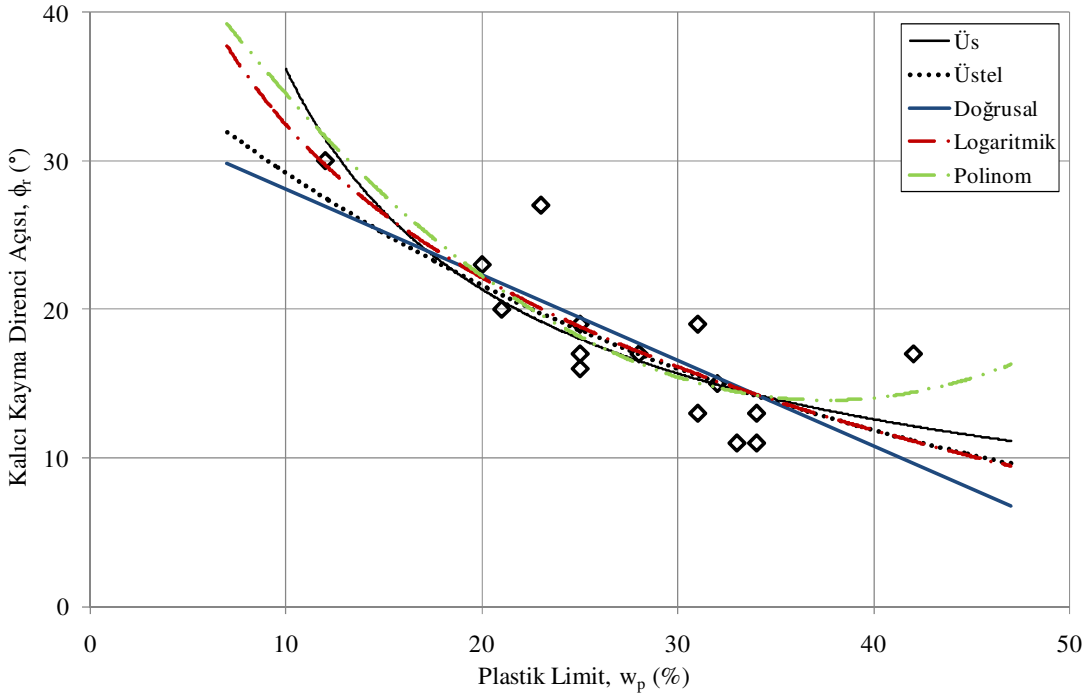
**Çizelge 2.12 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-$w_p$ bağıntıları.

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




**Şekil 2.59 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

15 numune üzerinde yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kalıcı kayma mukavemeti plastik limit ilişkisleri Bayın (2011) tarafından Çizelge 2.13 ve Şekil 2.60'ta görüldüğü gibi verilmiştir.




**Şekil 2.60 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen plastik limit kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

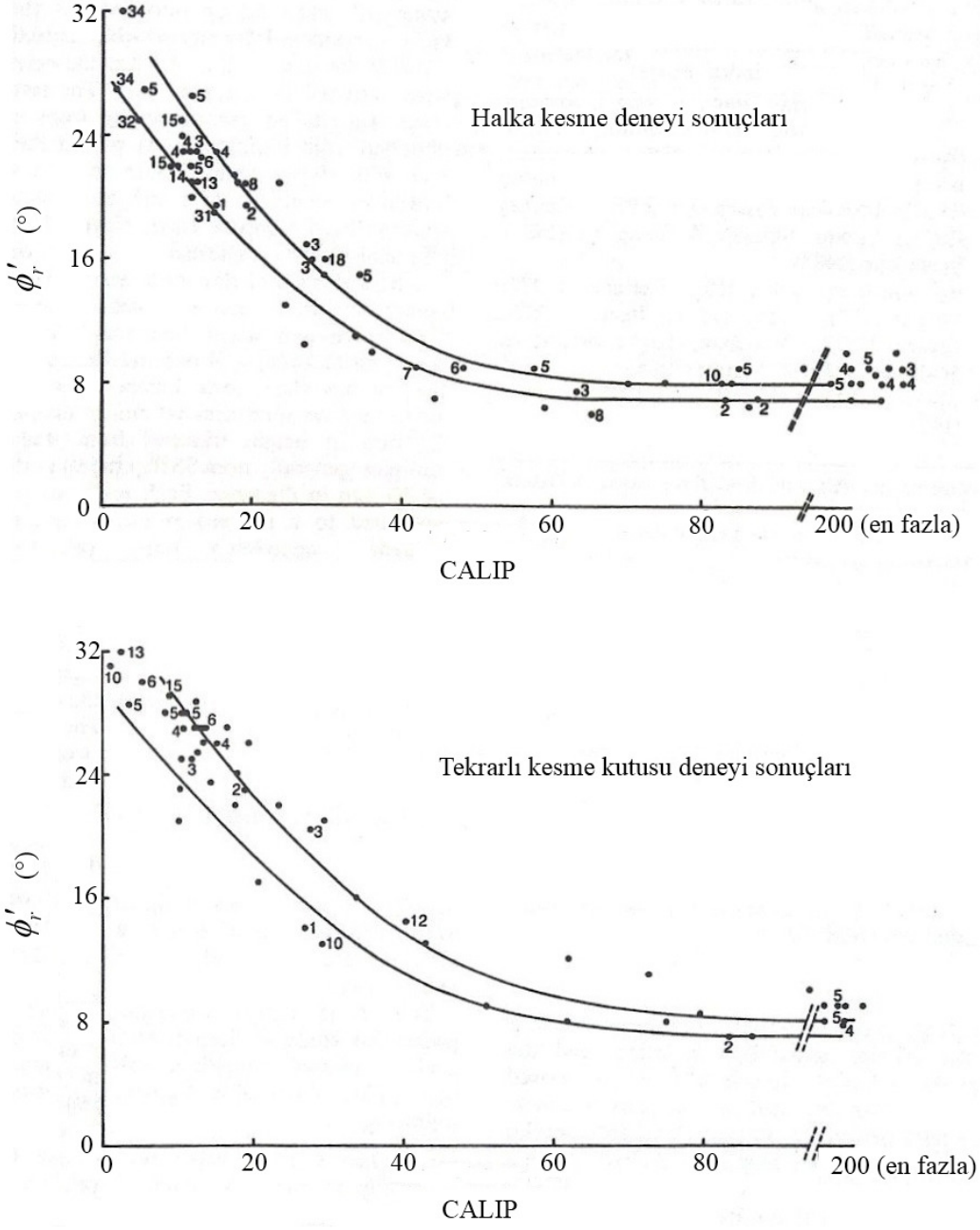
**Çizelge 2.13 :** Bayın (2011) tarafından verilen $\phi_r$-$w_p$ bağıntıları.

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

Literatürde sadece likit limit bazlı, sadece plastik limit veya sadece plastisite indisi bazlı korelasyonlardan başka birkaç parametrenin ortak olarak kapsama alındığı korelasyonlar da verilmiştir. Bunlardan bazılarına burada değinilecektir.

İtalya'da Autostrade Spa Otoyolu inşaatı kapsamında alınan numuneler üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu ve Bromhead tipi halka kesme deneyi sonuçlarına göre Collotta ve diğ. (1989)'de tanımlanan CALIP parametresi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki Şekil 2.61'de verilmektedir.

Yazarlar kalıcı mukavemeti tek bir zemin özelliğine bağlamayıp daha sağlıklı sonuçlar elde etmeyi amaçlamıştır. Grafikte verilerin yanındaki sayılar her bir numune için kum yüzdesini göstermektedir.



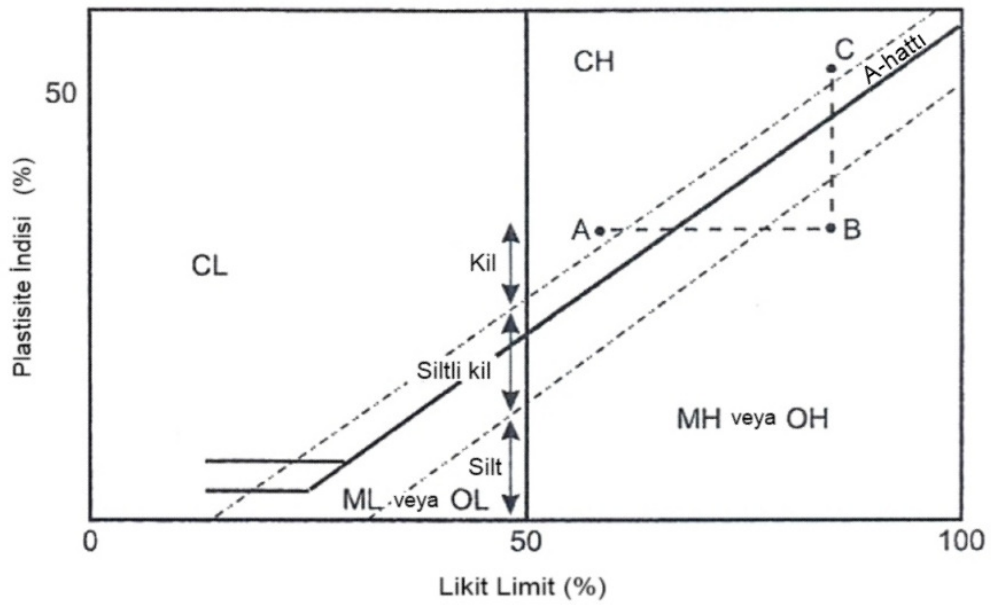

**Şekil 2.61 :** CALIP ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki, (Collotta ve diğ.,1989).

Sözü geçen CALIP parametresi yazarlar tarafından;

$$CALIP = KY^2 \times W_L \times I_p \times 10^{-5} \quad \textbf{(2.14)}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Denklemde kil yüzdesi (KY), likit limit (WL) ve plastisite indisi yüzde olarak kullanlmaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde halka kesme deneyi sonuçları tekrarlı kesme kutusu deneylerine göre daha düşük değerler vermekle beraber genel trend olarak benzer özellikler göstermektedir. Yazarlara göre CALIP değerinin % 60'tan büyük değerleri için her iki deneyin sonuçları birbirine yakın değerler almaktadır.

Wesley (2003) tarafından yapılan çalışmada temel yaklaşım olarak kohezyonlu zeminlerin sadece likit limitlerine veya sadece plastisite indislerine göre değil de sınıflandırılma sistemlerine benzer olarak Casagrande kartında bulundukları yere göre ilişkilendirilmelerinin daha doğru olacağı ifade edilmektedir. Buna gerekçe olarak Şekil 2.62'de verilen Casagrande kartındaki 3 numunenin yerini ve kıvam özelliklerini örnek göstermektedirler.




**Şekil 2.62 :** Casagrande plastisite kartı (Wesley, 2003).

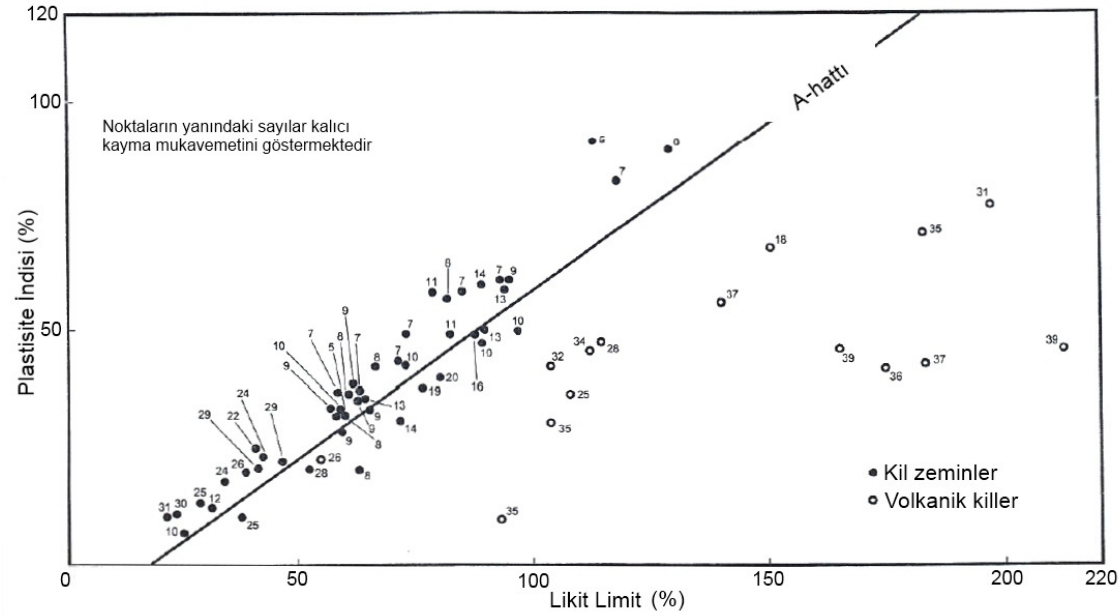
Şekilde görülen A, B ve C numunelerinden A ve B numunelerinin plastisite indisleri aynı olduğu gibi, B ve C numunelerinin ise likit limitlerinin aynı olduğunu temel alarak zemin sınıfları bile farklı olan numunelerin aynı özelliklere sahip olamayacaklarını savunmaktadırlar. A ve C numuneleri yüksek sıkışabilirliğe ve yüksek plastisiteye sahip numuneler olarak sınıflandırıldığı halde her iki zeminin kıvam limitleri değerlerinin aynı olmadığı ileri sürülmektedir.

Doğal çökel zemin tiplerinden ayrı olarak Şekil 2.63'te görüldüğü gibi örneğin volkanik kökenli zemin türleri plastisite kartında farklı yerleşime sahiptirler. Aynı zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti davranışı da doğal çökellerden farklı olduğu bilindiğinden Casagrande kartındaki yerleşimin bu konuda baz alınabileceği düşünülmüştür.

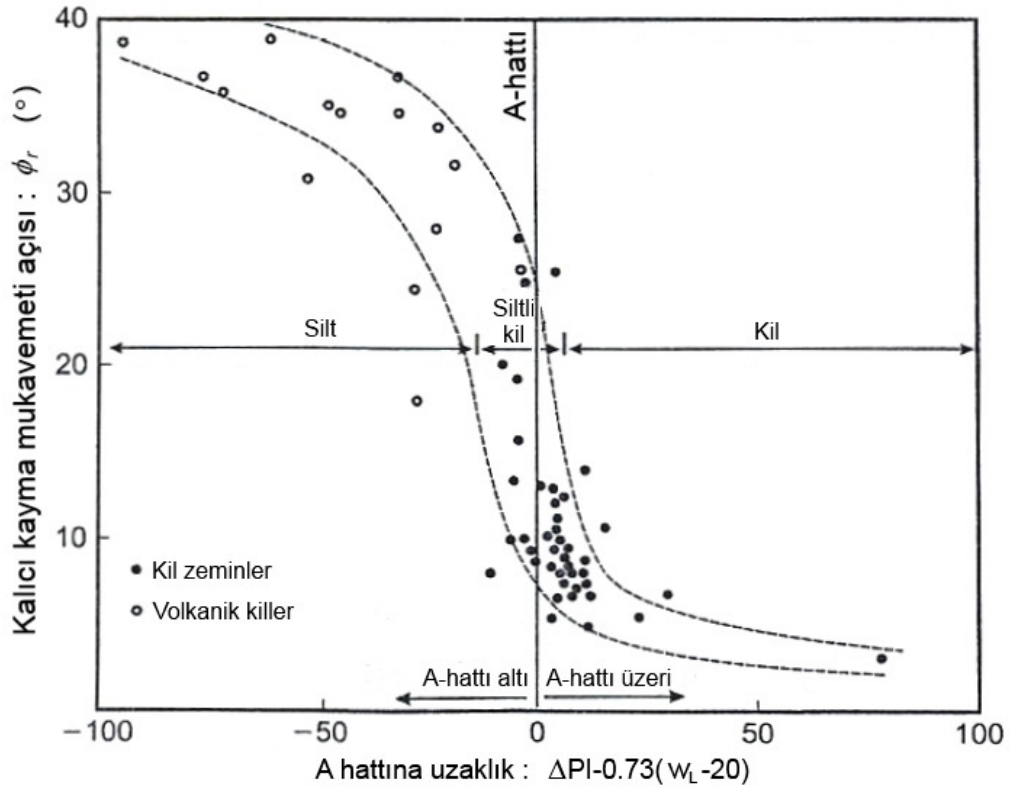
Bu noktada herhangi bir zeminin kıvam limitleri değerleri baz alınarak Casagrande kartında yer aldığı noktanın A hattına uzaklığı olarak tanımlanan;

$$\Delta PI = I_p - 0.73(w_L - 20) \qquad \textbf{(2.15)}$$

değeri ile kalıcı kayma mukavemeti arasında bir ilişki önermişlerdir. Bu amaçla literatürde verilen bazı çalışmalara ait verilerle birlikte yazar tarafından Bromhead tipi halka kesme deney aleti ile özellikle volkanik küller üzerinde yapılan halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak Şekil 2.64'te verilen korelasyon önerilmiştir. Yazar bu ilişkideki numunelerin likit limitinin % 50'den yüksek olduğunu özellikle vurgulamaktadır.




**Şekil 2.63 :** Wesley (2003)'de kullanılan numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleşimi.



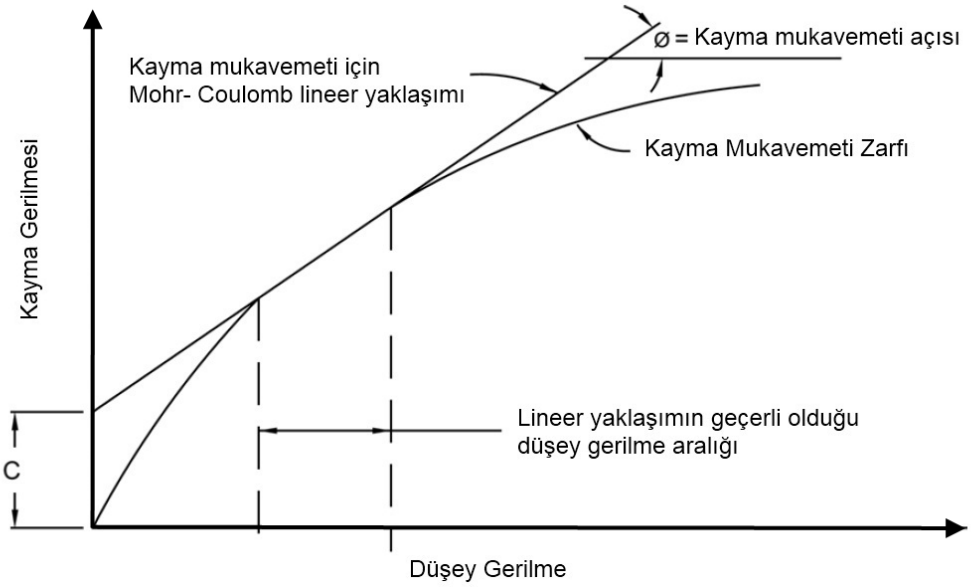

**Şekil 2.64 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile A-hattına uzaklık ilişkisi (Wesley, 2003).

Bu çalışmaya tartışma olarak yayınlanan yayında Sridharan ve Rao, yazarın savunduğu fikirlerin doğru olmasına rağmen bu korelasyonun bazı dezavantajları olduğunu ileri sürmektedir. Örneğin A hattına uzaklık değerinin ± 5 aralığında kalıcı kayma mukavemeti değeri 5° ile 25° arasında değişen değerler alabilmektedir. Zeminlerin genelde sıklıkla görüldüğü bu bölgede değişimin çok hassas olduğunu ifade etmektedirler. Buna ek olarak aynı A hattına uzaklık değerine sahip numunelerde kalıcı kayma mukavemetin geniş bir aralıkta seçilebileceğini söylemektedirler, örneğin ΔPI=9 değeri için kalıcı kayma mukavemetinin 8.1° ile 31.2° arasında alınabileceğini belirtmişlerdir.

### 2.3.2 Gerilme Seviyesinin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi

Mohr-Coulomb kayma hipotezine göre zeminlerin kayma mukavemeti kohezyon (c) ve daneler arasındaki sürtünme ($\sigma.\tan\phi$) olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir. Sürtünme bileşeni numuneye etkiyen normal gerilmeye bağlı olarak değişmekte, kohezyon terimi ise sabit bir değer olarak ortaya çıkmaktadır. Kalıcı kayma mukavemeti davranışı göz önüne alındığında, teorik olarak zeminlerin büyük

deformasyonlar yaparak eriştiği mukavemet olarak tanımlanan kalıcı mukavemet için artık bu seviyelerde daneler arası bağların koptuğu varsayıldığından kohezyon teriminin sıfırlandığı ve mukavemetin tamamen daneler arası sürtünmeden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 2.65'te görüldüğü gibi her ne kadar Mohr-Coulomb kırılma hipotezinde mukavemet zarfı doğrusal olarak ifade edilse de gerçekte hem pik değerlere göre çizilen mukavemet zarfı hem de kalıcı değerlere göre çizilen mukavemet zarfı doğrusal olmayıp eğrisel bir davranış sergilemektedir.



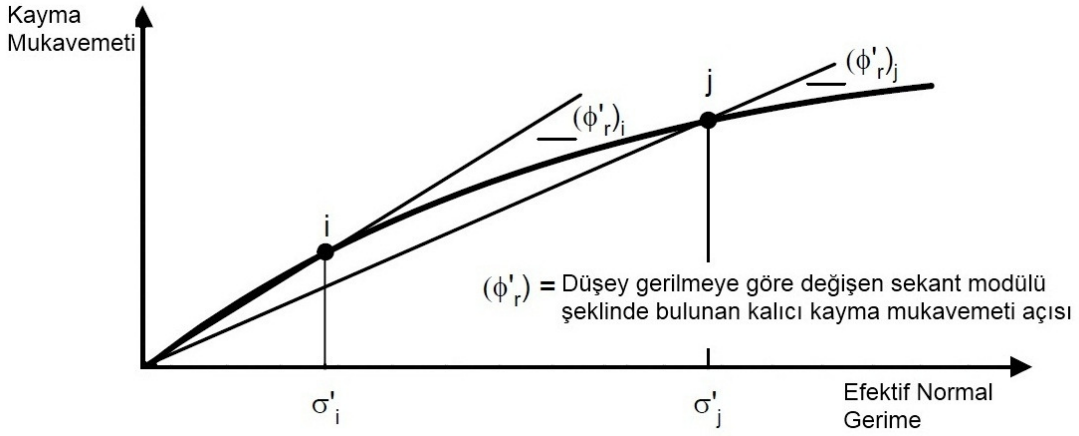

**Şekil 2.65 :** Kayma mukavemeti zarfı için lineer yaklaşım (Thiel, 2009).

Bu durumu göz önüne almak maksadıyla kalıcı mukavemeti açısı için her düşey gerilme seviyesinde;

$$\phi'_r = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{f,r}}{\sigma'_n}\right) \qquad \textbf{(2.16)}$$

şeklinde bir tanımlama yapılırsa mukavemet zarfının eğrisel olduğu daha kolay anlaşılabilmektedir. Şekil 2.66'da görüldüğü gibi mukavemet zarfı eğrisi üzerindeki "i" ve "j" noktaları için herbir noktaya karşılık gelen normal gerilme ve kayma gerilmesi değerleri kullanılarak başlangıç noktasından o noktaya çizilen doğrunun yatayla yaptığı açı, ilgili noktadaki kayma mukavemeti açısını vermektedir. Şekilde görüldüğü üzere bu açı her bir noktada farklılık göstermektedir. Zarf eğrisinin eğimindeki değişim normal gerilmenin artışı ile birlikte azamakta, belli bir düşey gerilmeden sonra ise sabitleşmektedir. Bu noktada kritik değişimler özellikle efektif

düşey gerilmenin düşük olduğu seviyelerde meydana gelmekte, düşey gerilmenin artışı ile değişim miktarları önem arzetmeyecek seviyelere düşmektedir.




**Şekil 2.66 :** Kayma mukavemeti zarfının eğriselliği (Maksimovic,1989).

Efektif gerilme şartlarında verilere en uygun şekilde çizilen doğrusal mukavemet zarfı için ekstrapolasyonla lineer doğru uzatıldığı zaman "0" normal gerilme seviyesine karşılık gelen fiktif bir kohezyon değeri elde edilmektedir. Bu fiktif kohezyon değeri gerçekte olmasa da mukavemet zarfının eğriselliğinin hesaba katılmamasından dolayı oluşmaktadır.

Kenney (1967)'de farklı saf kil mineralleri üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen mukavemet zarfları verilmiştir. Kenney (1967)'de bu eğriliğin sebebi tam olarak açıklanamasa da kayma düzlemine etkiyen normal gerilmenin artmasıyla yassı kil daneciklerinin yönlenme derecesinin artması bu davranışın gerekçesi olarak sunulmaktadır.

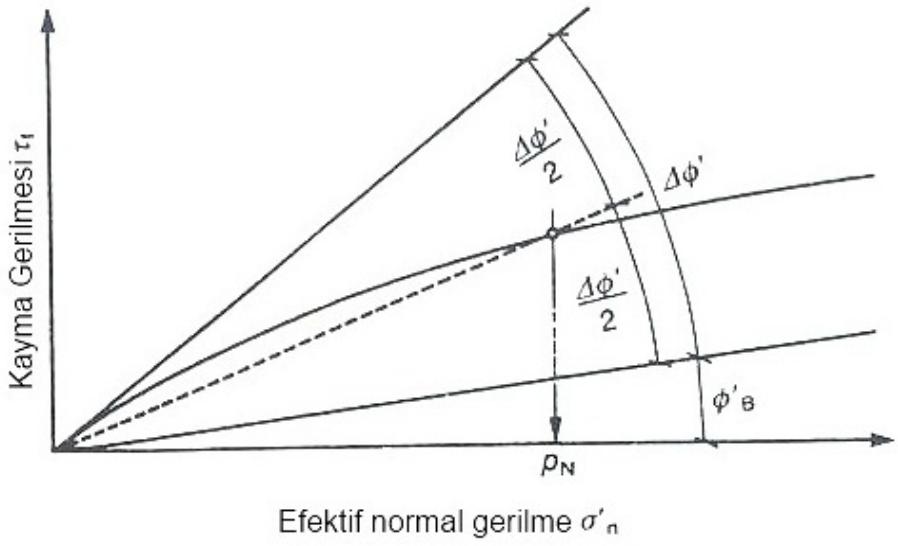
Bazı araştırmacılar ise mukavemet zarfının çizilmesi yerine aşağıda verilen farklı gerilme seviyelerinde yapılan deneylerde elde edilen kalıcı kayma gerilmesinin o deneye ait düşey normal gerilmeye oranını $\left(\tau_{f,r}/\sigma_n^{'}\right)$ kullanmaktadırlar. Bu sayede eğriselliğin hesaba katılmaması nedeniyle yapılan hatanın bertaraf edildiği düşünülmektedir.

Maksimovic (1989) tarafından yapılan öneride ise kalıcı kayma mukavemeti açısı, mukavemet zarfının hiperbolik bir yapıya sahip olduğu kabulü ile;

$$\phi'_r = \phi'_{B,r} + \frac{\Delta\phi'_r}{\left(1 + \frac{\sigma_n'}{p_{N,r}}\right)} \qquad \textbf{(2.17)}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Bu denklemdeki değerler Şekil 2.67'de verildiği üzere; $\phi'_r$: kalıcı kayma mukavemeti açısı, $\phi'_{B,r}$ :temel kalıcı kayma mukavemeti açısı, $\Delta\phi'_r$: maksimum açısal fark, $\sigma_n'$ :düşey normal gerilme, $p_{N,r}$ :medyan açıya karşılık gelen düşey gerilme olarak hesaba girmektedir.




**Şekil 2.67 :** Kayma mukavemeti zarfının eğriselliği (Maksimovic, 1989).

Düşey normal gerilmenin sıfır değeri için ($\sigma_n' = 0$) denklem; $\phi'_r = \phi'_{B,r} + \Delta\phi'_r$ halini almaktadır. Düşey normal gerilme sonsuza yaklaştığı zaman ($\sigma_n' \Longrightarrow \infty$) denklem; $\phi'_r = \phi'_{B,r}$ halini almaktadır ki bu da bilinen kayma mukavemeti açısına karşı gelmektedir. Bu nedenle "$\phi'_{B,r}$" ile gösterilen açı özellikle yüksek kil yüzdesine sahip zeminlerde ve yüksek normal gerilmeler altında kayma yüzeyinde dane yönelimlerinin de mükemmel oluştuğu durumdaki kayma mukavemeti açısı olarak da tanımlanabilmektedir. Denklemin ikinci kısmı $\Delta\phi'_r$ olarak gösterilen maksimum açısal farkı ve düşey gerilme seviyesine bağlı hiperbolik bir fonksiyonu içermektedir. Maksimum açısal fark olarak tanımlanan açı "0" efektif gerilme için hesaplanan kayma mukavemeti açısı ile temel kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki farkı temsil etmektedir. Bu açısal farkın açıortayı çizildiğinde kayma mukavemeti düşey

efektif gerilme eğrisini kesen noktanın apsisi medyan açıya karşılık gelen düşey gerilme olarak tanımlanmaktadır.

En az üç farklı efektif düşey gerilemede yapılan deneyler sonucunda, bu üç deneye ait düşey efektif gerilmeler ile bu düşey gerilmelere karşılık gelen kayma mukavemeti açıları kullanılarak $\sigma_{n,1}^{'} < \sigma_{n,2}^{'} < \sigma_{n,3}^{'}$ durumunda;

$$\frac{\phi_1' - \phi_2'}{\sigma_{n,2}^{'} - \sigma_{n,1}^{'}} > \frac{\phi_2' - \phi_3'}{\sigma_{n,3}^{'} - \sigma_{n,2}^{'}} \qquad \textbf{(2.18)}$$

şartı sağlandığı takdirde denklem çözülebilmektedir. Bu aşamadan sonra aynı hesap tarzı pik mukavemet zarfı içinde kullanılabiliceği için kalıcı mukavemeti gösteren r indisi kullanılmamıştır. Bu şartlarda (2.17) denklemi tekrar yazılırsa;

$$\phi^{'} = \phi'_0 - \frac{\sigma_n^{'}}{\left(a + \frac{b}{\sigma_n^{'}}\right)} \qquad \textbf{(2.19)}$$

olarak elde edilir. Düşey gerilmenin sonsuza gittiğinde kayma mukavemeti açısı asimptotik değer olan

$$\phi^{'}_B = \phi^{'}(\infty) = \phi'_0 - \frac{1}{b} \qquad \textbf{(2.20)}$$

denklemi ile ifade edilebilir. Bu denklem kullanılarak

$$b = \frac{1}{\phi'_0 - \phi^{'}_B} = \frac{1}{\Delta\phi'} \qquad \textbf{(2.21)}$$

eşitliği yazılabilir. Bune ek olarak $a = {p_n}/{\Delta\phi'}$ eşitliği dolayısı ile $p_n = a \times \Delta\phi'$ eşitliği yazılabilir. Bu durumda 2.19 denklemi

$$a + b\sigma_n^{'} = \frac{\sigma_n^{'}}{\left(\phi'_0 + \phi'\right)} \qquad \textbf{(2.22)}$$

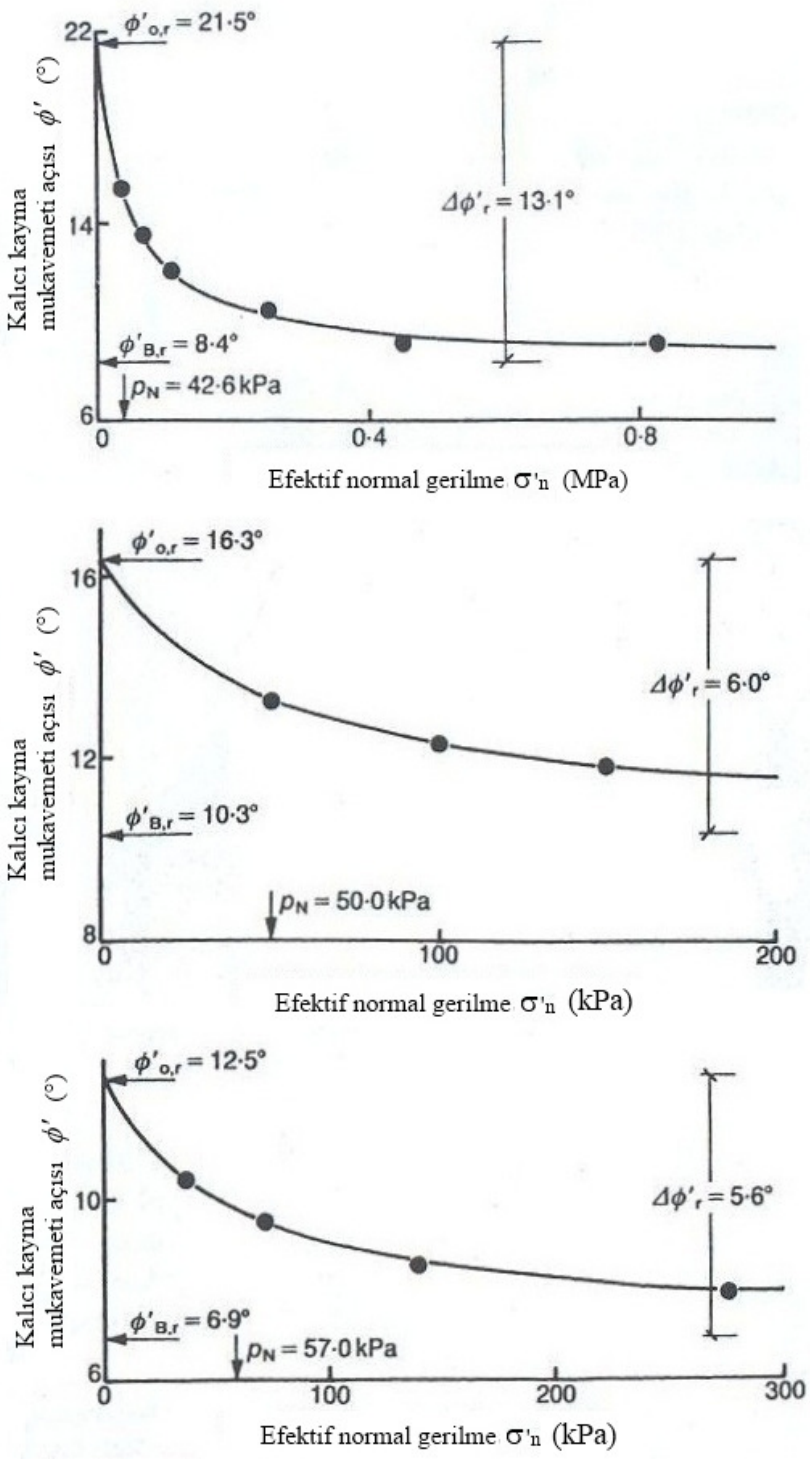
halini alır. 2.22 denkleminin sol tarafı doğrusal bir çizgidir. Denklemin sağ tarafı ise her bir düşey gerilme için $\phi'_0$ değeri için yapılan bir kabul ile elde edilebilir. Yapılan lineer regresyon sonucunda en düşük ortalama hatayı veren $\phi'_0$ değeri için a ve b katsayıları belirlenir. Bu denklemin çözümü için ne kadar fazla düşey gerilmede

deney yapılırsa hata o derecede azaltılmış olur. Bu yöntemin kullanılmasında dikkat edilmesi gerekn bir diğer konu ise yapılan deneyler sırasında en azından bir deneyin düşük düşey gerilme altında yapılması uygun olacaktır. Mukavemet zarfının eğriselliğinin gerçekte öne çıktığı düşey gerilmeler 100 kPa'ın altındaki düşey gerilmelerdir. Bu nedenle 100 kPa düşey gerilmenin üzerinde yapılan deneylerin sonucunda söz konusu eğriselliğin yakalanması pek mümkün değildir.

Şekil 2.68'de Maksimovic (1989) tarafından verilen üç farklı numuye ait deney sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti açısının düşey gerilmelere göre değişimi görülmektedir. Şekilde ayrıca her bir numuneye ait düşey efektif gerilme seviyesine göre değişen kalıcı kayma mukavmeti açısı parametreleri de gösterilmiştir. Grafikler incelenirse numunelerin mukavemet zarflarının eğriselliğinin değiştiği gerilme seviyelerinin farklı olduğu görülmektedir. Örneğin en üstte verilen grafikte numune üzerinde yapılan en yüksek düşey gerilmeye sahip deney 0.8 MPa civarında iken diğer numuneler için bu değer 150 kPa ile 300 kPa civarındadır. Düşey gerilmenin değişimi ile kalıcı kayma mukavemeti açısındaki farklar da bir diğer faktör olarak göze çarpmaktadır. İlk numunede $\Delta\phi'_r$ olarak adlandırılan maksimum açısal fark 13.1° iken diğer numunelerde 6.0° ve 5.6° olarak belirlenmiştir. Temel kayma mukavemeti açılarında $\phi'_{B,r}$ çok büyük farklar olmamasına rağmen eğriliğin değiştiği aralıkta büyük farklar gözlenmektedir. Aynı şekilde medyan açıya karşılık gelen düşey efektif gerilmelerinde $p_{N,r}$ çok değişmediği görülmektedir.

Skempton(1985)'e göre kili zeminlerin çoğunda kalıcı kayma mukavemeti zarfı non-lineer davranış sergilemektedir. Yazarın araştırmada kullandığı numunelere ait sekant açı şeklinde hesaplanmış kalıcı kayma mukavemeti açıları Çizelge 2.14'te verilmiştir. Standart bir yöntem olmamakla beraber yazar sekant açı olarak hesaplanan kalıcı kayma kukavemeti açılarının, 100 kPa düşey gerilmede elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısına normalizasyonunu önermektedir.

Çizelge 2.15'te çalışmada kullanılan numunelerin farklı gerilmelere göre normalizasyonu yapılmış sekant açılarının ortalamaları görülmektedir. Beklendiği üzere 100 kPa değerinin altında $\tan\phi$ / $\tan\phi_{100}$ oranı için 1'den büyük değerler görülürken, 100 kPa'ın üstündeki gerilmelerde bu oran 1'den küçük olmaktadır.




**Şekil 2.68 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısının efektif gerilmeye bağlı değişimi (Maksimovic,1989).

Yani 100 kPa altı düşey gerilmelerde gerilme azaldıkça kalıcı kayma mukavemeti açısı artmakta, 100 kPa üstü düşey gerilmelerde ise kalıcı kayma mukavemeti açısı azalmaktadır. Ancak $\tan\phi$ / $\tan\phi_{100}$ oranı genelde normalize "1" değerine göre çok fazla değişiklik göstermemektedir. Ayrıca kalıcı mukavemet zarfının lineer olarak kabul edilmesiyle özellikle düşük seviyeli düşey gerilmelerde güvenli tarafta

kalındığı da aşikar olduğundan sonuç olarak yapılacak tasarımlarda kalıcı kayma mukavemeti zarfının lineer olarak kabulü özellikle kullanışlılık açısından herhangi bir sorun teşkil etmemektedir.

**Çizelge 2.14 :** Deney yapılan numunelere ait sekant kalıcı kayma mukavemeti açıları (Skempton, 1985).

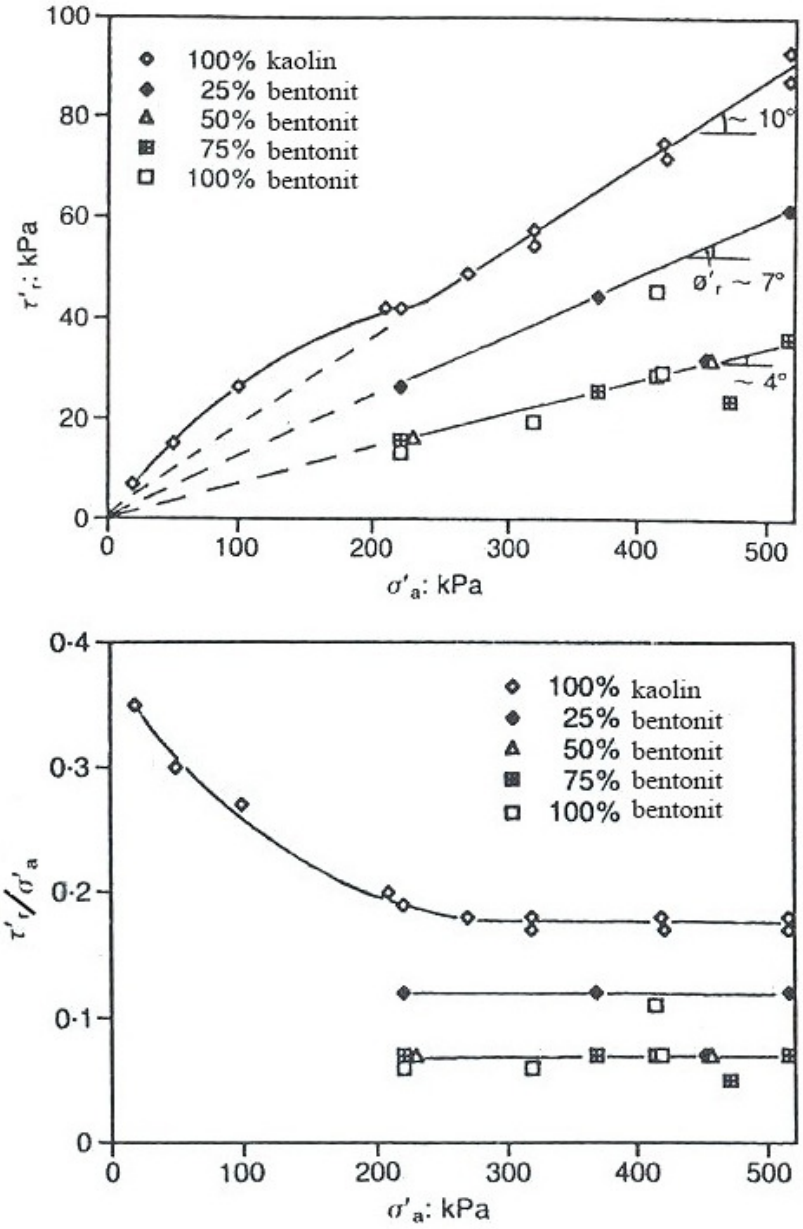
| **Numunenin Alındığı Yer** | $\phi_{r,f} = \tan^{-1}(\tau_{r,f}/\sigma'_n)$ (°) | | |
|---|---|---|---|
| | **50 kPa** | **100 kPa** | **150 kPa** |
| Walten's Wood | 13.8 | 13.2 | 12.8 |
| Jackfield | 16.8 | 13.2 | 12.8 |
| Bury Hill | 13.4 | 12.5 | 12.1 |
| Çeşitli | 12.7 | 11.0 | 9.9 |
| M4, Swindon yakınları | 14.0 | 14.0 | - |
| Sevenoaks bağlantı yolu | 13.4 | 12.0 | 11.1 |
| Çeşitli | 13.3 | 12.3 | 11.8 |

**Çizelge 2.15 :** Numunelerin sekant kalıcı kayma mukavemeti açıları ortalamaları.

| $\sigma'_n$ **(kPa)** | 25 | 50 | 100 | 150 |
|---|---|---|---|---|
| $\tan\phi / \tan\phi_{100}$ | 1.12 | 1.07 | 1.00 | 0.96 |

Di Maio ve Fenelli (1994) tarafından yapılan çalışmada yazarlar 200 kPa düşey gerilmenin altındaki gerilmelerde mukavemet zarfının non-lineer, 200 kPa değerinden büyük gerilmelerde ise lineer davranış sergilediğini iddia etmektedir (Şekil 2.69).

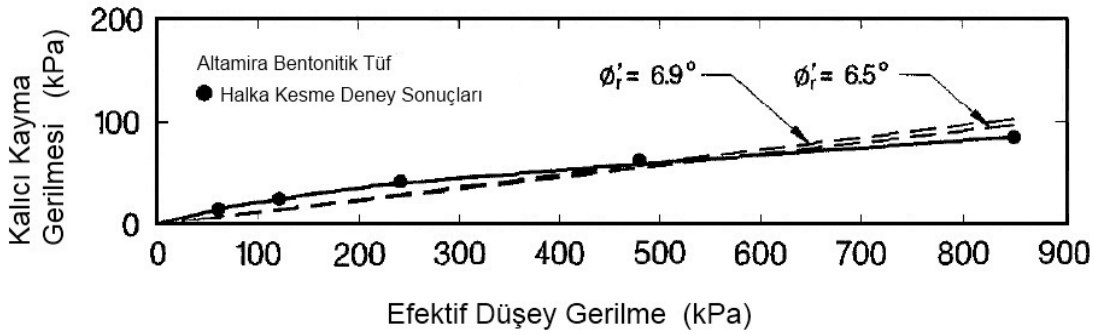
Stark ve Eid (1994) tarafından yapılan çalışmada da 32 farklı kil ve kiltaşı numuneleri üzerinde Bromhead tipi halka kesme deneyi aleti ile yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti zarfının doğrusal olmadığı ve bu kalıcı mukavemetin kalıcı kayma mukavemeti açısı olarak tek bir parametre ile temsil edilmemesi gerektiği savunulmaktadır. Özellikle yüksek likit limit ve aktivite değerlerine sahip zeminlerde kalıcı mukavemet zarfının eğriselliğinin daha da arttığı ifade edilmektedir.




**Şekil 2.69 :** Kalıcı kayma mukavemeti zarfları ve Sekant kalıcı kayma mukavemetinin düşey efektif gerilme ile değişimi (Di Maio ve Fenelli, 1994).

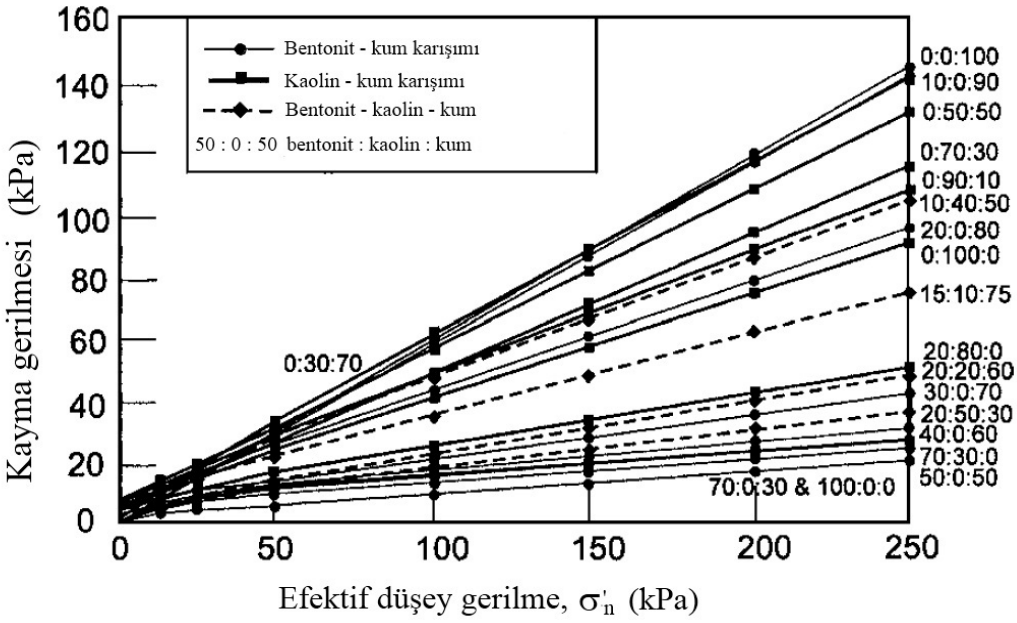
Yazarlara göre kil yüzdesi % 50'den büyük olan ve likit limiti % 60 ile % 220 arasında değişen zeminlerin mukavemet zarfı önemli derecede non-lineer davranış sergilemektedir. Şekil 2.70'de altamira bentonitik tüfü üzerinde yapılan deney sonuçları görülmektedir. Şekilde non-lineer mukavemet zarfı ile birlikte iki farklı lineer mukavemet zarfı tahmini yer almaktadır. 6.5°'lik açısı bulunan zarf düşey gerilmenin 300 kPa ile 640 kPa arasındaki bölgenin orijin noktası ile birleştirilmesi ile elde edilmiştir. 6.9°'lik açıya ait mukavemet zarfı ise sekant mukavemet açısına

göre 500 kPa düşey gerilme için Şekil 2.81 ve Şekil 2.82'den elde edilen mukavemet zarfıdır.




**Şekil 2.70 :** Altamira bentonitik tüfünün kalıcı mukavemet zarfının eğriselliği (Stark ve Eid, 1994).

Tiwari ve Marui (2005) tarafından yapılan çalışmada ise numunelere ait kalıcı kayma mukavemeti zarfları genellikle lineer veya lineerliğe oldukça yakın şekilde çıkmıştır (Şekil 2.71). Yazarlara göre numunelerin büyük çoğunluğunda kalıcı mukavemet zarfı lineer regresyon yöntemi kullanılarak çizildiğinde belirleme katsayısı $R^2$= 0.99'dan büyük değerler almaktadır. Çizilen zarflarda fiktif olarak ortaya çıkan kohezyon değerleri, çoğunluğu 5 kPa'dan küçük olmak üzere 0 ile 10 kPa arasında değişmektedir.




**Şekil 2.71 :** Kalıcı kayma mukavemeti zarfları (Tiwari ve Marui, 2005).

### 2.3.3 Kil yüzdesi

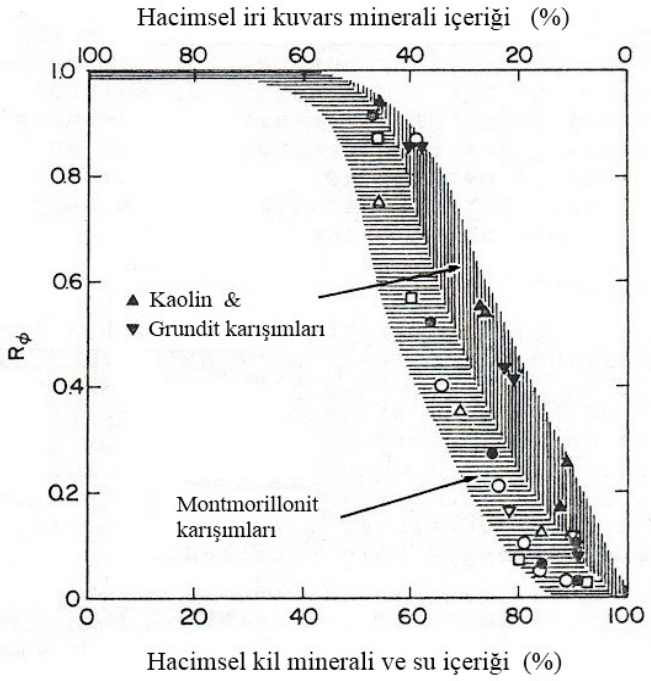
Kalıcı kayma mukavemetine etkiyen önemli parametrelerden birisi de zeminin içerdiği kil minerallerinin ve kil boyutlu danelerin tipi ve miktarıdır. Bunun ana sebebi ise dane boyutunun artması ile mukavemet davranışında daneler arası sürtünmenin etkin olması ve zeminlerin pik mukavemetleri ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki farkın azalmasıdır. Sonuç olarak zemin içeriğindeki kil danelerinin artması kayma yüzeyindeki davranışın değişmesine yol açmaktadır.

Kaolin, montmorillonit, mika, grundit, ticari olarak satılan bentonit ile quartz kumu karışımları kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonuçları kullanılarak Kenney (1977) tarafından yapılan çalışmada mineral tipinin etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada mineral tipi ile beraber kil minerallerinin (montmorillonit, bileşiminde su bulunan mika, kaolinit, ticari bentonit ve grundit) iri mineral olan kuvars minerali ile çeşitli oranlardaki karışımları kullanılarak kalıcı mukavemetteki değişimler incelenmiştir. Çalışma yapılan deney sonuçları değerlendirilerek rölatif kalıcı kayma mukavemeti ($R_\phi$) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$R_\phi = \frac{tan\phi_{r\ (karışım)} - tan\phi_{r\ (kil\ minerali)}}{tan\phi_{r\ (kuvars)} - tan\phi_{r\ (kil\ minerali)}} \qquad \textbf{(2.23)}$$

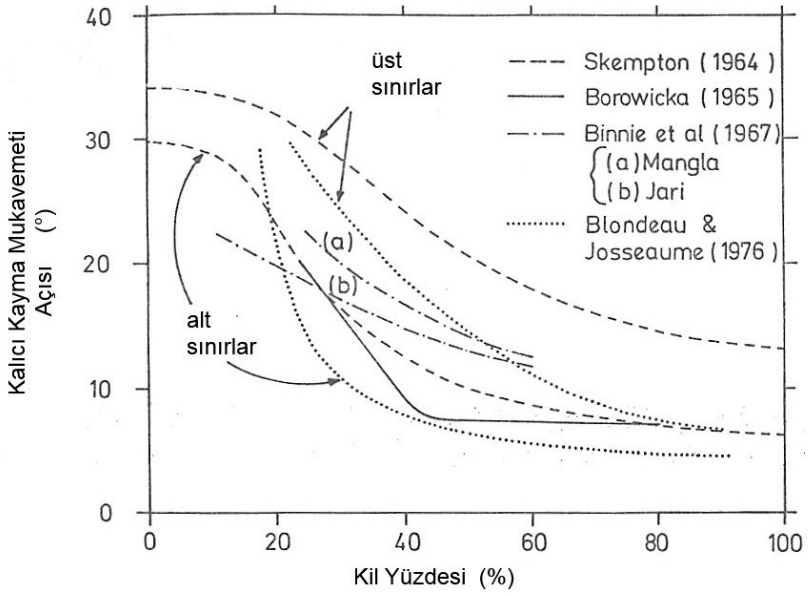
Karışımdaki kil minerali yüzdesi ile iri kuvars minerali yüzdesinin genel davranışa etkisini araştırmak amacıyla yukarıda sayılan her bir kil minerali ile quartz karışımları üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti ile karışımların ağırlıkça ve hacimce kuvars minerali ve kil minerali yüzdeleri birlikte değerlendirilmiş ve tanımlanan rölatif kalıcı kayma mukavemeti ($R_\phi$) parametresinin kil yüzdesi ve iri kuvars minerali yüzdesi ile ilişkisi Şekil 2.72'de verildiği gibi özetlemiştir. Literatürde verilen diğer çalışmalarla benzerlik göstermekle beraber kil minerallerinin değişiminin davranışın kil yüzdesine bağlı değişiminde bir ötelemeye sebep olduğu görülmektedir.

Lupini ve diğ. (1981) tarafından yapılan çalışmada, yazarlar öncelikle kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında literatürde verilen önceki korelasyonları Şekil 2.73'te görüldüğü gibi toplu halde vermiştir. Aynı çalışmada araştırmacılar 50 civarında farklı numune üzerinde NGI-tipi halka kesme deneyi kullanarak kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır.

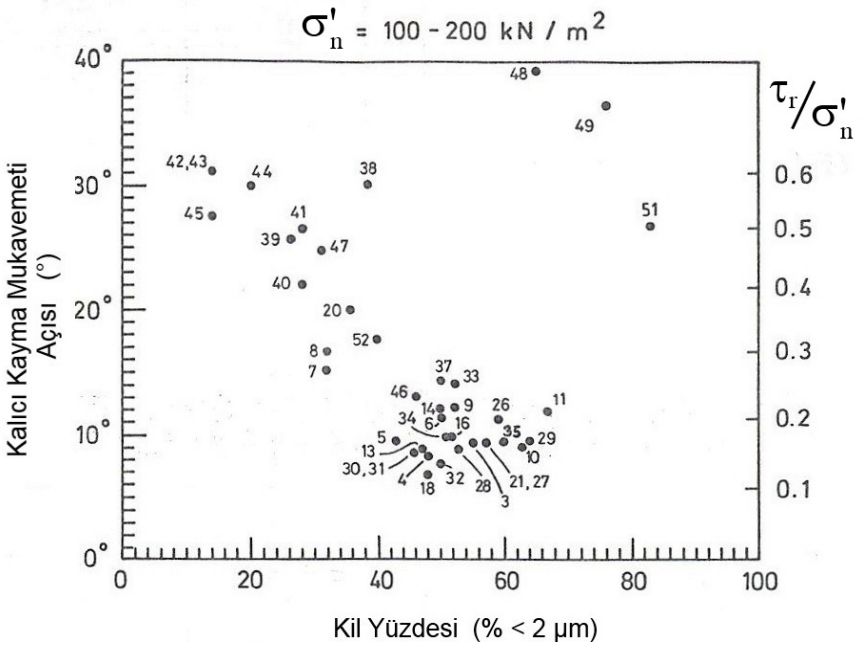



**Şekil 2.72 :** Rölatif kalıcı kayma mukavemeti ($R_\phi$) parametresinin kil yüzdesi ile ilişkisi (Kenney, 1977).

Yazarlara göre numunenin içerdiği kil malzeme miktarı ile kil boyutlu malzeme miktarları Bölüm 2.3.6'da tariflenen kesme modlarından hangisinin gerçekleşeceğini kontrol eden ana etkenlerden birisidir. Bu davranışı ortaya çıkarmak amacıyla farklı kum-bentonit karışımları üzerinde halka kesme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kalıcı kayma mukavemetinin kil yüzdesine bağlı değişimi Şekil 2.74'te verilmektedir.

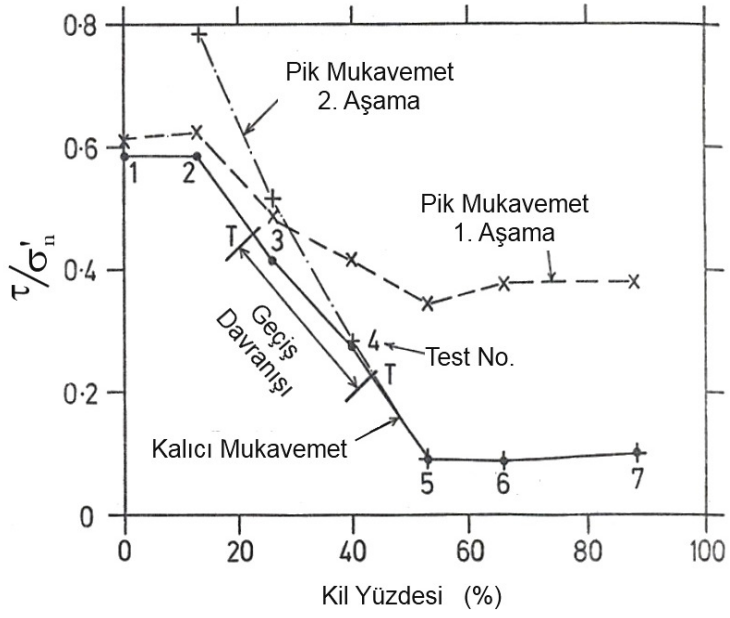



**Şekil 2.73 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981).




**Şekil 2.74 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Lupini ve diğ., 1981).

Lupini ve diğ. (1981)'de bunlara ek olarak kesme modu ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki de verilmiştir. Şekil 2.75'te görüldüğü gibi kalıcı mukavemet ile kil yüzdesi arasındaki ilişki aslında kesme modu ile kalıcı mukavemet ilişkisi ile doğrudan bağımlıdır.

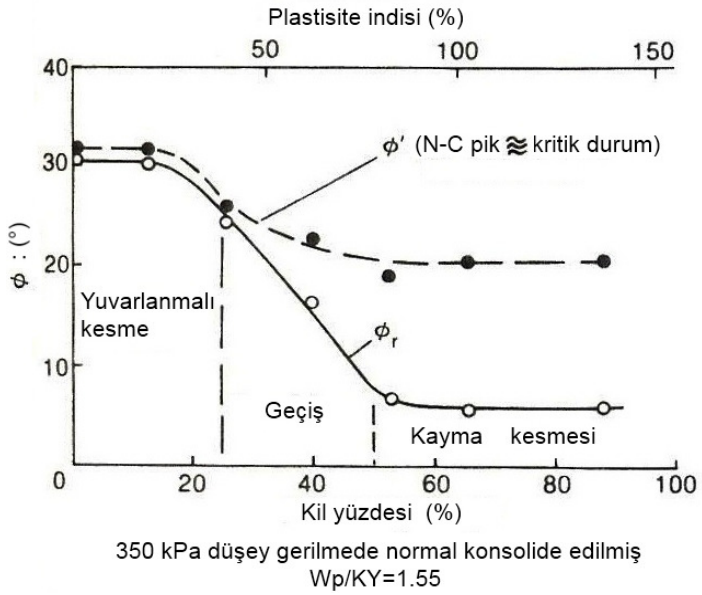



**Şekil 2.75 :** Kalıcı kayma mukavemetinin kil yüzdesine ve kesme moduna bağlı değişimi (Lupini ve diğ., 1981).

Düz çizgi ile gösterilen kil yüzdesi kalıcı mukavemet ilişkisi incelendiğinde kil yüzdesinin % 15 ile %50 arasındaki değerlerinde bir geçiş bölgesi bulunmakta ve bu

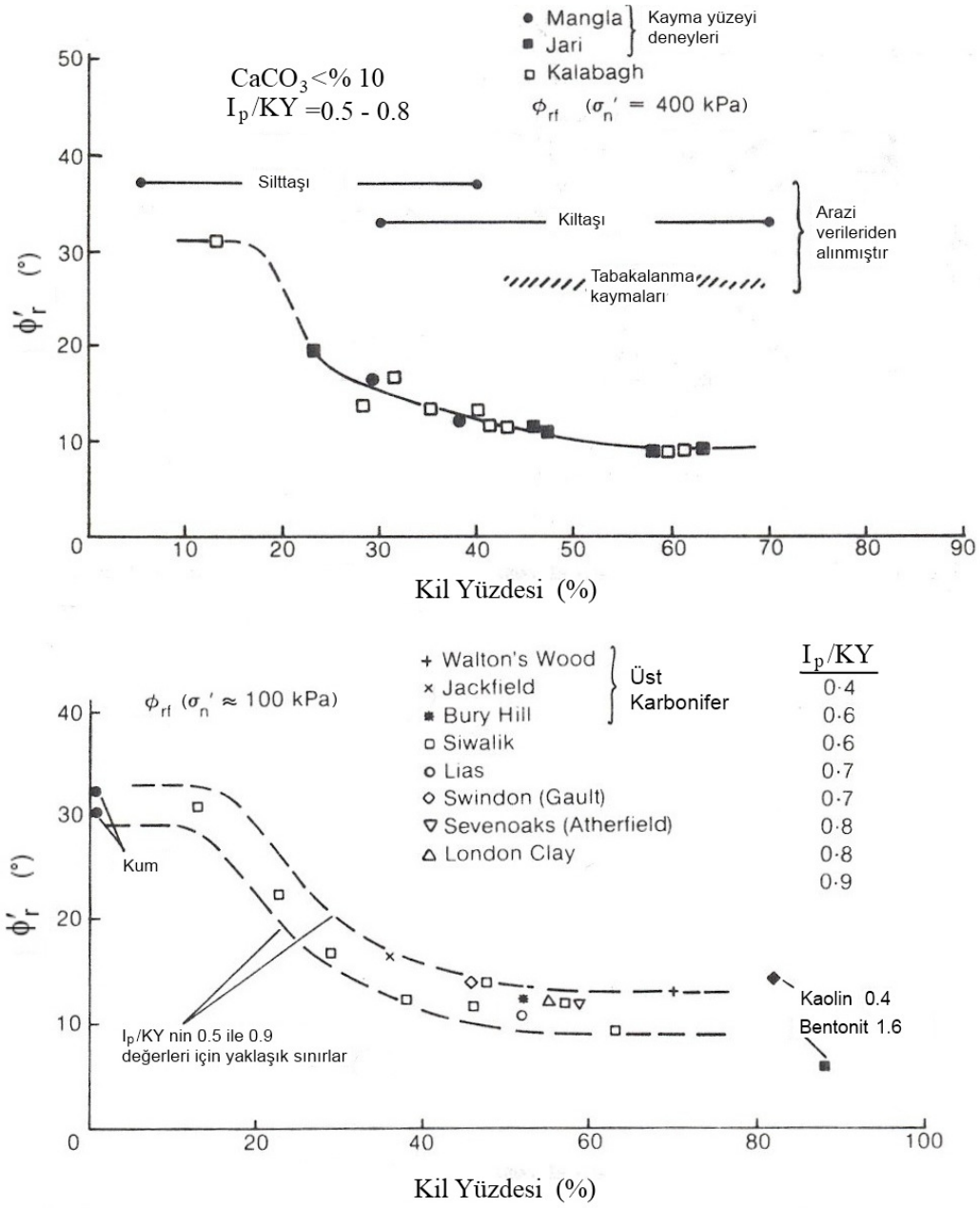
bölgede kalıcı mukavemet kil yüzdesinin artışıyla birlikte azalmaktadır. Kil yüzdesinin % 15'ten küçük değerlerinde sabit ve pik mukavemete yakın değerler elde edilirken, % 50'den büyük değerlerde ise yine sabit bir değer görülmekle beraber kalıcı mukavemet pik mukavemete göre çok daha düşük değerler almaktadır.

Kalıcı kayma mukavemeti ile ilgili önemli yayınlardan bir tanesi olan Skempton (1985)'te öncelikle Lupini ve diğ. (1981)'de verilen grafik (Şekil 2.75) yeniden düzenlenerek verilmiştir (Şekil 2.76).




**Şekil 2.76 :** Kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Skempton, 1985).

Aynı yayında Lupini ve diğ. (1981)'de görülen davranışa benzer bir davranış yazar tarafından verilen deney sonuçlarında da gözlenmektedir. Şekil 2.77'de görüldüğü gibi kil yüzdesinin artmasıyla kalıcı kayma mukavemetinin azaldığı görülmektedir. Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi kontrol eden en önemli parametrelerden birisi kesme modudur. Kil yüzdesinin değişimi kesme modunda değişime sebep olduğundan kalıcı kayma mukavemeti de buna bağlı olarak değişmektedir. Skempton (1985)'e göre kil yüzdesi, % 20'nin altında kaldığında kil minerallerinin kalıcı kayma mukavemetine çok az bir etkisi olmakta ve mukavemet kum ve silt danecikleri tarafından kontrol edilmekteyken, bunun aksine % 50'den daha yüksek kil içeriğinde ise kalıcı mukavemet tamamen kil danecikleri kontrolünde gelişmektedir. Şekil 2.77'de alttaki grafikte verilen deney sonuçları Ip/KY oranları 0.4 ile 0.9 arasında değişen numunelere aittir.

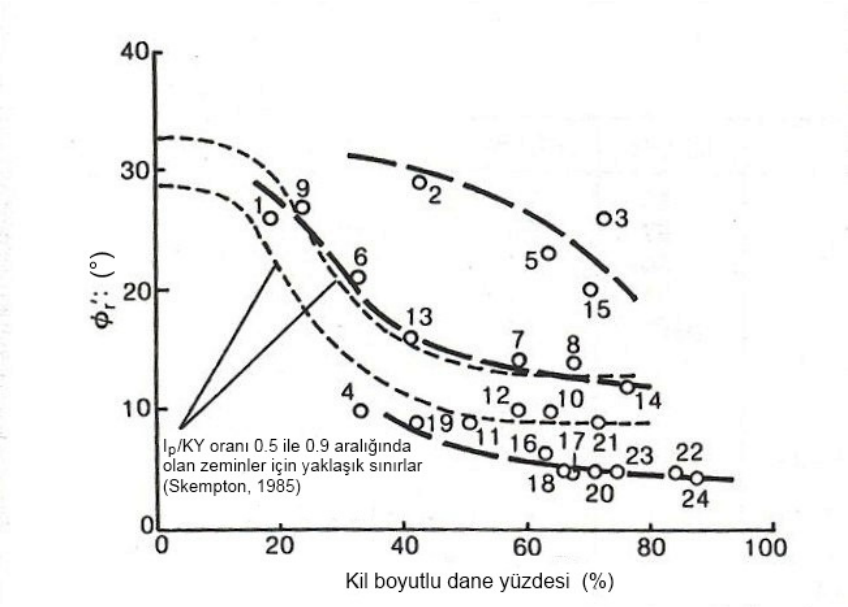



**Şekil 2.77 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Skempton, 1985).

Bunlara ek olarak grafikte saf kaolin ve saf bentonit için kalıcı kayma mukavemeti değerleri de görülmektedir. Yazarlara göre 2 μm'den küçük, haloysit gibi kil mineralleri veya ufalanmış taş tozu gibi yassı olmayan kil daneciklerinden oluşan zeminlerin kil boyutlu malzeme içerikleri çok yüksek olsa bile kalıcı kayma mukavemet açıları 25° gibi göreceli olarak yüksek değerler alabilmektedir.

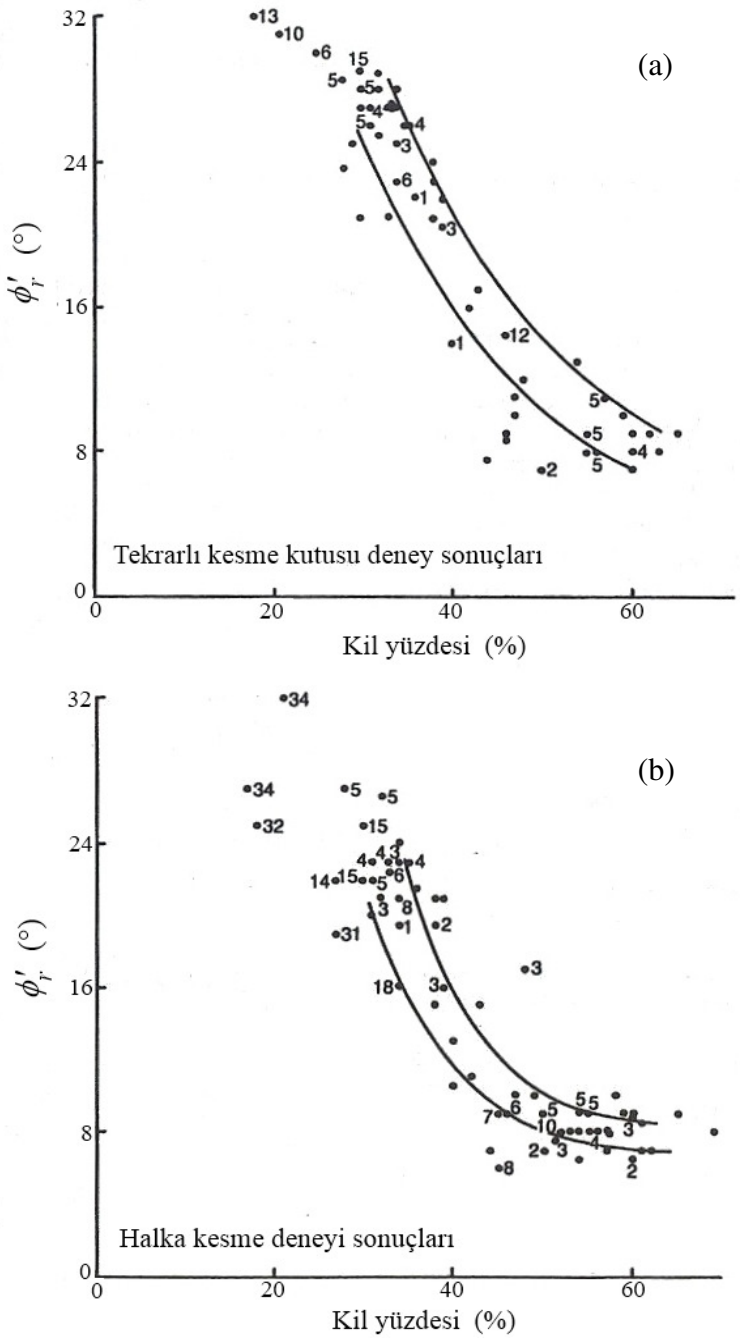
Mesri ve Cepeda-Diaz (1986)'da, 24 farklı kil numune üzerinde önceden kesilerek hazırlanmış numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılarak kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan deney verileri, belirledikleri sınır çizgileri ile birlikte Skempton (1985)'te verilen alt ve üst sınır çizgileri Şekil 2.78'de verildiği gibi karşılaştırılmıştır. Yazarlara göre her iki çalışma genel olarak birbirine uyum göstermektedir, ancak özellikle yassı olmayan dane şekline sahip kil mineralleri içeren bazı numunelerin deney sonuçları uyumsuzluk göstermektedir.




**Şekil 2.78 :** Kil boyutlu dane yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısıs arasındaki ilişki (Mesri ve Cepeda-Diaz, 1986).

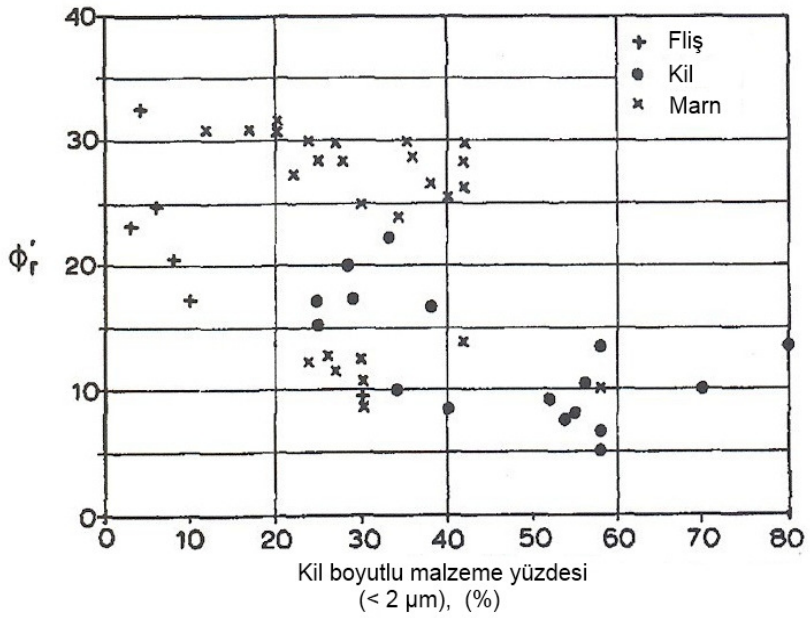
Collotta ve diğ. (1989)'da, literatürde verilen diğer çalışmalardan farklı olarak kalıcı kayma mukavemetin diğer parametrelerle tekil ilişkileri yerine zeminlein indeks özelliklerinden kil yüzdesi, likit limit ve plastisite indisinin ortak bir fonksiyonu olarak tanımladıkları CALIP parametresi ile ilişkisi verilmiştir. Aynı çalışmada kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ile ilişkisi de verilmiştir. Şekil 2.79-a ve Şekil 2.79-b'de de görüldüğü üzere çalışma kapsamında yapılan Bromhead tipi halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti bağlantısı incelenmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açısı için her iki deney türü için kil yüzdesinin % 30 - % 60 aralığında geçerli olan bir bant tanımlanmıştır. Grafiklerde % 30'dan daha düşük kil yüzdelerine sahip numunelere ait deney verileri olmasına rağmen bu aralık için bir bant tanımlanmaktan kaçınılmıştır. Şekillerde deney verilerinin yanında görülen sayılar o numuneye ait kum yüzdesini vermektedir.




**Şekil 2.79 :** (a)Tekrarlı kesme kutusu deneyi verilerine göre kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (b) Halka kesme deneyi verilerine göre kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Collotta ve diğ., 1989).

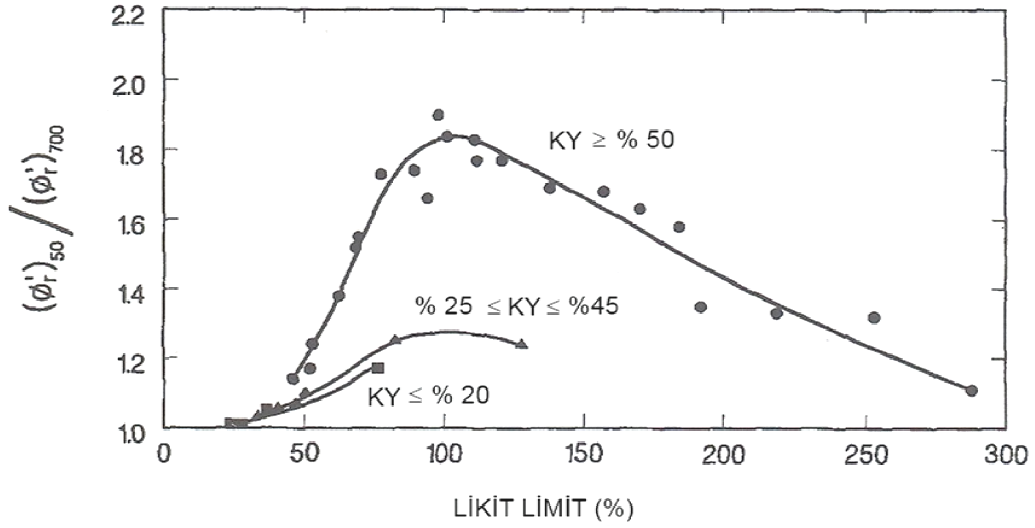
Kalteziotis (1993) tarafından Yunanistan'da bulunan killi zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti üzerine yapılan araştırmada Bromhead tipi halka kesme deney aleti kullanılarak killi zeminle üzerinde yapılan deneyler sonucunda kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişki elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.80'de görüldüğü gibi kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisinde genel bir eğilim olarak kil yüzdesinin artışıyla kalıcı mukavemetin düştüğü görülse de

verilerin geniş bir dağılım gösterdiği açık olarak görülmektedir. Bunun nedeninin kil yüzdesi olarak tanımlanan parametrenin içeriğinde minerolojik yapının dahil olmamasıdır.



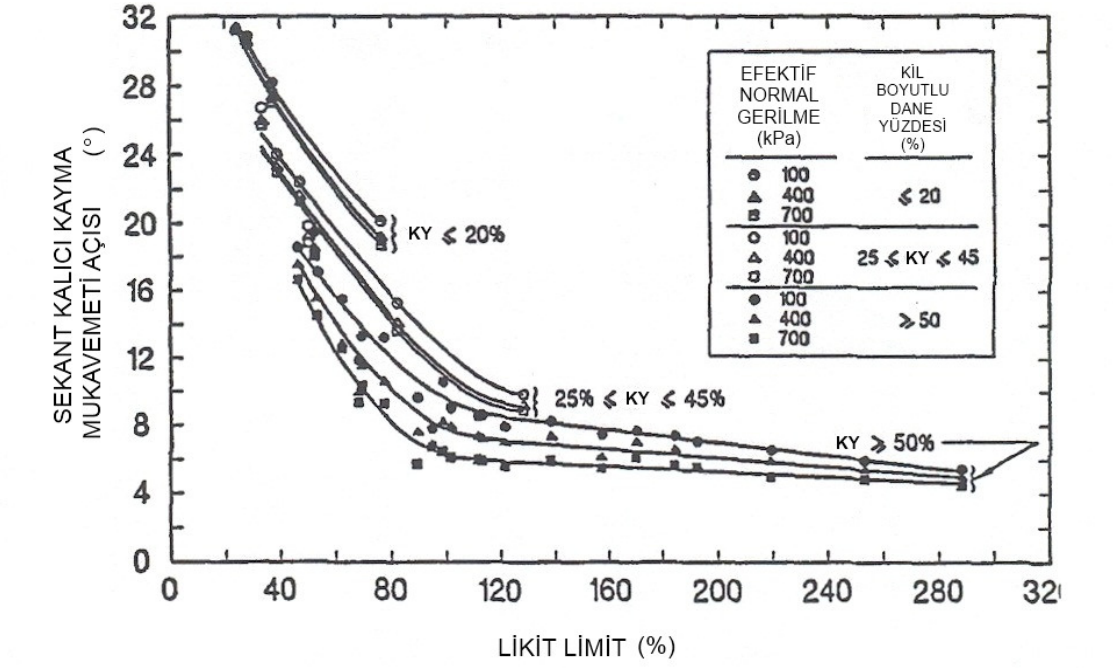

**Şekil 2.80 :** Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişki (Kalteziotis, 1993).

Stark ve Eid (1994) tarafından 32 farklı kil numunesi üzerinde Broamhead tipi halka kesme deney aleti kullanılarak yapılan çalışmada kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ve likit limit değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 2.81'de kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemeti açısı ($\phi'_r$) ile birlikte, bir anlamda kalıcı kayma mukavemeti zarfının eğriselliğinin de hesaba dahil edildiği $(\phi'_r)_{50}/(\phi'_r)_{700}$ oranına etkisi görülmektedir. Grafikte $(\phi'_r)_{50}$ 50 kPa düşey gerilme için elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısını, $(\phi'_r)_{700}$ ise 700 kPa düşey gerilme için elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısını göstermektedir. Genel eğilim olarak kil yüzdesi azaldıkça bu iki değer arasındaki fark dolayısı ile oran azalmakla birlikte likit limite bağlı olarak bu oranda ayrı değişim meydana gelmektedir. Likit limitin % 100'e karşılık gelen mertebelerinde optimum değere ($(\phi'_r)_{50}/(\phi'_r)_{700} \cong 1.8$) ulaşılmakla beraber likit limitin düşük ($w_L$<%50) veya çok yüksek değerlerinde ($w_L$>%250) ise bu oran 1'e doğru yaklaşmaktadır.



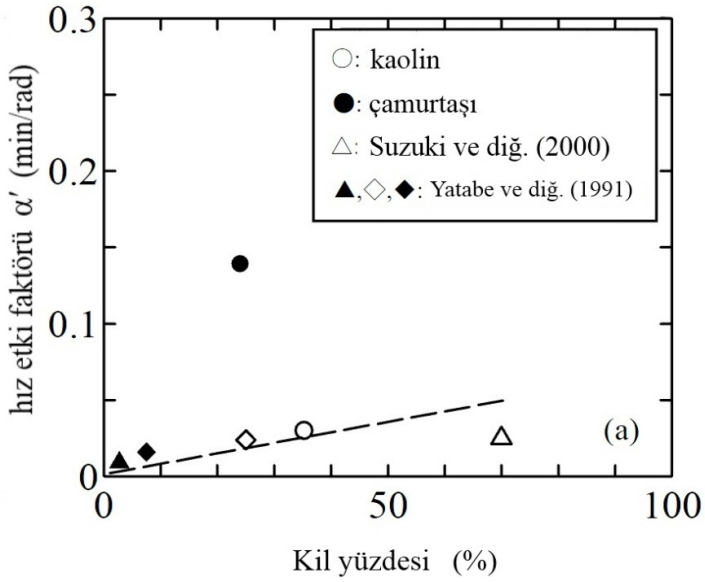

**Şekil 2.81 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ve likit limit değerleri arasındaki ilişki (Stark ve Eid, 1994).

Aynı çalışmada farklı gerilme seviyeleri ve kil yüzdeleri için likit limite bağlı olarak sekant kalıcı kayma mukavemeti açısının değişimi de verilmektedir. Şekil 2.82'de verildiği gibi likit limit arttıkça kalıcı mukavemet azalmaktadır. Buna ek olarak hem kil yüzdesinin artması hem de düşey gerilmenin artması da kalıcı kayma mukavemetini düşürmektedir. Düşey gerilmenin değişimine bağlı düşüş mukavemet zarfının eğriselliğinden kaynaklanmaktadır.




**Şekil 2.82 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ve likit limit arasındaki ilişki (Stark ve Eid, 1994).

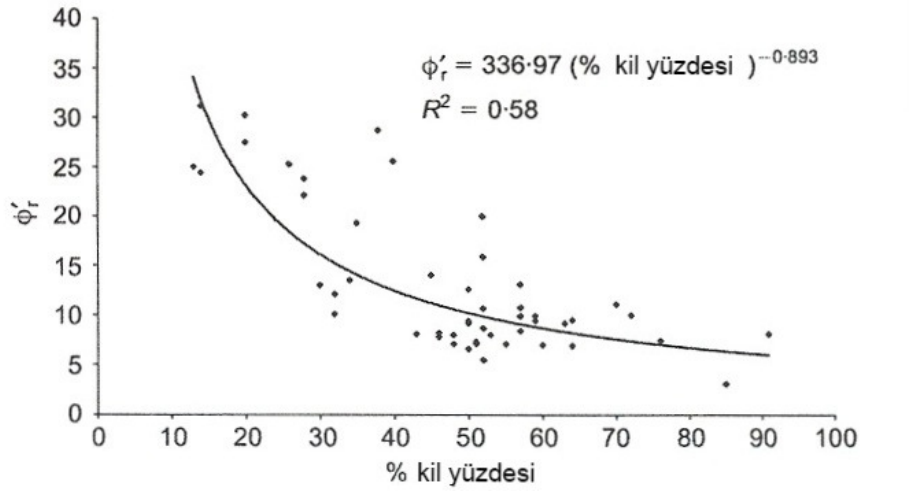
Suzuki ve diğ. (2001)'de kalıcı kayma mukavemeti ile kesme hızı arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışmanın detayları kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisinin verildiği bölümde verilmiştir. Burada ise çalışmada tanımlanan hız etki faktörü ile kil yüzdesi arasındaki ilişkisi verilecektir. Araştırmacılar tarafından kaolin ve çamurtaşı numuneleri üzerinde farklı hızlarda NGI-tipi halka kesme deney aleti ile yapılan deneylerin sonuçlarına göre hız etki faktörü ($\alpha'$) ile kil yüzdesi arasındaki bağıntı Şekil 2.83'te verilmiştir.




**Şekil 2.83 :** Hız etki faktörü ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).

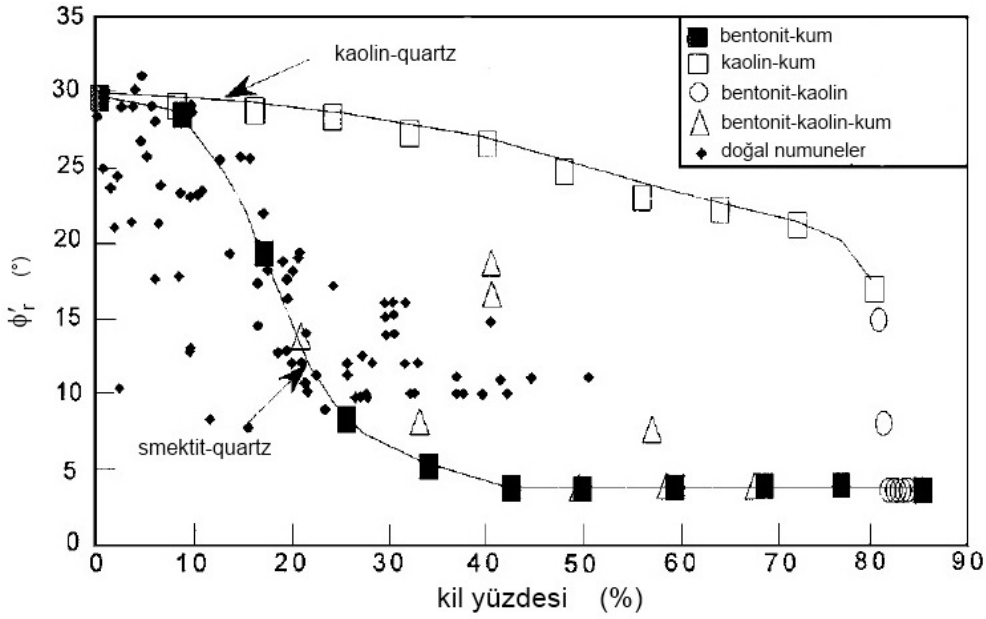
Her ne kadar çamurtaşı numunesine ait veriler genel eğilime uymasa da hız etki faktörü ile kil yüzdesi arasında özellikle kil yüzdesinin %50'den az değerlerinde lineer bir ilişkiden söz edilebilir. Sonuç olarak kil yüzdesinin artması numunenin kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızına bağlı olarak değişimini etkilemektedir.

Wesley (2004)'te, Sridharan ve Rao adlı araştırmacılar, Wesley (2003) tarafından yapılan çalışmaya tartışma olarak gönderilen eleştirilerinde Wesley (2003)'te kullanılan verileri tekrar incelemişler ve kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlardır (Şekil 2.84). Çok iyi bir belirleme katsayısına ($R^2$) sahip olmasa da, kaba bir yaklaşım olacak şekilde bir korelasyon vermişlerdir. Bu korelasyonda orijinal çalışmada verilen veriler içinde yer alan volkanik küllerin deney sonuçları kapsam dışı bırakılmıştır.




**Şekil 2.84 :** Kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişki (Wesley, 2004).

Tiwari ve Marui (2005) tarafından 82 doğal numune ile içeriğinde bentonit, kaolin ve kum karışımları bulunan hazırlanmış numuneler üzerinde NGI tipi halka kesme deney aleti deneyler yapılarak kalıcı kayma mukavemeti ile mineralojinin arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 2.85'te verildiği gibi kil yüzdesinin yaklaşık % 10 değerine kadar kalıcı kayma mukavemeti açısı kuvars malzemenin kalıcı kayma mukavemeti açısına oldukça yakın değerler almakta, benzer olarak kil yüzdesinin % 40'dan büyük değerlerinde ise kil malzeme olarak tanımlanmış bentonitin kalıcı kayma mukavemetine çok yakın değerler görülmektedir.

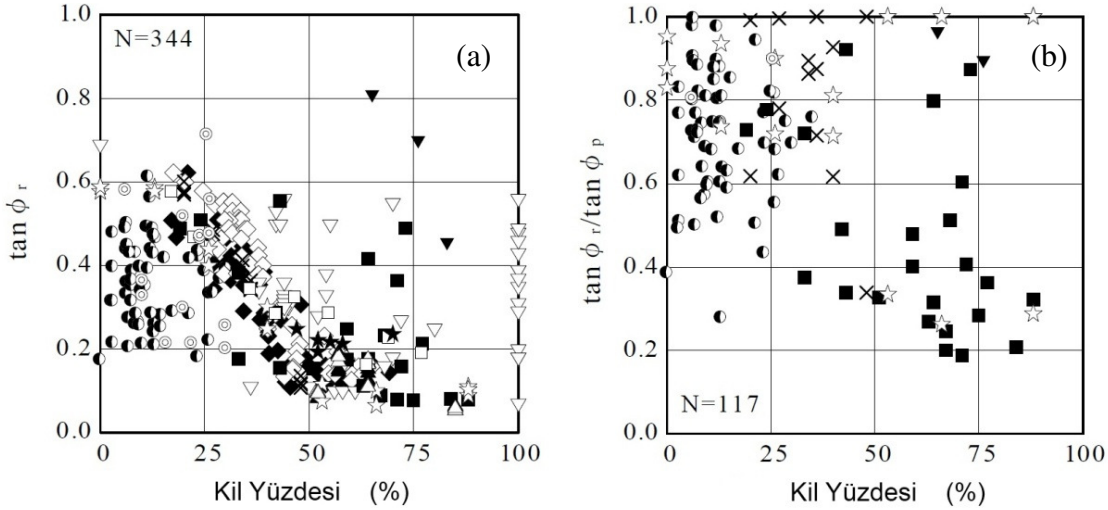



**Şekil 2.85 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi (Tiwari ve Marui, 2005).

Buna karşın kaolin-kuvars ve smektit-kaolin-kuvars karışımları aynı eğilimi izlememektedir. Smektit olarak adlandırılan kil mineralleri çalışmada kullanılan bentonit malzemeyi temsil etmektedir. Deneylerde kullanılan kaolin ve bentonit malzemelerinin ağırlıkça % 80'lerinden daha fazlası kil malzeme sınırı olan 2 μm'den daha küçük olduğu için her iki malzeme de kil kategorisine girmektedir. Her iki malzeme de kil olarak tanımlansa da her iki karışım tipinin korelasyon eğrileri incelendiğinde örneğin % 40 kil yüzdesi için iki karışım tipinin kalıcı kayma mukavemeti arasında yaklaşık 20°'lik bir fark bulunmaktadır. Bu nedenle özellikle kil mineralojisi bilinmeksizin sadece kil yüzdesine bağlı korelasyonların sağlıklı sonuçlar veremeyeceği açıktır.

Tiwari ve Marui (2005)'te doğal malzemeler üzerinde halka kesme deneyi yapıldığında oluşan kesme yüzeyi bölgesinde kil yüzdesinin arttığı iddia edilmektedir. Bu duruma sebep olarak silt danecikleri üzerine yapışan kil daneciklerinin ayrılması veya daneciklerin ufalanması gösterilmektedir.

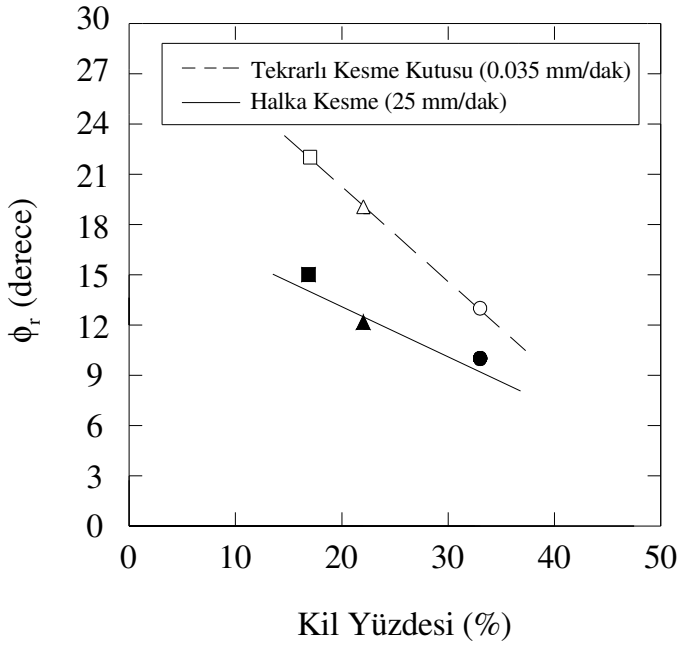
Suzuki ve diğ. (2007)'de yazarlar literatürde daha önce yapılmış bazı çalışmalara ait verilerle birlikte, çalışma kapsamında şev hareketlerinin görüldüğü bazı bölgelerden alınan numuneler üzerinde yaptıkları deney sonuçlarını kullanarak kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi arasındaki ilişkiyi belirlemeye çalışmıştır (Şekil 2.86-a). Daha önce aynı yayında likit limit ile kalıcı kayma mukavemet ilişkisinin verildiği bölümde sunulan numune ve deney tipleri çizelgesi bu şekil içinde geçerlidir.




**Şekil 2.86 :** (a)Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (b) Kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı/pik kayma mukavemeti açısı oranı arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2007; Suzuki ve diğ., 2005).

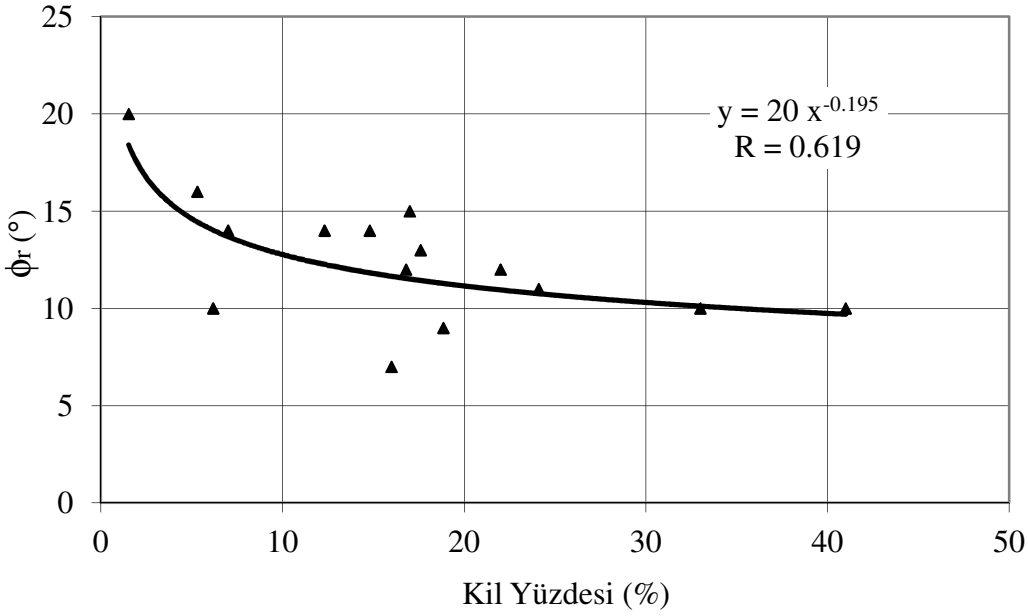
Aynı yazarlar tarafından başka bir yayında (Suzuki ve diğ., 2005) aynı numunelere ait veriler kullanılarak yapılan araştırmada kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemetinin tanjantının pik mukavemetin tanjantına oranı ($\tan\phi_r/\tan\phi_p$) arasındaki ilişki verilmiştir (Şekil 2.86-b). Şekil incelendiğinde beklendiği gibi özellikle kil yüzdesi yüksek zeminlerde pik mukavemetten kalıcı mukavemete düşüş miktarı beşte dört gibi oldukça yüksek değerler alabilmektedir.

Koltuk (2005) tarafından yapılan çalışmada 3 farklı numune üzerinde halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında Şekil 2.87'de verilen ilişki elde edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta iki deney sisteminde kullanılan kesme hızlarının birbirine çok uyum göstermemesidir. Bunun yanında üç numune de olsa kil yüzdesinin artışı ile birlikte kalıcı kayma mukavemeti açısının azaldığı yönünde genel bir eğilim yakalandığı görülmektedir.

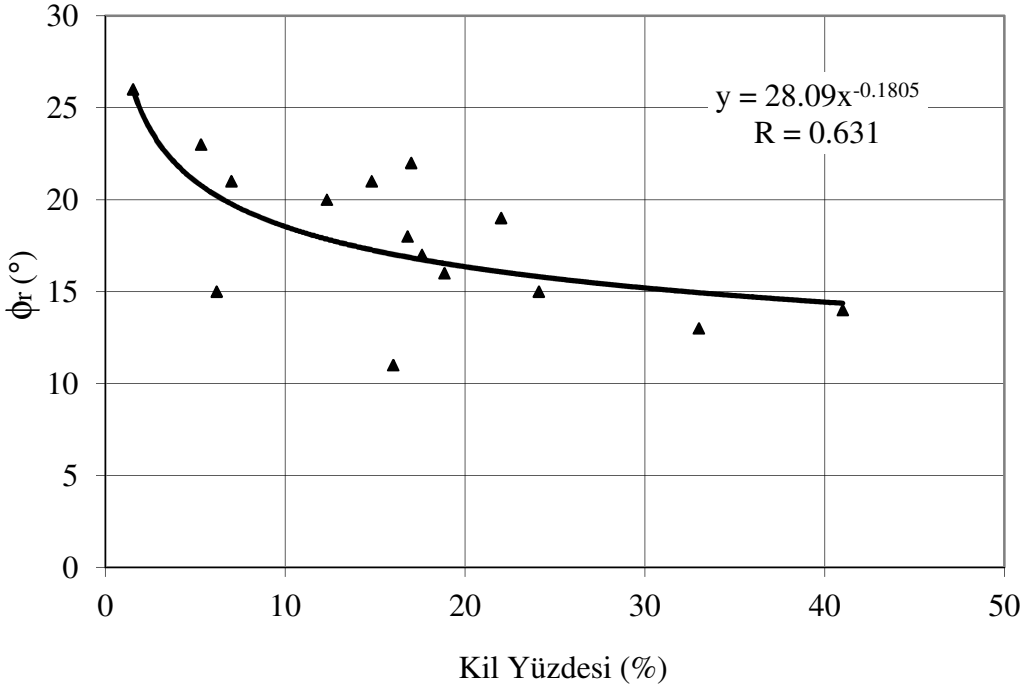



**Şekil 2.87 :** Koltuk (2005) tarafından verilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkisi.

Yılmaz (2006) tarafından halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile kil yüzdesi ilişkleri Şekil 2.88 ve Şekil 2.89'da verilmiştir. Bu yayında da bilinen kil yüzdesinin artışının kalıcı kayma mukavemeti açısını düşürdüğü her iki deney sonuçları ile kanıtlanmıştır.

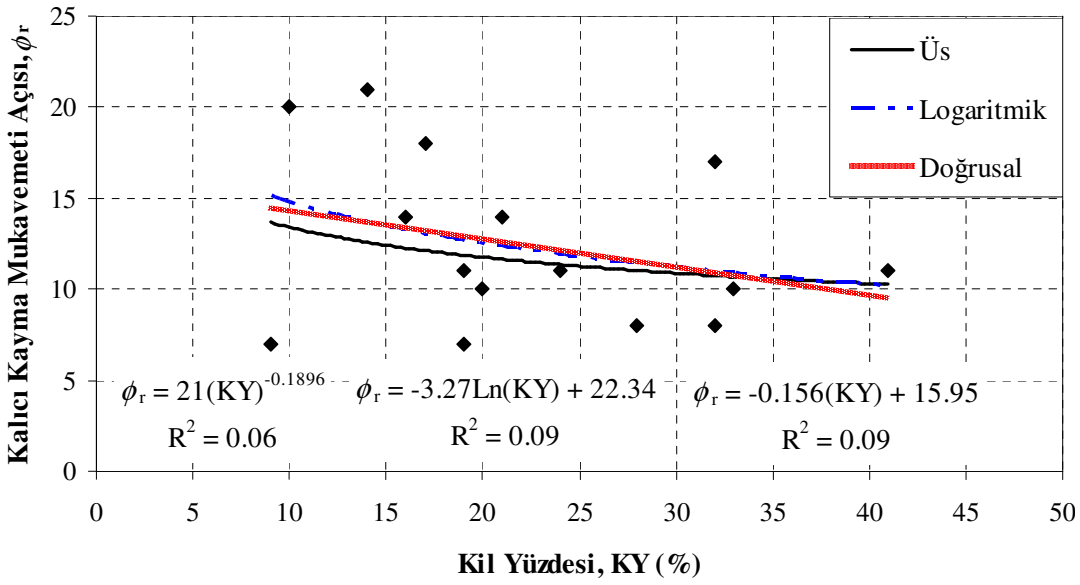



**Şekil 2.88 :** Halka kesme deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).



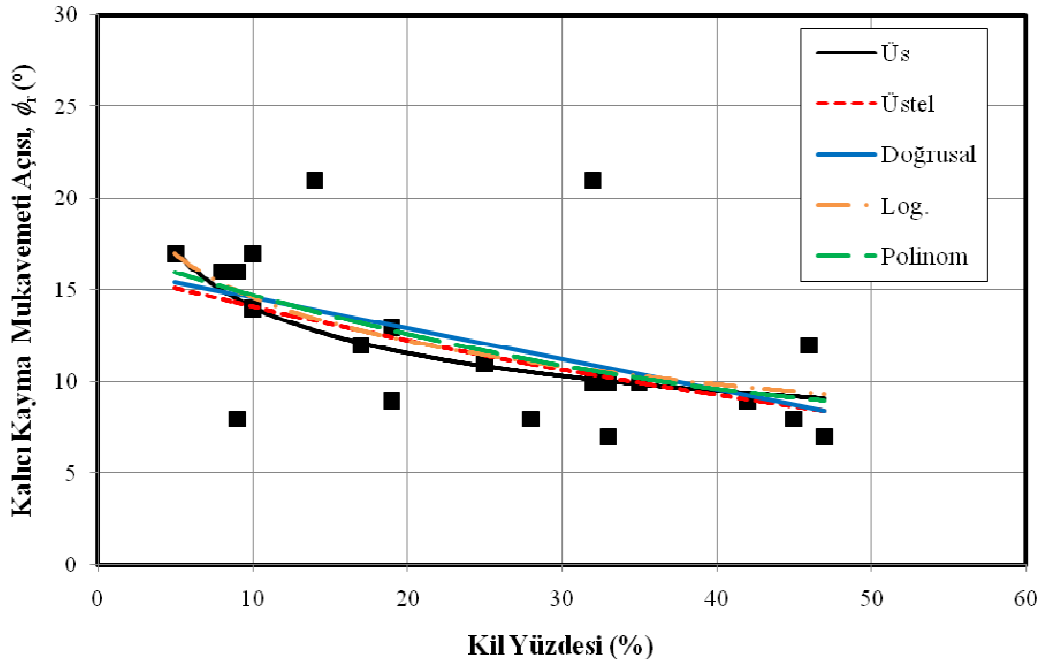

**Şekil 2.89 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi (Yılmaz, 2006).

Ataç (2009) tarafından 15 farklı numune üzerinde yapılan halka kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak elde edilen kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı korelasyonları Şekil 2.90'da verilmiştir.




**Şekil 2.90 :** Ataç (2009) tarafından verilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

Ürkmez (2009) tarafından yapılan çalışmada tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti ile kil yüzdesi ilişkisi için Çizelge 2.16 ve Şekil 2.91'de verilen bağıntılar elde edilmiştir.

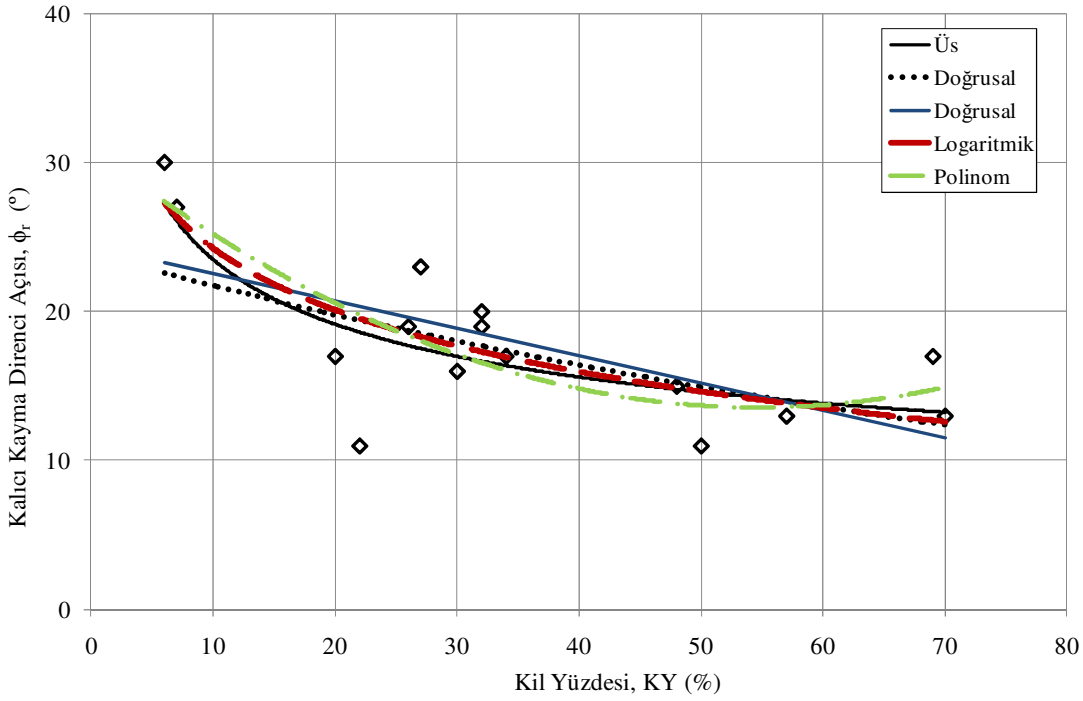



**Şekil 2.91 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.16 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-KY bağıntıları.

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

Bayın (2011) tarafından yapılan çalışmada ise konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti kil yüzdesi ilişkisi için Çizelge 2.17 ve Şekil 2.92'de verilen bağıntılar önerilmiştir. Grafik incelendiğinde verilerin dağılımının biraz fazla olmasının konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin deney düzeneğinin sınırlayıcı yanı olan erişilebilen en büyük yerdeğiştirme miktarının sınırlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




**Şekil 2.92 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.17 :** Bayın (2011) tarafından önerilen $\phi_r$-KY bağıntıları.

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

### 2.3.4 Aktivite

Hem aktivite hem de likit limit, kil minerolojisinin birer göstergesidir. Bu nedenle dane boyutu ve şekli için de birer gösterge halini alırlar. Artan aktivite ve likit limit ile birlikte kalıcı mukavemet açısının azalması beklenir (Stark, 1994). Ancak literatürde sunulan çalışmalarda kalıcı kayma mukavemeti ile aktivite arasında çok anlamlı bir ilişki gözlenememiştir. Bu noktada aktivitenin tanımından kaynaklı problemler olduğu düşünülmektedir. Aktivite tanımında kil yüzdesi olarak ifade edilen ve hidrometre deneyinden elde edilen değer aslında numune içeriğindeki kil minerallerini tanımlamaya çalışsa da kil boyutunda olup kil mineralleri içermeyen daneler de hesaba dahil olmaktadır. Bu nedenle mineralojiden oldukça etkilendiği bilinen kalıcı kayma mukavemeti ile aktivite arasında genelde anlamlı bir dağılım göstermeyen ilişkiler elde edilmektedir. Bu kapsamda yapılan araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

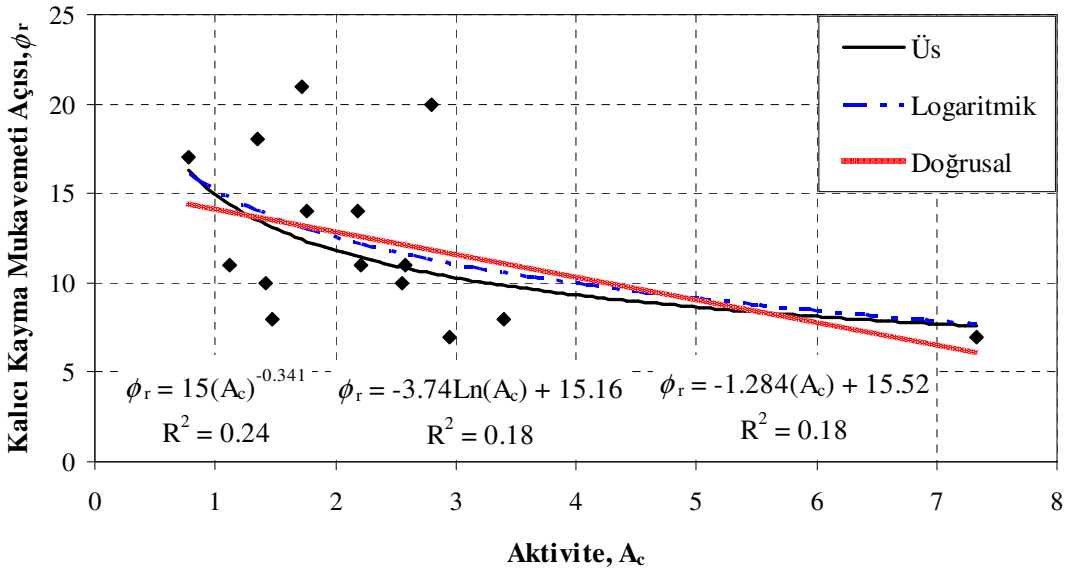
Yılmaz (2006) tarafından yapılan çalışmada 15 numune üzerinde yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme deneyleri sonucunda kalıcı kayma mukavemeti açısı ile aktivite ilişkisini, likit limite bağlı olarak sırasıyla aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\phi_r = 339*W_L^{-0.826} * A^{-0.059} \quad \textbf{(2.24)}$$

$$\phi_r = 385*W_L^{-0.764} * A^{-0.056} \quad \textbf{(2.25)}$$

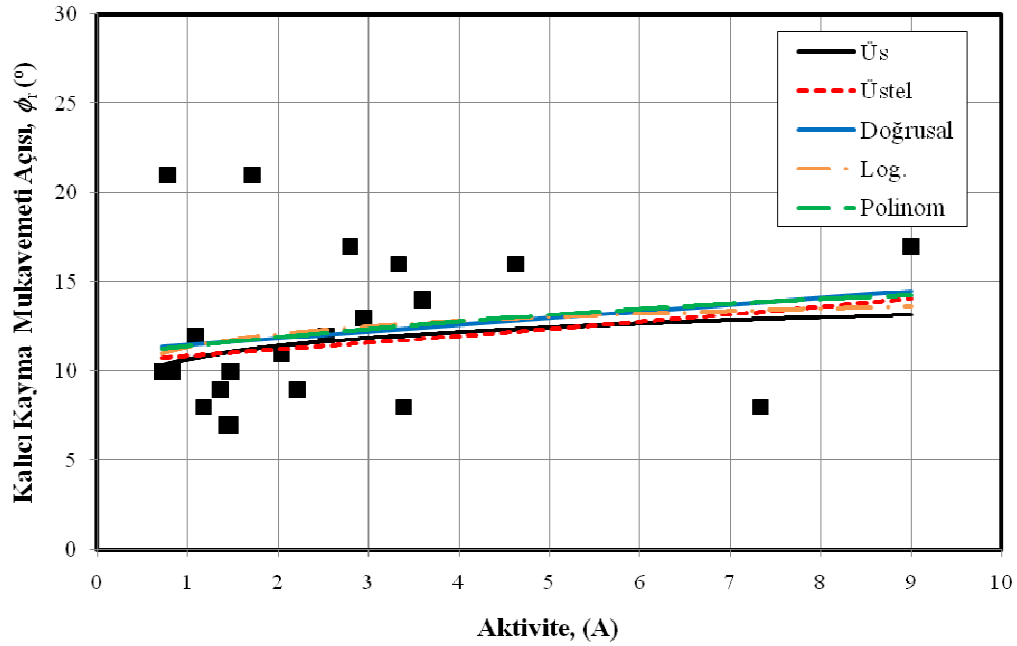
Ataç (2009) tarafında yapılan çalışmada 15 farklı numune üzerinde yapılan halka kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti

açısı ilişkisi Şekil 2.93'te verilmiştir. Önerilen bağıntıların belirleme katsayıları ve verilerin saçılımından görüldüğü gibi çok anlamlı ilişkiler yakalanamamıştır.




**Şekil 2.93 :** Ataç (2009) tarafından verilen aktivite kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

Ürkmez (2009) tarafından yapılan çalışmada tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları kullanılarak kalıcı kayma mukavemeti ile aktivite ilişkisi için Çizelge 2.18 ve Şekil 2.94'te verilen bağıntılar elde edilmiştir.



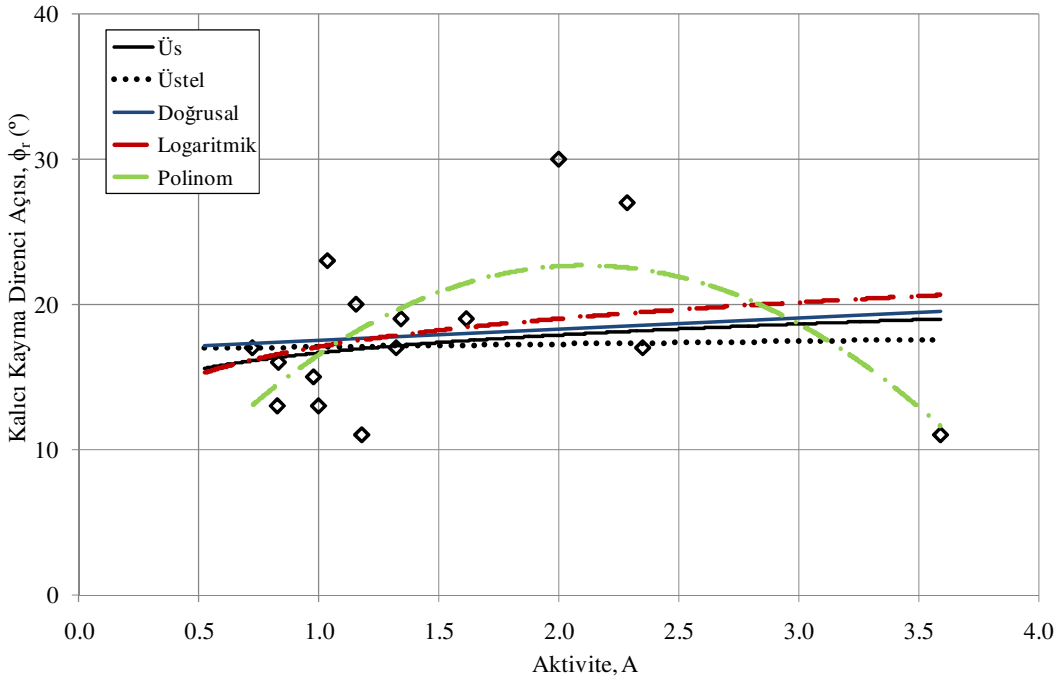

**Şekil 2.94 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen aktivite kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.18 :** Ürkmez (2009) tarafından verilen $\phi_r$-A bağıntıları.

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

Çizelgede verilen belirleme katsayılarının çok çok düşük olması bu bağıntıların her zemin numunesi için geçerli olamayacağının bir kanıtıdır.

Bayın (2011) tarafından yapılan çalışmada konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre kalıcı kayma mukavemeti aktivite ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen bağıntılar Çizelge 2.19 ve Şekil 2.95'te verilmiştir. Diğer çalışmalarda görülen çok anlamlı olmayan ilişkiler bu grafikte de görülmektedir.




**Şekil 2.95 :** Bayın (2011) tarafından konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre elde edilen aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri.

**Çizelge 2.19 :** Bayın (2011) tarafından verilen $\phi_r$-A bağıntıları.

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

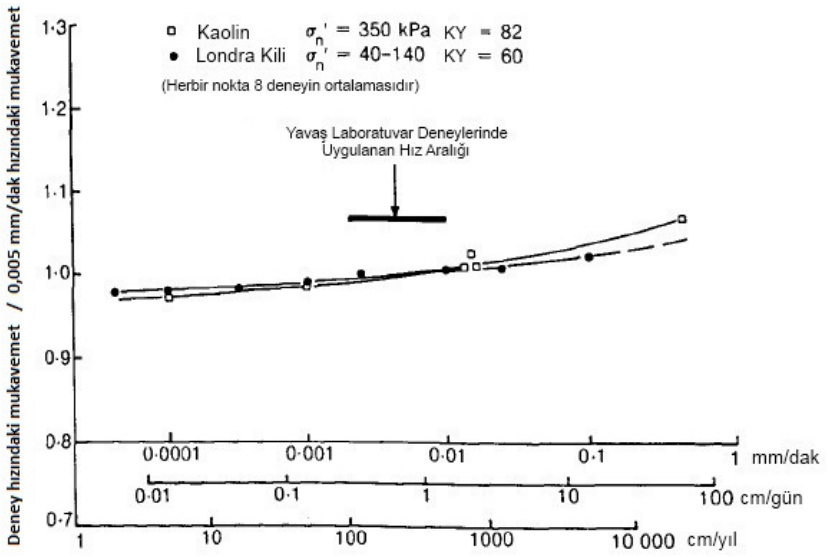
### 2.3.5 Kesme Hızı

Günümüze kadar yapılan önceki çalışmalarda kesme hızı ile kalıcı kayma mukavemetindeki değişim sıklıkla incelenen konulardan biridir. Kesme hızının değişimi için farklı şartlar için farklı hızlar istenmektedir. Örneğin deprem şartlarının modellenmesi için 400 mm/dak'lık bir kesme hızına gereksinim duyulurken yüksek plastisiteli bir kilin kalıcı kayma mukavemetini belirleyebilmek için 0.02 mm/dak'dan daha düşük kesme hızları istenebilmektedir (ASTM D6467-06a). Bu geniş kesme hızı aralığında kayma mukavemeti parametrelerinin değişimi, araştırmacıları bu konuya sevk etmiştir (Tika ve diğ., 1996).

Kalıcı kayma mukavemetinin önem kazandığı ve çoğunlukla kullanıldığı yerler kayma yüzeyinin mevcut olduğu ve bu yüzey üzerinde bir hareketin süregeldiği yeniden harekete geçmiş eski bir şev kayması gibi durumlardır. Şev kaymalarında görülen hareketler çok farklı sebeplerden kaynaklanabilmektedir. Statik koşullarda içeriden veya dışarıdan etkilerle sistemin dengesinin kaybolduğu durumların yanında sismik şartlar altında yatay ivme nedeniyle oluşan şev hareketleri gözlenebilmektedir. Ayrıca şevlerde görülen ve akma diye tabir edilen belirli bir hızla sürekli olarak toprak kaymalarına da doğada karşılaşılabilmektedir. Bütün bu şev hareketleri bölgenin topografyasına, zemin tabakalarının yerleşimlerine, fiziksel ve mekanik özelliklerine, yer altı suyunun bulunmasına ve akış durumuna, insanoğlu tarafından yapılan müdahalelere veya oluşabilecek deprem hareketine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Şev stabilitesi problemlerinde geleneksel stabilite tahkikleri ile şevin güvenliği kontrol edilirken, analize parametre olarak giren faktörlerden birisi de doğal olarak kayma mukavemetidir. Zemin tabakalarının

mukavemeti genellikle Mohr-Coulomb teoremine göre kohezyon (c) ve kayma mukavemeti açısı ($\phi$) terimleri ile tariflenmektedir. Söz konusu şev kayması kayma yüzeyinin önceden mevcut olduğu yeniden harekete geçen bir şevde meydana geliyorsa kalıcı kayma mukavemeti parametresi olarak kalıcı kayma mukavemeti açısının ($\phi_r$) belirlenmesi gerekmektedir. Günümüze kadar yapılan araştırmalar göz önüne alındığında kalıcı kayma mukavemetinin şev hareketinin hızından etkilendiği söylenebilir. Pratikte doğada kayma hızı çok geniş bir aralıkta gerçekleşebilmektedir. Statik şartlarda yeniden harekete geçen bir şev kaymasında, kayma hızının 5 cm/yıl ile 50 cm/gün arasında değiştiği bilinmektedir (Skempton, 1985). Depremli koşullarda ise bu kayma hızları deprem sırasında meydana gelen yatay ivmenin de etkisiyle 100 mm/dak- 1000 mm/dak değerlerine ulaşabilmektedir (Lemos ve diğ.,1985; Fearon, 1999; Parathiras, 1995). Ayrıca bu hareketin kısa süreli durup tekrar harekete geçme şeklinde mi, sabit bir hızda hareket etme halinde mi, artan veya azalan bir ivme ile mi değiştiği de başka bir faktör olarak önem kazanmaktadır (Wedage ve diğ., 1998). Bu amaçla günümüze kadar bir çok araştırmacı kesme hızı ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisini incelemiştir.

Araştırmacıların çoğunluğunun ortak bir kanaati olarak iri daneli zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti kesme hızından ihmal edilebilecek kadar az miktarda etkilenmektedir (Tika ve diğ., 1996). Kohezyonlu zeminlerde ise kalıcı kayma mukavemeti, kesme hızından yavaş hızlarda çok düşük derecede etkilenmekte, 100 mm/dak'dan daha büyük hızlarda ise kayma mukavemetinde nitelikli değişiklikler meydana gelmektedir (Skempton, 1985). Skempton tarafından 1985 yılında sunulan çalışmada (Şekil 2.96) görüldüğü üzere kaolin ve Londra kili üzerinde yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen deney sonuçlarına göre özellikle 0.01 mm/dak hızdan daha küçük hızlarda kayma mukavemetinde maksimum % 3 civarında bir değişimin meydana geldiği görülmektedir. Skempton bu değişimin 0.002 mm/dak ile 0.01 mm/dak arasındaki hızlarda her bir log çevrimi için yaklaşık % 2.5'dan daha düşük olduğunu bu nedenle standart yavaş laboratuvar deneylerinde kullanılan hızlarda bu değişimin ihmal edilebileceğini ileri sürmektedir.




**Şekil 2.96 :** Killerde yavaş kesme hızlarında kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızına göre değişimi (Skempton, 1985).

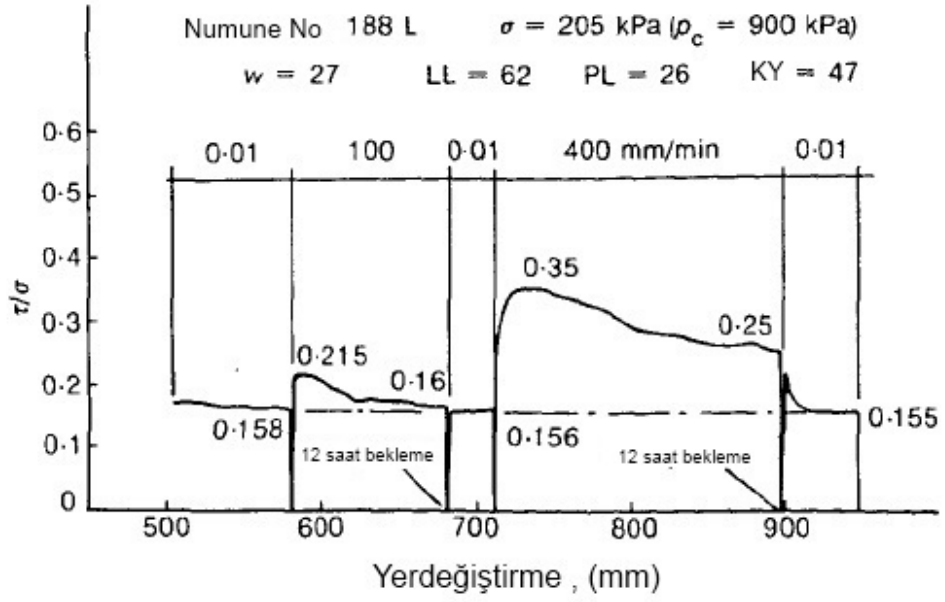
Aynı çalışmada verilen ve farklı hız kademelerinde oluşan mukavemet kaybının veya mukavemet artışlarının oranları Çizelge 2.20'de gösterilmiştir. Burada mukavemet kaybı olarak tanımlanan parametre, ilgili kesme hızındaki mukavemetin 0.005 mm/dak kesme hızındaki mukavemete oranı olarak tariflenmiştir. Buna göre eğer 0.005 mm/dak kesme hızı laboratuvar şartlarında standart olarak kabul edilirse bütün yavaş kesme hızı aralığında değişimin -%3 ile +%5 aralığında değiştiği görülmektedir.

**Çizelge 2.20 :** Killerde kalıcı kayma mukavemetinin yavaş kesme hızlarında değişimi (Skempton, 1985).

| **Kayma Hızı** (mm/dak) | | | **Mukavemet Oranı** | **Fark (%)** |
|---|---|---|---|---|
| Arazi | (en düşük) | 0.0001= 5cm/yıl | 0.97 | -3 |
| Laboratuvar | (genel) | 0.005 = 7mm/gün | 1.00 | - |
| Arazi | (en yüksek) | 0.35=50cm/gün | 1.05 | +5 |

Skempton, 1985'ta Pakistan'da bulunan Kalabagh Barajı civarında görülen kil numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre kesme hızı ile kayma mukavemeti ilişkisini Şekil 2.97'deki gibi vermiştir. Deneyler yapılırken izlenen yönteme göre, numune öncelikle 0.01 mm/dak kesme hızında halka kesme deneyine tabii tutulmuştur. Daha sonra kesme hızı 100 mm/dak'ya yükseltilmiş ve kayma gerilmelerinin sabitlenmesi gözlendikten sonra kesme işlemi durdurulmuştur. Oluşan

boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için 12 saat beklendikten sonra tekrar bir süre 0.01 mm/dak hızında deney sürdürülmüş ve 400 mm/dak kesme hızına çıkılmıştır. Kayma gerilmeleri sabitlenene kadar kesmeye devam edilmiştir. Sabitleşme sonrası deney durdurularak boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için 12 saat bekleme yapılmıştır. Son olarak numune 0.01 mm/dak hızında bir süre daha kesilmeye maruz bırakılmıştır.

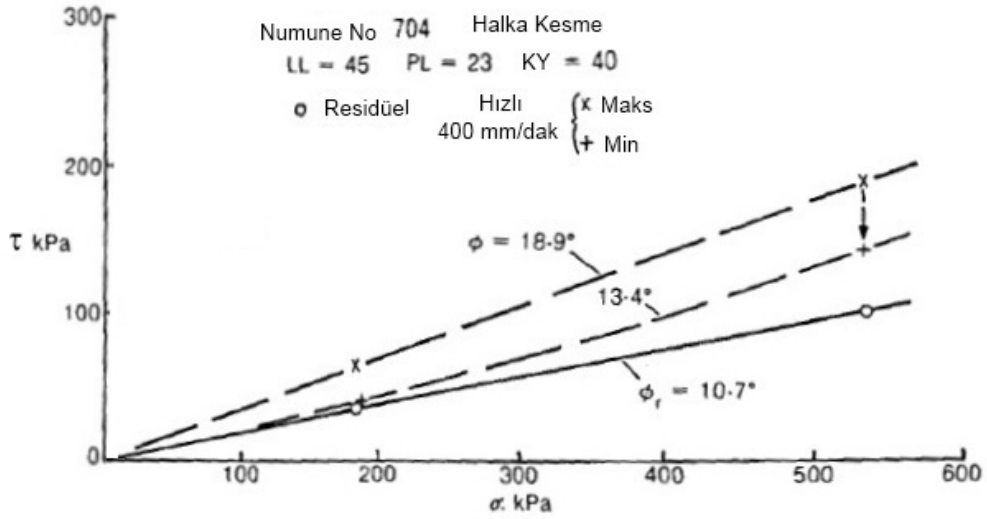



**Şekil 2.97 :** Kalabagh Barajı 188L kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, (Skempton, 1985).

Şekilde görüldüğü gibi düşük hızlarda yapılan kesme işlemi sonrasında 100 mm/dak kesme hızında yapılan kesme sırasında yeterince yerdeğiştirme sonrasında düşük hızlarda erişilen kalıcı mukavemet değerlerinden çok farklı olmayan değerler elde edilmiştir. Ancak 400 mm/dak kesme hızında 100 mm/dak kesme hızı sırasında elde edilen yerdeğiştirme miktarının iki katı kadar yerdeğiştirme yapılmış olmasına rağmen 0.01 mm/dak kesme hızında elde edilen kalıcı mukavemetin oldukça üstünde bir değer gözlenmektedir. Bu yüksek hızda mukavemetteki artış için türbülanslı kesme durumunun gerşekleşmiş olması neden olarak gösterilebilir. Deney sonunda 0.01 mm/dak kesme hızında yapılan kesme işlemi sonucunda ilk durumda elde edilen kalıcı mukavemet parametrelerine çok yakın değerler elde edilmiştir. Özet olarak çok yüksek kesme hızlarına çıkılmadığı takdirde kalıcı parametrelerde önemli derecede değişiklikler gözlenmemektedir.

Kalabagh Barajı killerinde Şubat 1984'te yapılan halka kesme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre farklı hızlarda elde edilen mukavemet zarfları Şekil 2.98'de

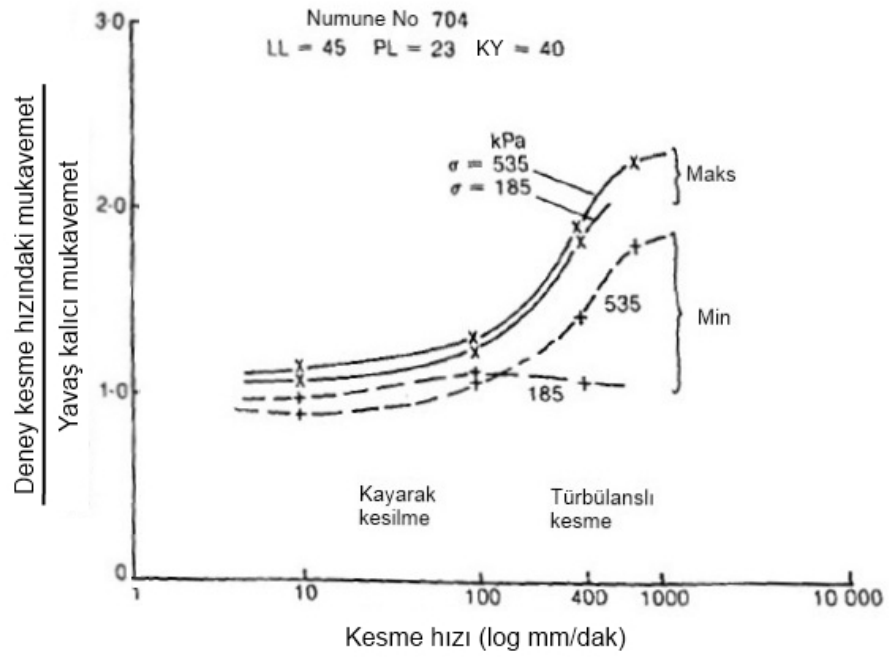
verilmiştir. Grafikte maks olarak gösterilen değerler 400 mm/dak kesme hızında elde edilen pik kayma gerilmelerini, min olarak gösterilen değerler ise yine 400 mm/dak kesme hızında elde edilen en düşük kayma gerilmelerini göstermektedir. Rezidüel olarak gösterilen değerler ise 0.01 mm/dak kesme hızında elde edilen kalıcı kayma gerilmelerini göstermektedir.




**Şekil 2.98 :** Kalabagh Barajı 704 kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, Şubat 1984 (Skempton, 1985).

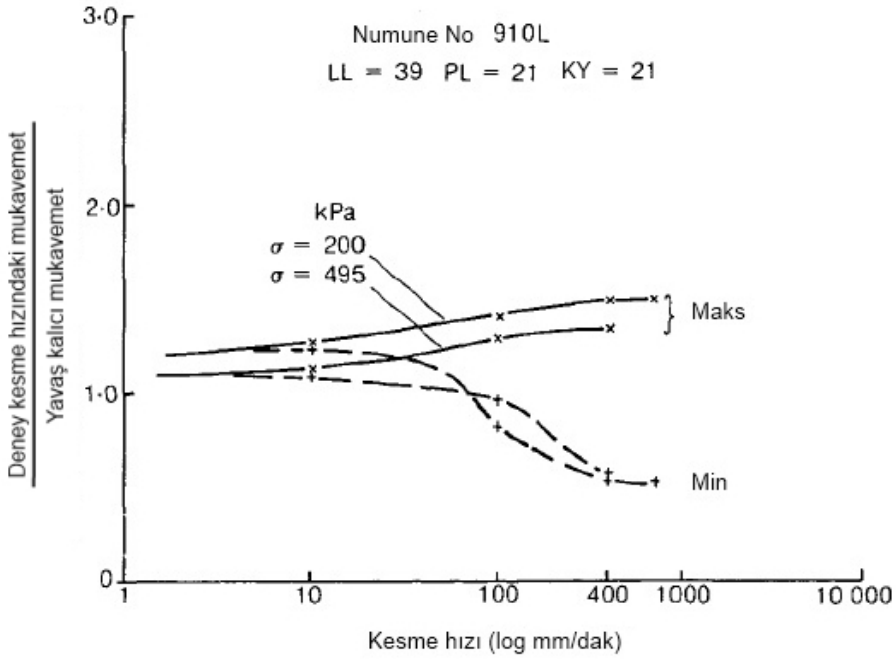
Yapılan halka kesme deneyleri sonuçlarından elde edilen mukavemet değerleri ile kesme hızları aynı grafikte işlenmiş ve Şekil 2.99'da verilen davranış elde edilmiştir. Skempton tarafından ileri sürülen ve grafikte de görülen davranışa göre numunenin mukavemet parametreleri 100 mm/dak kesme hızına kadar çok büyük bir değişiklik göstermemekte, bu hızdan sonra ise logaritmik olarak kesme hızı ile artmaktadır. Skempton bu değişimin sebebi olarak 100 mm/dak hızdan sonra kayma bölgesinde kesme modu olarak türbülanslı kesmenin oluştuğunu ileri sürmektedir.

Kalıcı kayma mukavemetinin tanımında ise özellikle killi zeminlerin ilerleyen deformasyonlarında kil taneciklerinin kesme düzlemine paralel hale gelmesinin beklendiği, bu sayede bu taneciklerin birbiri üzerinde hareketi dolayısıyla sürtünmeye bağlı kayma gerilmelerinin oluştuğu düşünülmektedir. Yüksek hızlarda ise türbülanslı kesmenin oluşması nedeniyle dane yönelimleri meydana gelemediğinden dane çatısında oluşan kilitlenmelerin kayma mukavemetini arttırdığı söylenebilir. Buna ek olarak kesme hızının yüksek olması nedeniyle boşluk suyu basınçlarında meydana gelen artış nedeniyle kayma mukavemetlerinin yüksek olabileceği yönünde fikirler de bulunmaktadır.



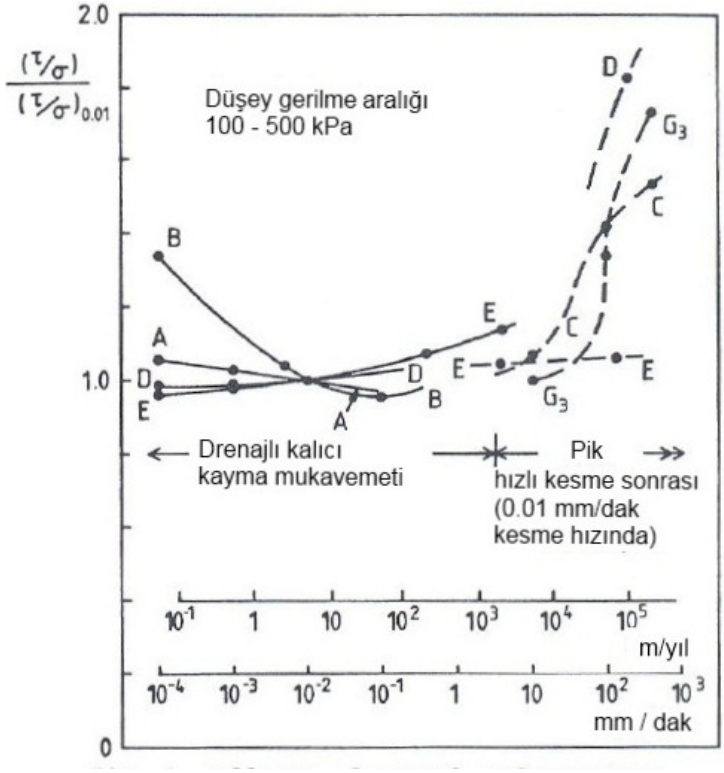

**Şekil 2.99 :** Kalabagh Barajı 704 kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, Şubat 1984 (Skempton, 1985).

Kil içeriği düşük siltli zeminlerde ise yukarıda verilen davranışın aksine pik mukavemette 800 mm/dak kesme hızında dahi çok önemli bir değişim olmamakla beraber, 100 mm/dak hızdan sonra kalıcı mukavemette keskin bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 2.100). Yazarlar bu durumun boşluk suyu basınçlarında meydana gelen değişimlerden olduğu ileri sürülmektedir.




**Şekil 2.100 :** Kalabagh Barajı 910L kodlu numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi, Ekim 1983 (Skempton, 1985).

Lemos ve çalışma arkadaşları tarafından 1986 yılında yapılan çalışmada 9 farklı zemin üzerinde farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları değerlendirilerek Şekil 2.101'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

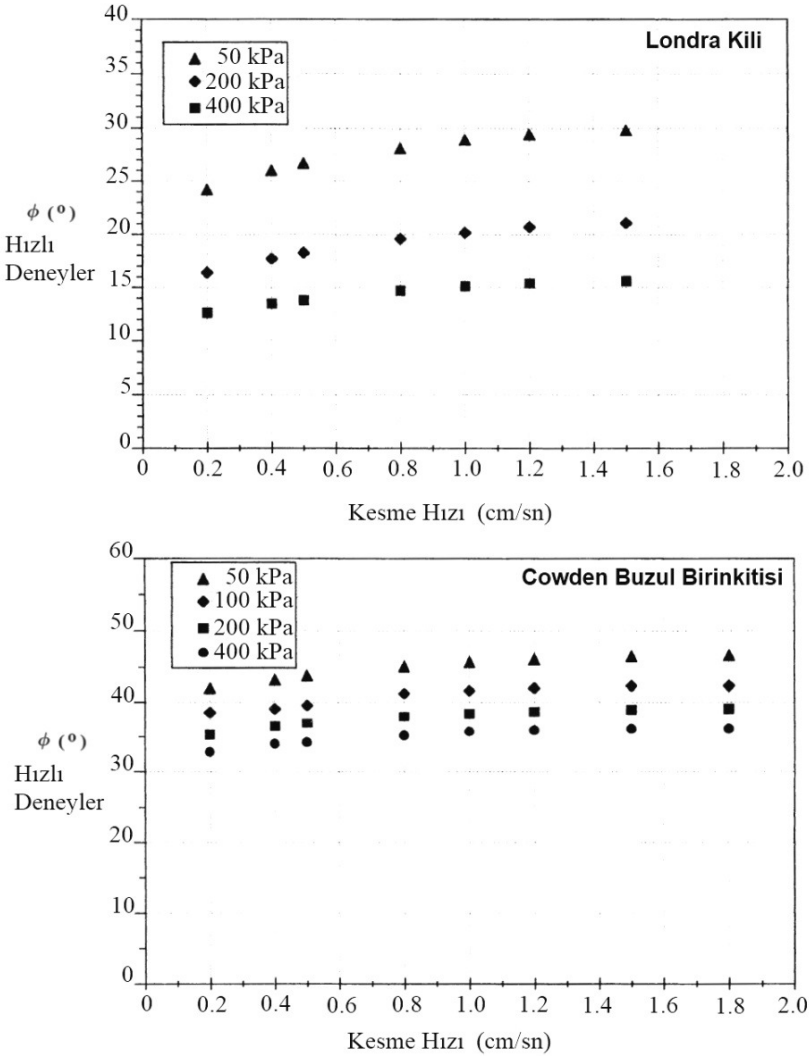



**Şekil 2.101 :** Lemos ve diğ. (1986) tarafından verilen drenajlı şartlarda kesme hızının kalıcı kayma mukavemetine etkisi.

Skempton tarafından savunulan teze de uygun olarak Şekilde de görüldüğü üzere bir numune haricinde bütün numunelerin kalıcı kayma mukavemetlerinde 0.01 mm/dak hıza kadar çok önemli bir değişim bulunmamaktadır. Özellikle 10 mm/dak kesme hızından sonra ise pik mukavemetlerde ciddi bir artış görülmektedir. B numunesi olarak adlandırılan numune buzul birikintisi olup düşük plastisiteli ve kil yüzdesi düşük bir zemindir. Bu numunede çok düşük kesme hızında diğer numunelerden farklı olarak bir mukavemet artışı söz konusudur. Çalışmada bu farklılık üzerinde bir değerlendirme yapılmasa da bu durumun numunenin oluşum türünün farklılığından ileri geldiği düşünülmektedir.

Parathiras tarafından 1994 ve 1995 yıllarında yayınlanan çalışmalarda kalıcı kayma mukavemeti ile kesme hızının etkisi özellikle deprem şartlarını modelleyebilmek amacıyla yüksek kesme hızları için mukavemet değişimleri incelenmiştir. Yapılan halka kesme deneylerinde iki farklı kil numunesi üzerinde yavaş kesme hızı olarak $1.5 \times 10^{-4}$ cm/sn (0.09 mm/dak) , yüksek kesme hızı olarak ise 0.1 cm/sn (60 mm/dak)

ile 10 cm/sn (6000 mm/dak) kesme hızı aralığında deneyler yürütülmüştür. Şekil 2.102'de Parathiras tarafından yapılan çalışma sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti ile kesme hızı arsındaki ilişkiler görülmektedir.

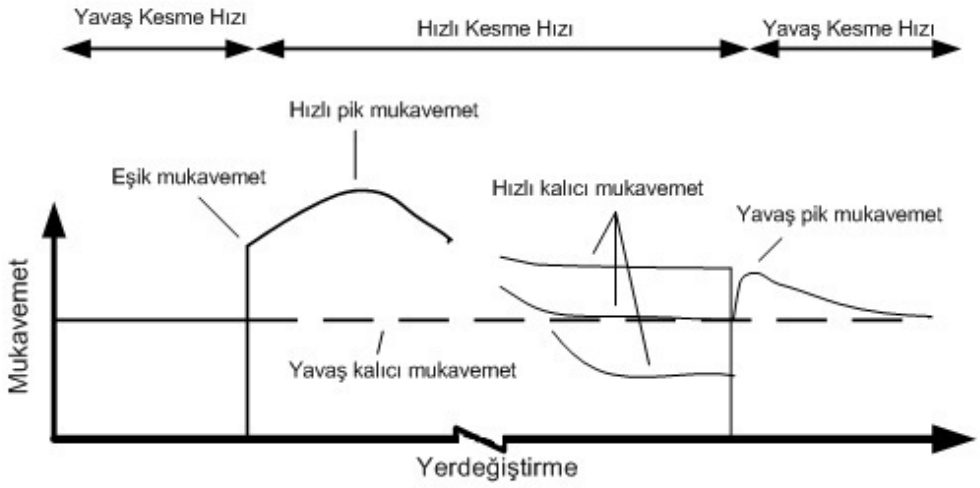



**Şekil 2.102 :** Londra kili ve Cowden buzul çökelleri üzerinde farklı kesme hızlarında yapılan deney sonuçları (Parathiras, 1995).

Yüksek kesme hızlarında özellikle 1 cm/sn (600 mm/dak) kesme hızından sonra mukavemette bir değişim gözlenememektedir. Yazara göre kesme hızı 1.5 cm/sn ile 2.0 cm/sn aralığında ulaşabileceği en yüksek mukavemet değerlerine çıkmakta ve bu hızlarda yavaş kesme hızlarında elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerinin yaklaşık 2.5 katına çıkabilmektedir. Ayrıca yapılan çalışmada kalıcı şartlarda oluşan kayma yüzeyi sonrası kesme yönünde yapılan değişikliğin kalıcı kayma mukavemetine etkisi araştırılmış, bu anlamda plastik zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinde herhangi bir değişiklik kaydedilmemiştir (Parathiras, 1995).

NGI-tipi halka kesme deney aleti kullanılarak yapılan deneylerde deney düzeneğinin tasarımı gereği alt ve üst olmak üzere iki ayrı ring kullanılmakta ve bu iki ringin temas bölgesinde ise kesme yüzeyi oluşturulmaktadır. Ringler arasında ise herhangi bir sürtünme meydana gelmeyecek bir boşluk (genellikle 0,2~0,4 mm arasında) bırakılmaktadır. Bu konuda detaylı bilgiler halka kesme deney aletinin tanıtıldığı bölümde verilmiştir. NGI tipi halka kesme deney düzeneğinde bu iki ring arasındaki boşluktan özellikle yüksek kesme hızlarında (1 ~ 10 cm/sn) kayda değer derecede numune kaybı meydana gelmektedir. Hızın artmasıyla birlikte kesme modu da değiştiğinden kayıp miktarı artmaktadır. Bu kaybı en aza indirgemek maksadıyla Parathiras tarafından yeni bir ring takımı tasarlanmıştır. Bu yeni düzenlemeye göre üst ve alt ring arasında serbest olarak bırakılan boşluk yerine iki ring arasına sabit boşluğa sahip bilyeli bir yatak tasarlanmıştır. Bu sayede deneyler sırasında oluşan kayıplarda yedi kat azalma ve kalıcı kayma mukavemetinde ise % 2 seviyesinde bir değişim medyana geldiği tespit edilmiştir (Parathiras, 1995)

Tika ve çalışma arkadaşları tarafından 1996 yılında yapılan çalışmada ise yüksek kesme hızlarının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yazarlara göre farklı hızlarda meydana gelen hıza bağımlı mukavemet davranışı Şekil 2.103'te verilen grafikteki gibi modellenmektedir.



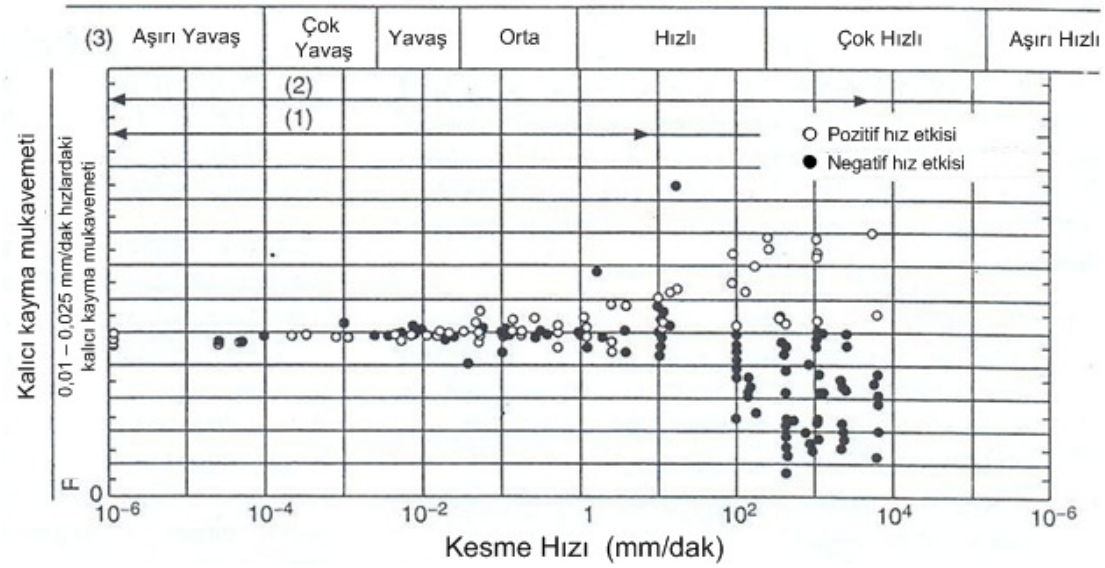

**Şekil 2.103 :** Gözlenen hıza bağımlı mukavemet davranışı (Tika ve diğ., 1996).

Lemos ve diğ. (1985) tarafından verildiği üzere bir zeminde yavaş ve drenajlı şartlarda meydana gelen kayma sonrası daha yüksek bir kesme hızında kesme devam ederse Şekil 2.103'te verilen davranış gözlenmektedir. Bu durumda önce kayma yüzeyinde çok az bir deformasyon karşılığında eşik mukavemet adı verilen dayanım

mobilize olmaktadır. Eşik mukavemet kesme hızına bağlı ve düşük kesme hızında elde edilen kalıcı mukavemetten daha büyük bir kayma gerilmesidir. Artan deformasyonla elde edilen ve yine kesme hızına bağlı olarak değişen maksimum kayma gerilmesi pik mukavemet olarak tanımlanmaktadır. Pik mukavemetten sonra ise ileri deformasyon seviyelerinde kayma gerilmesinin yaklaştığı sabit minimum kayma gerilmesine ise hızlı kalıcı mukavemet adı verilmektedir. Genellikle hızlı kalıcı mukavemet yavaş drenajlı kalıcı kayma mukavemetinin üstünde bir değer almasına rağmen zaman zaman daha düşük değerler alabilmektedir. Hızlı kesme hızı ile geçişken ve kayma tipi kesmeler sonrasında yürütülecek yavaş kesme hızları uygulanırsa kayma gerilmelerinde önce bir pik değere çıktıktan sonra kalıcı kayma mukavemetine eşit olacak şekilde sabitleşme meydana gelmektedir.

Tika ve diğ., (1996)'da üzerinde durulan bir diğer konu NGI-tipi halka kesme deney düzeneğinde alt ve üst ring arasındaki boşlukta meydana gelen numune kayıplarıdır. Aynı deney şartlarında ancak farklı boşluk değerlerinde yapılan deney sonuçlarına göre her ne kadar numune kaybı nedeniyle ölçülen düşey deformasyon değerlerinin gerçeği yansıtmayacağı görüşü hakim olsa da numunenin genel davranışına çok önemli bir etkisinin olmayacağı savunulmaktadır. İki ring arasındaki boşlukta meydana gelen numune kaybının sebebi için, özellikle hızlı deneylerde kayma yüzeyi bölgesinde boşluk oranındaki artışa ve serbest suyun kayma yüzeyine girerek o bölgede su muhtevasını arttırması olarak gösterilmektedir. Aynı çalışmada Varnes (1978)'den alınan kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızına bağlı değişimi Şekil 2.104'te verilmiştir.

Literatürde verilen diğer çalışmalarda da genellikle iddia edildiği gibi, bu çalışmada da kesme hızı 0.01 mm/dak mertebelerine kadar kalıcı kayma mukavemetine hiç etki etmemekte, özellikle 100 mm/dak kesme hızından sonra ise pozitif veya negatif etki ederek kalıcı kayma mukavemetine doğrudan değiştirmektedir. Grafikte (1) şeklinde işaretlenen hız aralığı arazide meydana gelebilecek yeniden harekete geçmiş bir şev kaymasının veya çamur akmasının hızını, (2) şeklinde gösterilen hız aralığı adı geçen çalışmada kullanılan kesme hızı aralığını, (3) ile gösterilen bölge ise hareketin ölçek aralıklarını göstermektedir.



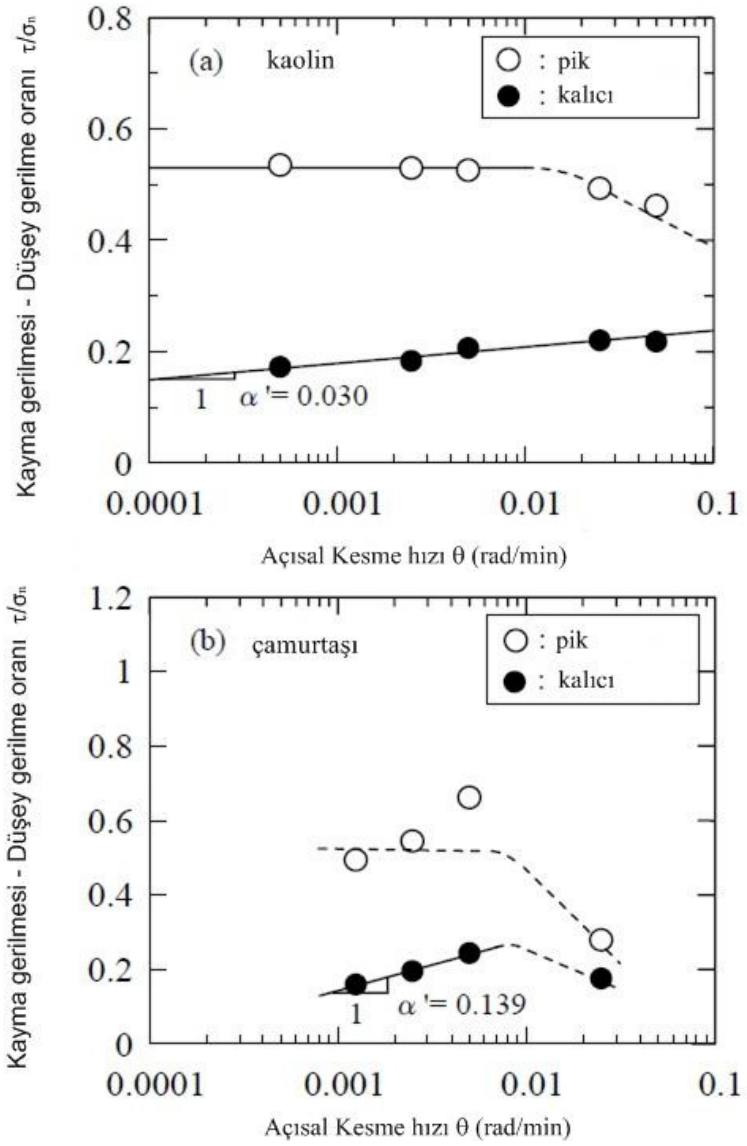

**Şekil 2.104 :** Kohezyonlu zeminlerde kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızına bağlı değişimi (Tika ve diğ., 1996).

Suzuki (2001)'de, kaolin ve çamurtaşı numunelerinde, 0.02 ile 2 mm/dak arasında değişen kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyleri ile hızın, kalıcı mukavemete etkisini incelenmiştir. 176 kPa değerindeki normal gerilme altında bir gün süre ile konsolide edilerek hazırlanan numuneler, halka kesme deneyinde 196 kPa değerindeki normal gerilme altında kesilmiştir 196 kPa değerindeki düşey gerilme altında numunelerin konsolidasyonlarını tamamlamaları için yeteri süre beklenilmiştir. Numunelerin geoteknik özellikleri ve halka kesme deney sonuçları Çizelge 2.21'de verilmiştir.

**Çizelge 2.21 :** Kaolin ve çamurtaşı numunelerinin farklı hızlarda yapılan halka kesme deneyi sonuçları (Suzuki, 2001).

| Numune Adı | K.Y. (%) | $I_P$ (%) | $w_L$ (%) | ω (rad/dak) | V (mm/dak) | $\tau_p$ (kPa) | $\tau_r$ (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 2.105'te, aynı çalışmada sunulan çamurtaşı ve kaolin numuneleri için halka kesme deneylerinden elde edilen τ/σ oranı ile açısal kesme hızı arasındaki ilişki verilmektedir (Suzuki ve diğ., 2001).




**Şekil 2.105 :** Kaolin ve Çamurtaşı için τ/σ oranı ile kayma deformasyonu arasındaki ilişki (Suzuki ve diğ., 2001).

Bu çalışmada kullanılankKaolin numunesinin, 0.0005-0.005 ve 0.025 rad/dak değerlerindeki kesme hızlarında elde edilen kalıcı durumları sonucunda elektron mikroskopu altındaki görünümleri Şekil 2.106'da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi, hız arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Çalışmada bu nedenle, kalıcı mukavemetin kesme hızı ile değişiminin, kayma yüzeyinin pürüzlülüğü ile ilgili olduğu görüşü savunulmaktadır. Aynı çalışmada tam drenajlı şartlarda kalıcı kayma mukavemetinin artan kesme hızının logaritması ile lineer olarak arttığı ifade

edilmektedir. Araştırma kapsamında hız etki katsayısı "α" (Şekil 2.105) olarak isimlendirilen bir katsayı tanımlanmış ve bu katsayı ile zeminlerin çeşitli fiziksel özellikleri arasında ilişki kurulmuştur.

$$\alpha' = \frac{d\left(\frac{\tau_r}{\sigma_n}\right)}{d(\log\theta)} \qquad \textbf{(2.26)}$$

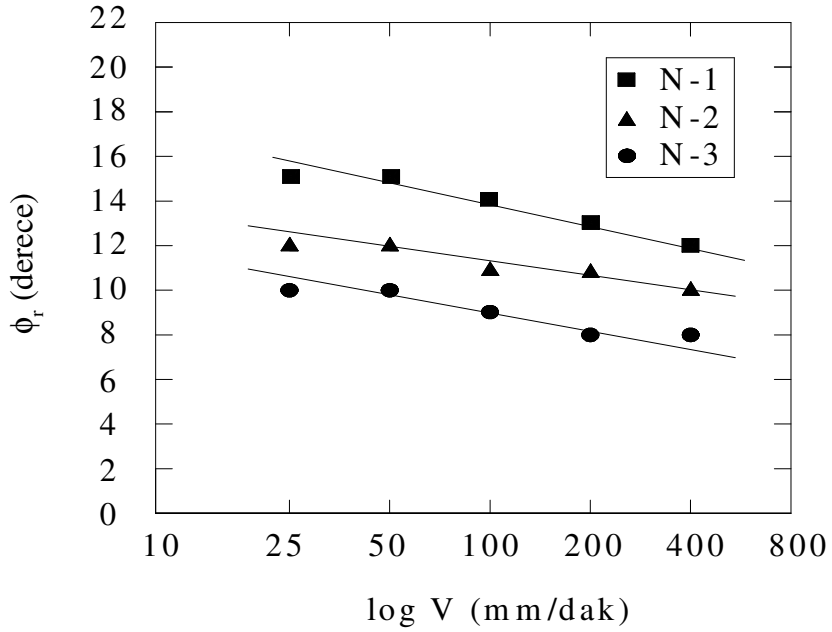
Yazarlara göre hız etki katsayısı ile kil yüzdesinin ve plastisite indisinin bir ilişkisinden söz edilebilirse de, aktivite ile hız etki katsayısı arasında bir ilişki gözlenememiştir.



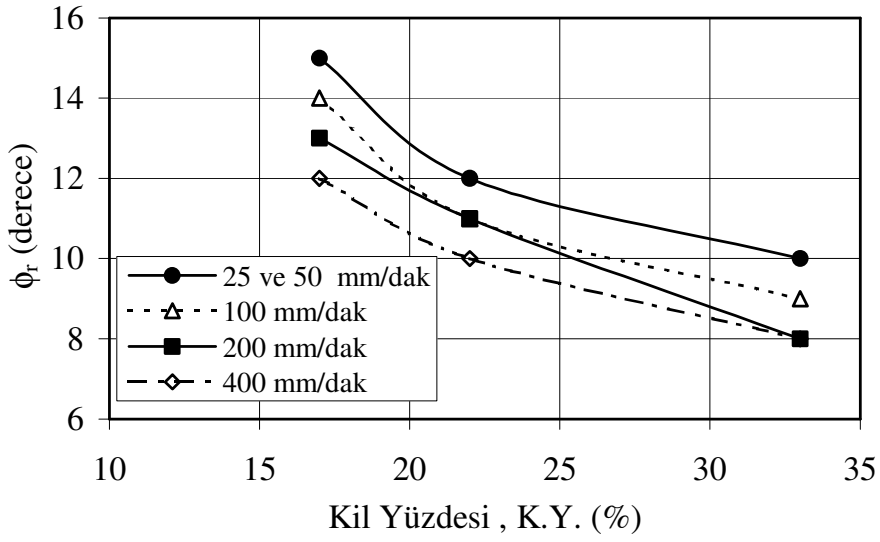
(a) 0.0005 rad/dak (b) 0.005 rad/dak (c) 0.025 rad/dak

**Şekil 2.106 :** Kaolinin farklı kesme hızlarında elde edilen kalıcı durumları için elektron mikroskobu altındaki görünümleri, (Suzuki ve diğ., 2001).

Koltuk (2005) tarafından farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı mukavemet açılarının, kesme hızının logaritması ile değişimi Şekil 2.107'de verilmiştir. Yapılan deneylerde kullanılan kesme hızları oldukça yüksek mertebelerdedir. Görüldüğü gibi, artan kesme hızı ile birlikte kalıcı mukavemet açısı, N-1 numunesinde 3°, N-2 ve N-3 numunelerinde 2° azaltmaktadır. N-4 numunesinde (KY=%0) ise, kalıcı mukavemet açısı artan hız ile değişmemiştir. Kil yüzdesinin ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına ($\phi_r$) etkisi Şekil 2.108'de gösterilmektedir. 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. Yazar bu değerlere istinaden kalıcı mukavemet açısı üzerinde, kil yüzdesinin kesme hızından daha etkili olduğunu savunmaktadır.

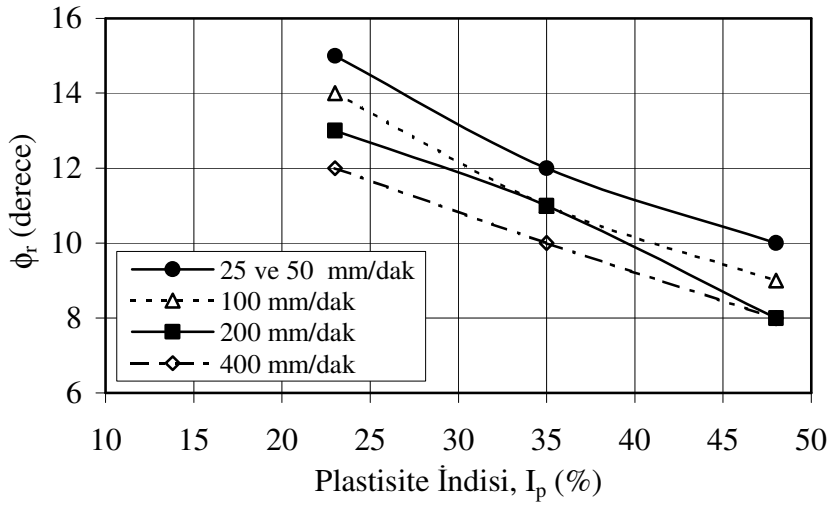



**Şekil 2.107 :** Kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005).



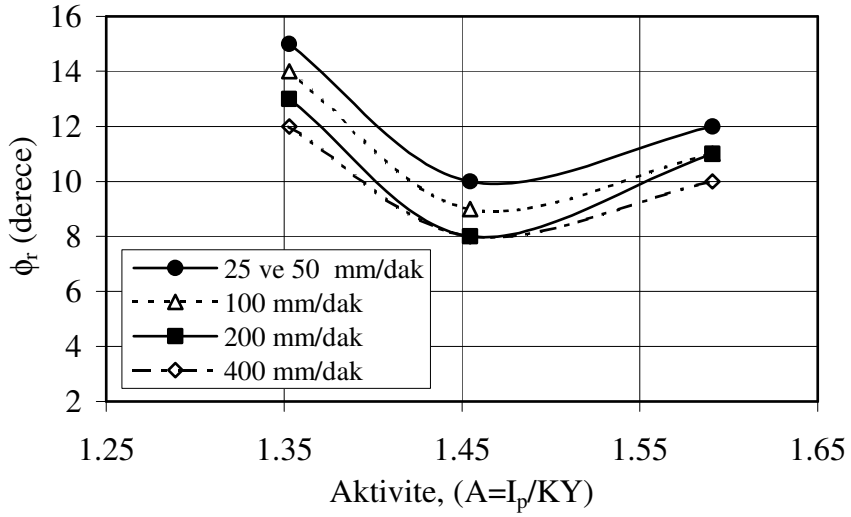

**Şekil 2.108 :** Kil yüzdesi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005).

Aynı çalışmada halka kesme deney aleti ile farklı kesme hızlarında belirlenen kalıcı mukavemet açılarının plastisite indisi ile değişimi için Şekil 2.109'da verilen grafikten de görülebileceği gibi, kil yüzdesi ile $\phi_r$ arasındaki değişime benzer bir ilişki, $\phi_r$ ile $I_P$ arasında mevcuttur. Kalıcı mukavemet açısı, artan plastisite indisi ile azalmaktadır.




**Şekil 2.109 :** Plastisite indisi ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005).

Şekil 2.110'da aynı çalışmada halka kesme deneylerinde uygulanan farklı kesme hızları neticesinde elde edilen kalıcı mukavemet açılarının aktivite ile değişimi gösterilmiştir. Aktivitenin değişimin çok anlamlı değişiklikler yaratmadığı gözlenmektedir.




**Şekil 2.110 :** Aktivite ve kesme hızının kalıcı mukavemet açısına etkisi (Koltuk, 2005).

### 2.3.6 Kesme Modu

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesine yönelik olarak birçok araştırmacı tarafından zeminlerin endeks özelliklerine, fiziksel özelliklerine ve hareketin özelliklerine bağlanan birçok çalışma yapılmıştır. Bu yönde yapılan çalışmaların en

önemlilerinden biri olan ve detayları Lupini ve diğ. (1981)'de verilen araştırmada, kalıcı kayma mukavemeti davranışının mekanizması çözülmeye çalışılmış ve kalıcı kayma mukavemetini kontrol eden ana faktörler incelenmiştir. Yazarlar kendi hazırladıkları karışım numuneler ile doğal zeminler üzerinde yaptıkları deneyler yardımıyla ana kriter olarak kil yüzdesine bağlı bir teori geliştirmişlerdir. Araştırmacılar zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti mekanizmasında kil yüzdesine bağlı olarak üç farklı kesme modundan birisinin ortaya çıktığını iddia etmektedirler. Bu üç kesme modu,

a) türbülanslı kesme modu,

b) kaymalı kesme modu

c) geçişken kesme modu

olarak sıralandırılmaktadır.

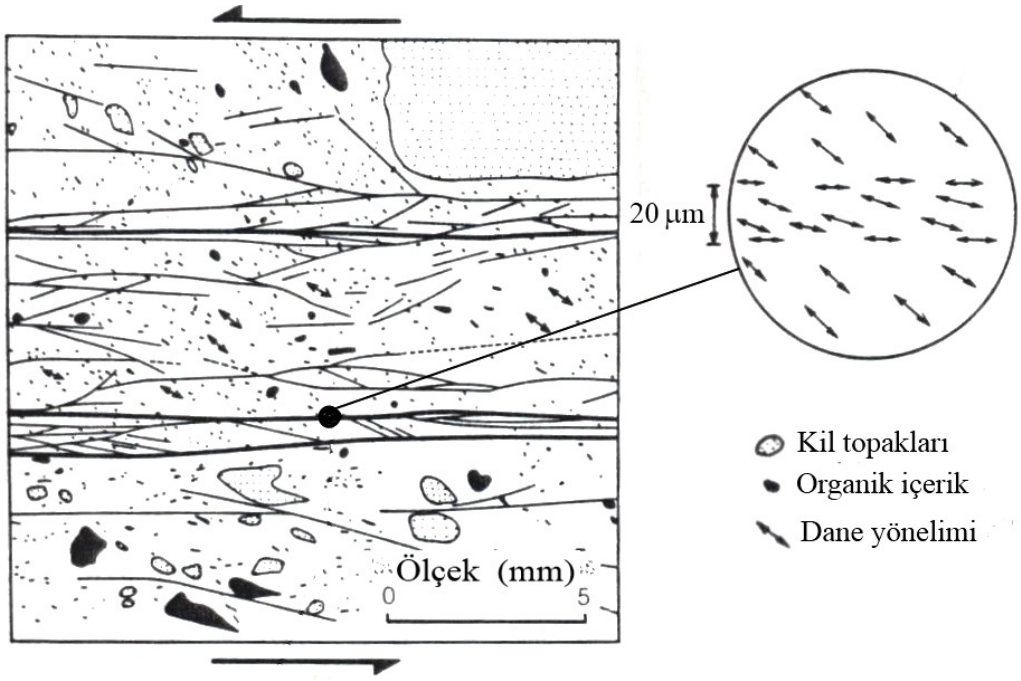
Düşük kil yüzdesine sahip (KY<% 20) olan zeminlerde kalıcı kayma mukavemetini kontrol eden mekanizma kesme yüzeyinde türbülanslı kesme modunun meydana gelmesini sağlamaktadır. Genellikle 25°'nin üzerinde kalıcı kayma mukavemeti açılarının görüldüğü bu tip kesme modunda küçük kayma deformasyonlarında hacim sabit kalmakta ve danelerin arasında herhangi bir yönelim görülmemektedir. Kayma arayüzü ise bir düzlemden daha çok belli bir kalınlıktaki zemin daneciklerinden meydana gelen dilim şeklindedir. Bu dilim içerisinde daneciklerin hareketi kesme düzlemine paralellik göstermeden yuvarlanma şeklindedir. Numune içeriğindeki yapraksı şekle sahip deneciklerin oranının küresel şekle sahip daneciklere göre düşük olduğu durumlarda kesme yüzeyindeki mukavemeti, küresel danecikler arasındaki yük alışverişi kontrol etmektedir. Zeminin içeriğinde yapraksı daneciklerin oranı arttıkça küresel danecikler arasındaki temas azalmakta dolayısıyla mukavemeti küresel şekle sahip daneciklerden daha çok dane boyutu olarak daha küçük ve yapraksı şekle sahip danecikler kontrol etmeye başlamaktadır. Bu noktada erişilen mukavemet seviyeleri de düşmektedir. Ayrıca oluşan kesme yüzeyi civarındaki su muhtevası genel ortam olarak zeminin su muhtevasına göre daha yüksek değerler aldığından mukavemet azalması daha belirgin olmaktadır.

Zemin içeriğindeki kil yüzdesinin yüksek (KY>%50) olduğu durumlarda ise özellikle yapraksı kil minerallerinin oranının artmasıyla birlikte kesme yüzeyinde mobilize olan mukavemeti tamamen bu kil minerallerinin kontrol ettiği

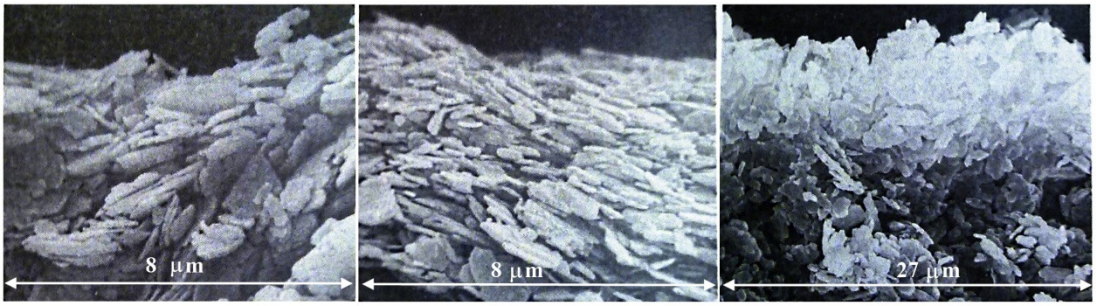
bilinmektedir. İlerleyen deformasyonla birlikte danecikler birbirine paralel hale gelip dane yönlenimi adı verilen durum oluşmakta cilalanmış ve parlak şekilde görülen kesme yüzeyinde kalıcı mukavemet seviyelerine erişilmektedir.

Kil yüzdesi için yukarıda verilen sınırların arasında kalan zeminlerde ise geçişken kesme modu adı verilen davranış gözlenmektedir. Bu tip kesme modunda kesme yüzeylerinde bölgesel cepler halinde hem türbülanslı kesmenin hem de kaymalı kesme halinin oluştuğu kabul edilmektedir. Bu noktada zemin içerisindeki kil minerallerinin tipine ve oranına bağlı olarak yukarıda sayılan kesme modları arasında değişken veya birlikte kesme davranışları oluşmaktadır.

Şekil 2.111'de Skempton (1985) tarafından verilen ve Walton's Wood kilinde gözlenen kesme yüzeyi bölgesi yapısı ve dane yönelimleri görülmektedir. Şekil 2.112'de ise Kanji ve Wolle (1977) tarafından sunulan ve kesme yüzeyinde çekilmiş elektron mikroskobu fotoğrafları verilmiştir. İlk fotoğrafta kısmi dane yöneliminin gözlendiği bir kesme yüzeyi görülmekteyken ikinci fotoğrafta dane yöneliminin bütünüyle meydana geldiği bir kesme yüzeyi verilmiştir. Son fotoğrafta ise konsolide edilmiş ancak kesilmemiş bir yüzeyde dane yöneliminin olmadığı bir numune yüzeyinin fotoğrafı görülmektedir. Bütün fotoğraflarda en üst bölge kesme yüzeyini göstermektedir.




**Şekil 2.111 :** Walton's Wood kilinde gözlenen kesme yüzeyi bölgesi yapısı (Skempton, 1985).




**Şekil 2.112 :** Kesme yüzeyinde çekilen elektron mikroskobu fotoğraflarında dane yönelimi (Kanji ve Wolle, 1977).

Kenney (1977)'e göre kaymalı kesme modu adı verilen bu davranış tipinde kalıcı mukavemet daha çok mineralojiye ve boşluk suyu kimyasına bağlı olarak değişim göstermektedir. Montmorillonit kil minerali içeren ve kil yüzdesi yüksek zeminlerde kalıcı mukavemet düşük denilebilecek değerler (5° ~ 10°) almakta, illit ve kaolinit kil mineralleri içeren kil yüzdesi yüksek zeminlerde ise göreceli olarak daha yüksek (10° ~ 20°) kalıcı kayma mukavemeti açıları görülmektedir. Kil yüzdesi yüksek zeminlerde genellikle pik mukavemet davranışları gerilme geçmişinden etkilense de, kalıcı mukavemet açısından bu durum dikkate değer bir değişime sebep olmamaktadır. Ancak düşük gerilme seviyelerinde yüksek kil yüzdesine sahip zeminlerde kalıcı mukavemetin çok düşük düzeyde kalması nedeni ile sıkıntılı durumlar oluşturabilmektedir. Kil yüzdesi ve plastisitesi yüksek zeminlerin özellikle aşırı konsolide duumlarında pik mukavemet sonrası oluşan göçme genellikle gevrek kırılma şeklinde oluşmaktadır.

Dane şekli ve daneler arası sürtünme açısına bağlı olarak olası muhtemel kesme modları Lupini ve diğ. (1981)'de verildiği şekilde Çizelge 2.22'de verilmiştir. Çizelgede görülen $\phi_\mu$ terimi daneler arası sürtünme açısını, $\phi'_{cv}$ ise numunede hacimin sabit tutulmaya zorlandığı durumda elde edilen sürtünme açısını göstermektedir.

**Çizelge 2.22 :** Dane şekli ve daneler arası sürtünme açısına bağlı olarak olası muhtemel kesme modları (Lupini ve diğ., 1981).

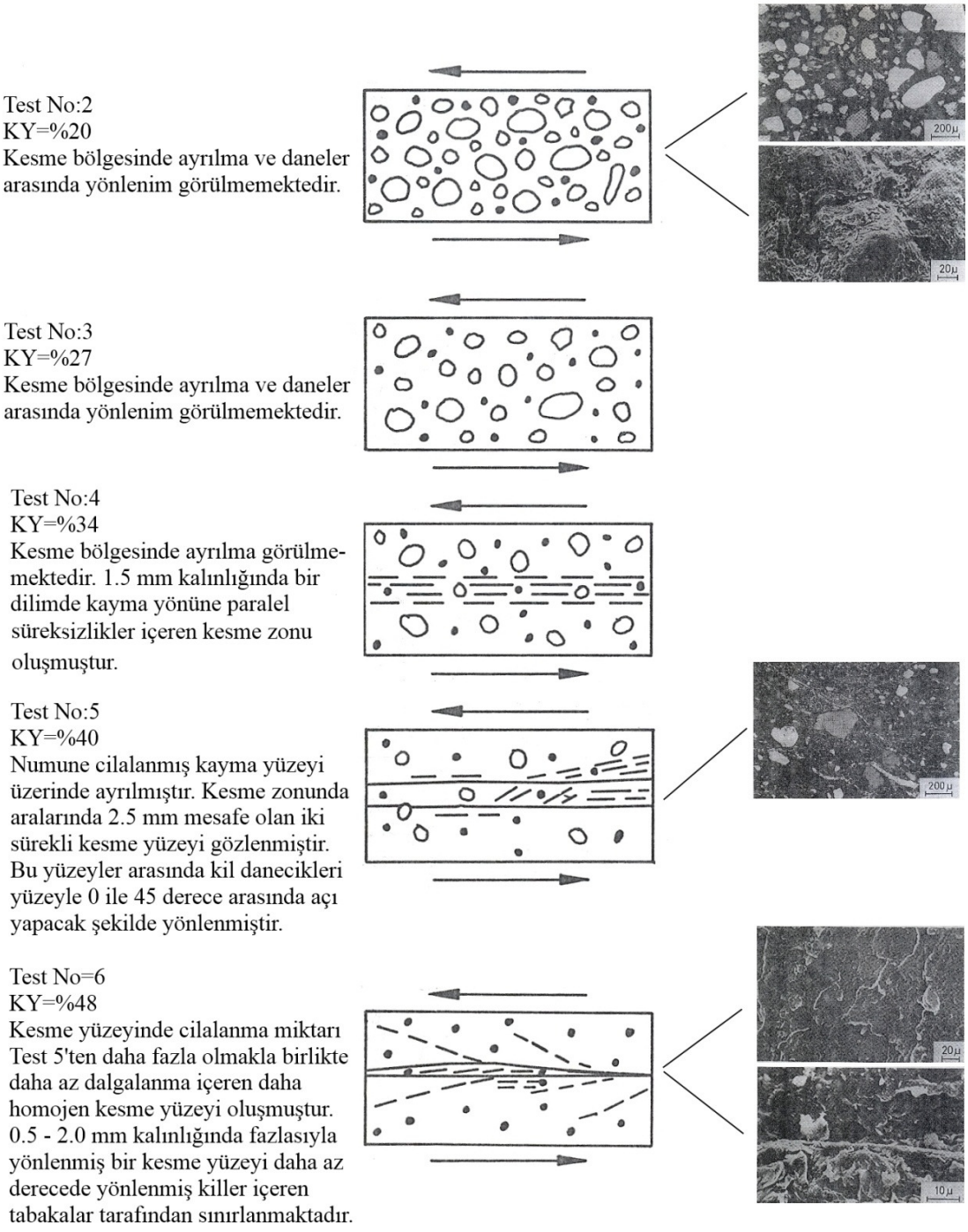
| Baskın dane şekli | Daneler arası sürtünme açısı $\phi_\mu$ (°) | |
|---|---|---|
| | Yüksek | Düşük |
| İri ve yuvarlak | Türbülanslı kesme ($\phi'_r=\phi'_{cv}$) | Türbülanslı kesme ($\phi'_r=\phi'_{cv}$) |
| Yapraksı | Türbülanslı kesme ($\phi'_r=\phi'_{cv}$) | Kaymalı kesme($\phi'_r=f(\phi_\mu)$) |

Lupini ve diğ. (1981) tarafından verilen ve Çizelge 2.23'te görülen tabloda ise ideal koşullarda numunenin gerilme geçmişine bağlı olarak meydana gelecek kesme modu, kesme yüzeyinde dane yöneliminin oluşup oluşmayacağı, beklenen kalıcı kayma mukavemeti açısı seviyesi ve göçme davranışının ne olacağı tanımlanmıştır.

**Çizelge 2.23 :** Halka kesme deneyinde yükleme ve kesme modu durumuna göre beklenen idealleştirilmiş davranış (Lupini ve diğ., 1981).

| Gerilme geçmişi durumu | Kesme modu | |
|---|---|---|
| | Dane yönelimi var | Dane yönelimi yok |
| Normal konsolide, pekleşme | • Türbülanslı kesme,<br>• Gevrek olmayan davranış,<br>• Yüksek kayma mukavemeti açısı | • Kaymalı kesme<br>• Gevrek davranış<br>• Düşük kayma mukavemeti açısı |
| Aşırı konsolide | • Gevrek ve kabarmalı davranış,<br>• Yüksek kayma mukavemeti açısı | • Gevrek olmayan davranış,<br>• Düşük kayma mukavemeti açısı |

Aynı yayında çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları değerlendirilerek farklı karışımlarda hazırlanmış numunelerin kil yüzdelerine bağlı olarak oluşan kayma yüzeyi yapıları verilmiştir. Şekil 2.113'te görüldüğü gibi kil yüzdesinin artmasıyla beraber dane yönelimlerinin arttığı, kayma yüzeyinin daha da belirginleştiği ve kayma yüzeyinin kalınlığının azaldığı ifade edilmektedir. Buna ek olarak aynı şekilde yapılan deneylerin sonunda elde edilen kayma yüzeylerinin elektron mikroskobu ile fotoğrafları çekilmiş ve dane yönelimlerinin olup olmadığı gözlenmiştir. Çizilen kayma yüzeyi şekillerinde görüldüğü gibi kil yüzdesinin artması ile birlikte oluşan kayma yüzeyinde mukavemeti kontrol eden daneciklerin daha çok killerden oluştuğu söylenmektedir. Lupini ve diğ. (1981)'de aynı çalışmanın sonuçlarında verilen grafikte, kesme yüzeyinde oluşacak kalıcı kayma gerilmesinin düşey efektif gerilmeye oranı ile granüler boşluk oranı şeklinde ifade edilen $e_g$ teriminin ilişkisine bağlı olarak kesme modunun belirlenebileceği ifade edilmiştir.




**Şekil 2.113 :** Happisburg-Londra kili karışımlarında göçme sonrası kesme yüzeyi yapısı (Lupini ve diğ., 1981).

Şekil 2.114'te verilen bu grafikte 5 ayrı bölge tanımlanmış ve bu bölgelere karşı gelen olası kesme modları işaretlenmiştir. Bu grafikte T ile gösterilen bölgede türbülanslı kesme modu, $T_1$ ile gösterilen bölgede ise $\phi_\mu > \phi'_{cv}$ şartı için yapraksı kil minerallerinde oluşan türbülanslı kesme durumu gözleneceği ifade edilmektedir. S harfi ile gösterilen bölgede kaymalı kesme halinin meydana geleceği söylenirken $S_1$ ile işaretlenen bölgede pürüzsüz bir yüzey üzerinde kaymalı kesme durumu

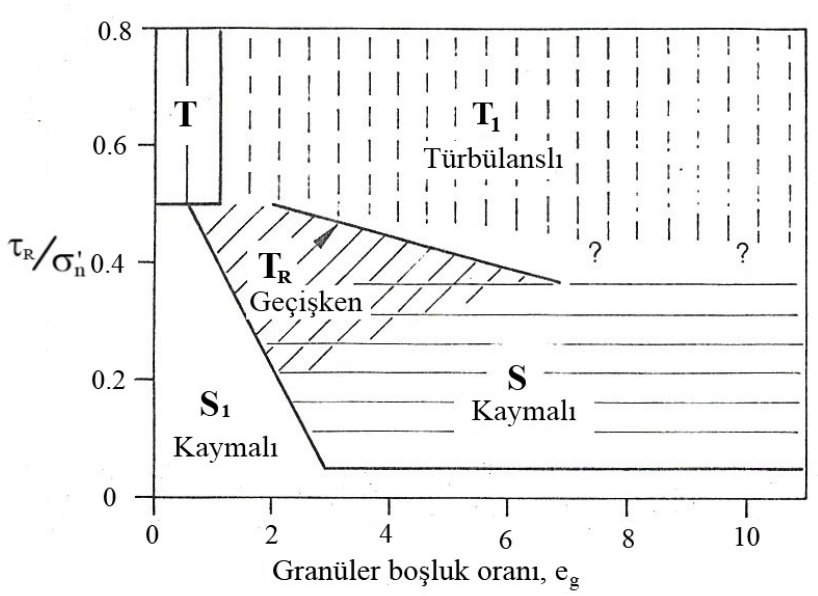
oluşabileceği ifade edilmektedir. $T_R$ ile gösterilen bölgede ise geçişken kesme modunun hakim olacağı dolayısı ile kesme yüzeyinde cepler halinde hem kaymalı kesme durumu hem de türbülanslı kesme modunun oluşacağı tahmin edilmektedir. $e_g$ olarak gösterilen granüler boşluk oranı parametresi ise

$$e_g = \frac{yaprakları\ danecikler\ ile\ su\ hacmi\ toplamı}{İri\ ve\ yuvarlak\ deneciklerin\ hacmi} = \frac{r_{vc}}{1 - r_{vc}} \qquad \textbf{(2.27)}$$

olarak tanımlanmaktadır. Denklemdeki $r_{vc}$ terimi ise

$$r_{vc} = \frac{yaprakları\ danecikler\ ile\ su\ hacmi\ toplamı}{toplam\ hacim} \qquad \textbf{(2.28)}$$

şeklinde tanımlanmıştır.




**Şekil 2.114 :** Granüler boşluk oranına göre kesme modunun değişimi (Lupini ve diğ., 1981).

# 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, kalıcı kayma mukavemetinin farklı laboratuvar deney yöntemleri ile belirlenmesi ve kalıcı mukavemete etkiyen faktörlerin incelemesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, ince daneli doğal zemin numuneleri üzerinde halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi, kesme kutusu deneyi, üç eksenli basınç deneyi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Numuneler üzerinde diğer standart zemin mekaniği deneyleri de yapılmıştır. Bu kapsamda, dane çapı dağılımını belirlemek üzere elek analizi ve hidrometre analizi, kıvam limitleri deneyleri, piknometre deneyi ve odömetre deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları değerlendirilerek kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızı, kıvam limitleri, kil yüzdesi vb. zemin özellikleri ile değişimi incelenmiş ve aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Bu bölümde araştırma kapsamında kullanılan deney numunelerinin özellikleri ve kullanılan deney sistemleri hakkında bilgiler yer almaktadır.

## 3.1 Kullanılan Numunelerin Geoteknik Özellikleri

Bu çalışma kapsamında kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi, kalıcı kayma mukavemetine etkiyen parametrelerin incelenmesi amacıyla farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip doğal numuneler kullanılmıştır. Numuneler üzerinde halka kesme, tekrarlı kesme kutusu, standart kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmış, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Numune seçiminde kıvam limitlerinin geniş bir aralıkta değişmesine özen gösterilmiştir. Numuneler üzerinde ilk olarak sınıflandırma deneyleri daha sonra mihendislik özelliklerini belirlemek için mukavemet ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Aynı numune üzerinde farklı deneylerin yürütülebilmesi, deneylerin aynı numune üzerinde tekrarlanması gereği, hazırlanmış numune kullanımı zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla numuneler konsolidometre ve Rowe hücresi kullanılarak belirli düşey yükler altında hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler nem odasında saklanmıştır. Üzerinde standart sınıflandırma deneyleri yapılan 50 numune, sonraki işlemler için Şekil 3.1'de görüldüğü gibi plastik kaplarda muhafaza edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin herbirinin üzerinde

elek analizi, hidrometre deneyi, kıvam limitleri ve dane birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmış ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) ve TS 1500'e göre sınıflandırılmıştır. Yapılan deneylerde ASTM standartları temel alınmıştır. Numunelerin fiziksel özellikleri ve zemin sınıfları Çizelge 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1 :** Çalışma kapsamında kullanılan numunelerden bazıları.

Bu çizelgede görüldüğü gibi çalışmada kullanılan numunelerin likit limit ($w_L$) değerleri %24 ile % 340 arasında, plastik limit ($w_P$) değerleri % 12 ile % 43 arasında ve plastisite indisi (Ip) değerleri % 7 ile % 297 arasında değişmektedir. Numunelrin ince dane oranları (İDO) % 52 ile % 100 arasında değişirken, kil yüzdeleri (KY) %2 ile % 100 arasında değişmektedir. Numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerinin histogram dağılımları Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te sırası ile verilmiştir.

**Çizelge 3.1 :** Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin özellikleri.

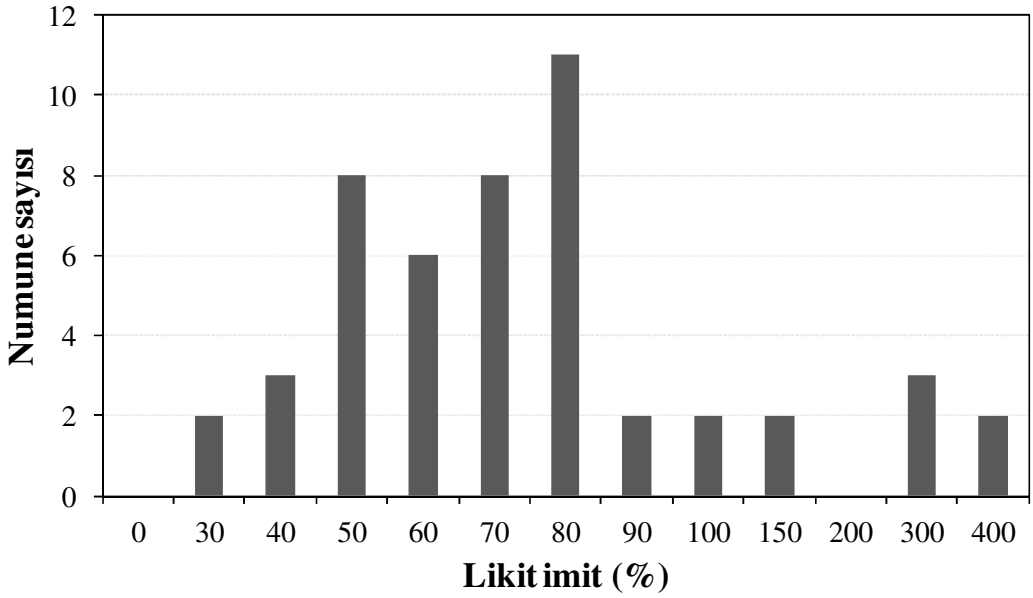
| Numune Adı | $w_L$ | $w_P$ | $I_p$ | İDO | KY | $\gamma_s$ | Zemin Sınıfı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | kN/m$^3$ | BZSS | TS |
| H1 | 79 | 32 | 47 | 99 | 48 | 27.1 | CH | CH |
| H2 | 92 | 33 | 59 | 97 | 50 | 27.6 | CH | CH |
| H3 | 50 | 25 | 25 | 97 | 30 | 27.1 | CH | CH |
| H4 | 48 | 20 | 28 | 88 | 27 | 27.6 | CL | CI |
| H5 | 113 | 34 | 79 | 100 | 26 | 27.5 | CH | CH |
| H6 | 39 | 23 | 16 | 78 | 7 | 27.1 | CL | CI |
| H7 | 92 | 42 | 50 | 100 | 69 | 27.3 | MH | MH |
| H8 | 68 | 25 | 43 | 98 | 32 | 27.4 | CH | CH |
| H9 | 24 | 17 | 7 | 75 | 9 | 27.4 | CL-ML | CL |
| H10 | 63 | 20 | 43 | 69 | 28 | 27.1 | CH | CH |
| H11 | 70 | 25 | 50 | 97 | 34 | 27.2 | CH | CH |
| H12 | 74 | 28 | 46 | 97 | 25 | 27.2 | CH | CH |
| H13 | 75 | 28 | 47 | 100 | 20 | 27.1 | CH | CH |
| H14 | 73 | 31 | 42 | 98 | 26 | 27.5 | CH | CH |
| H15 | 58 | 21 | 37 | 76 | 32 | 27.3 | CH | CH |
| H16 | 90 | 36 | 54 | 100 | 60 | 27.4 | CH | CH |
| H17 | 64 | 28 | 36 | 100 | 30 | 27.3 | CH | CH |
| H18 | 250 | 43 | 217 | 99 | 67 | 27.5 | CH | CH |
| H19 | 62 | 21 | 41 | 99 | 13 | 27.3 | CH | CH |
| H20 | 330 | 41 | 289 | 100 | 100 | 27.5 | CH | CH |
| H21 | 70 | 35 | 35 | 100 | 32 | 27.5 | MH | MH |
| H22 | 71 | 43 | 28 | 84 | 25 | 27.5 | MH | MH |
| H23 | 340 | 43 | 297 | 96 | 32 | 27.5 | CH | CH |
| H24 | 230 | 42 | 188 | 98 | 71 | 27.4 | CH | CH |
| H25 | 290 | 42 | 248 | 99 | 63 | 27.4 | CH | CH |
| H26 | 43 | 23 | 20 | 78 | 23 | 27.1 | CL | CI |
| H27 | 27 | 12 | 15 | 52 | 2 | 27.3 | CL | CL |
| H28 | 61 | 26 | 35 | 99 | 19 | 27.2 | CH | CH |
| H29 | 74 | 26 | 48 | 93 | 33 | 27.4 | CH | CH |
| H30 | 48 | 21 | 27 | 87 | 15 | 27.1 | CL | CI |
| H31 | 74 | 28 | 46 | 93 | 16 | 27.2 | CH | CH |
| H32 | 35 | 17 | 18 | 66 | 5 | 27.2 | CL | CI |
| H33 | 40 | 17 | 23 | 89 | 17 | 27.1 | CL | CI |
| H34 | 75 | 29 | 46 | 100 | 41 | 27.3 | CH | CH |
| H35 | 46 | 18 | 28 | 82 | 12 | 27.2 | CL | CI |
| H36 | 71 | 25 | 46 | 88 | 6 | 27.1 | CH | CH |

**Çizelge 3.1**: Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin özellikleri (devamı).

| Numune Adı | $w_L$ | $w_P$ | Ip | İDO | KY | $\gamma_s$ | Zemin Sınıfı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | kN/m$^3$ | BZSS | TS |
| H37 | 46 | 27 | 19 | 74 | 7 | 27.1 | CL | CI |
| H38 | 55 | 18 | 37 | 65 | 18 | 27.2 | CH | CH |
| H39 | 57 | 22 | 35 | 97 | 22 | 27.1 | CH | CH |
| H40 | 67 | 26 | 41 | 100 | 24 | 27.2 | CH | CH |
| H41 | 59 | 27 | 32 | 91 | 17 | 27.2 | CH | CH |
| H42 | 128 | 33 | 95 | 97 | 28 | 27.1 | CH | CH |
| H43 | 89 | 27 | 62 | 96 | 24 | 27.2 | CH | CH |
| H44 | 41 | 17 | 24 | 88 | 14 | 27.3 | CL | CI |
| H45 | 72 | 25 | 47 | 99 | 33 | 27.1 | CH | CH |
| H46 | 55 | 18 | 37 | 76 | 21 | 27.2 | CH | CH |
| H47 | 75 | 29 | 46 | 100 | 41 | 27.2 | CH | CH |
| H48 | 42 | 19 | 23 | 74 | 17 | 27.1 | CL | CI |
| H49 | 59 | 24 | 35 | 82 | 16 | 27.2 | CH | CH |
| H50 | 53 | 22 | 31 | 86 | 19 | 27.0 | CH | CH |

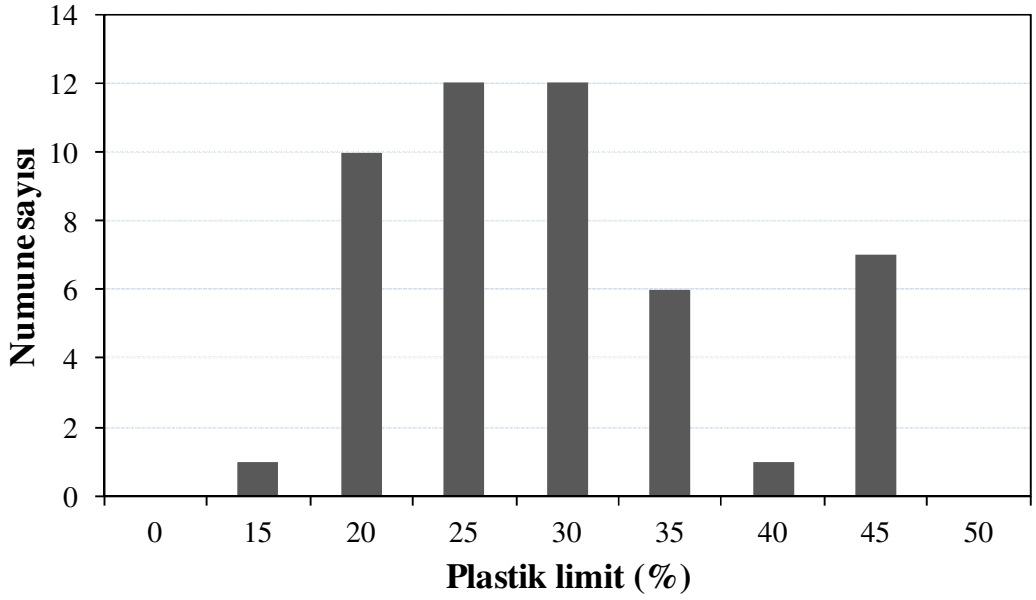
$w_L$:Likit Limit; $w_p$:Plastik Limit; $I_p$:Plastisite İndisi; IDO:İnce Dane Oranı; KY:Kil Yüzdesi; Gs:Dane Özgül Ağırlığı

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi likit limit değerleri % 40 ile % 90 arasında yoğunlaşmaktadır. % 50'den düşük likit limite sahip düşük plastisiteli numune sayısı 13 iken, % 128 ile % 230 değerleri arasında likit limite sahip numune bulunmamaktadır. Likit limiti % 100'den daha büyük değere sahip numune sayısı 7'dir.



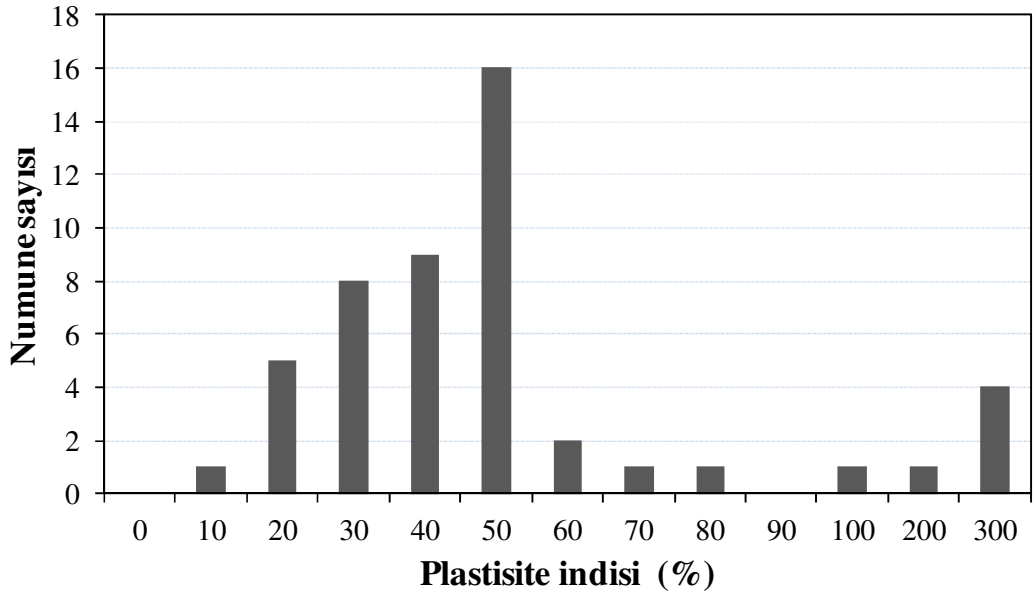

**Şekil 3.2 :** Kullanılan numunelerin likit limitlerinin dağılımı.

Numunelerin plastik limiti değerleri göz önüne alındığında plastik limitlerinin % 15 ile % 30 arasında yoğunlaştığı ve tamamının % 50'den daha düşük değerler aldığı görülmektedir.



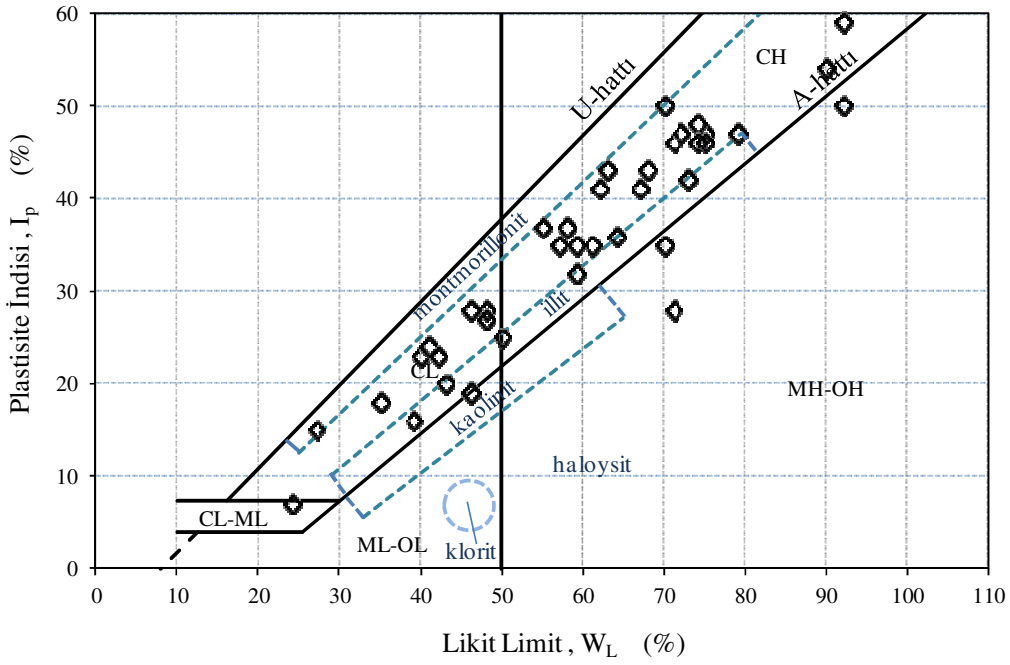

**Şekil 3.3 :** Kullanılan numunelerin plastik limitlerinin dağılımı.

Plastisite indislerine bakıldığında ise numunelerin çoğunluğu % 50 ile %20 değerleri arasında yer almaktadır.



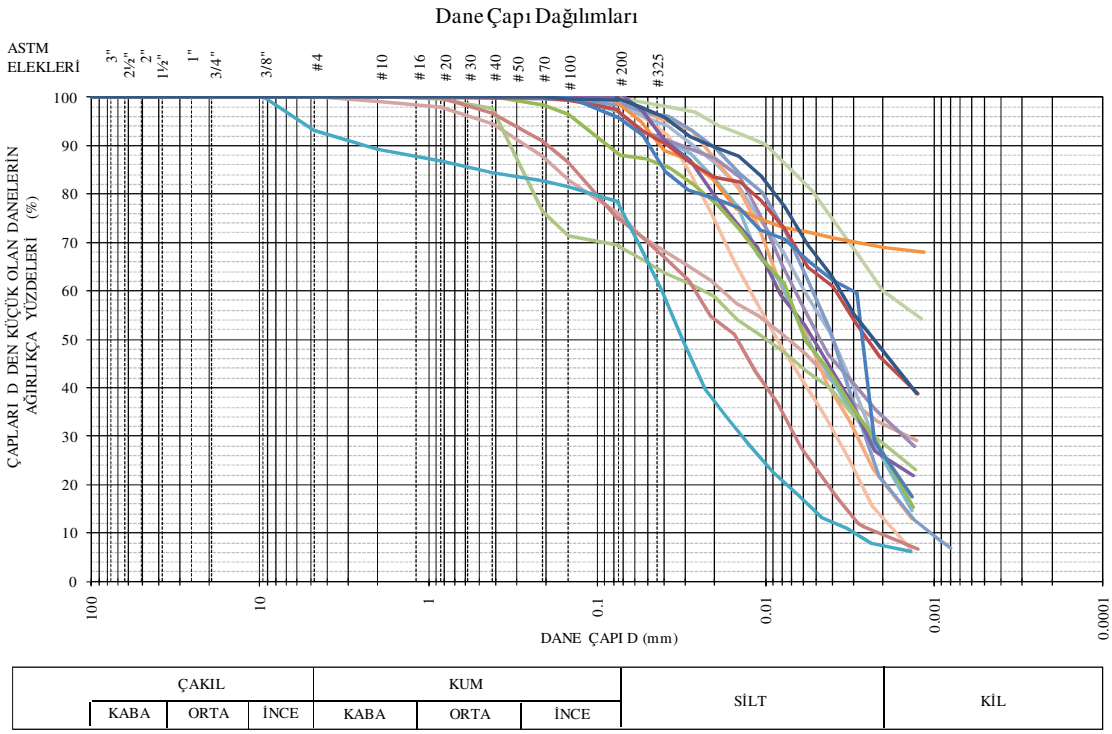

**Şekil 3.4 :** Kullanılan numunelerin plastisite indislerinin dağılımı.

Şekil 3.5'te numunelerin plastisite kartındaki yerleri verilmiştir. Aynı kart üzerinde Holtz ve Kovacs (1981) tarafından verilen mineralojik yerleşim de bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan numunelerden bazıları içerdikleri kil minerali tipinin etkisi nedeniyle likit limitleri %110'dan büyük olduğundan bu Casagrande kartında görülmemektedir. Bütün numunelerin işlenmiş olduğu daha geniş aralıklı plastisite kartı Ekler bölümünde verilmiştir.

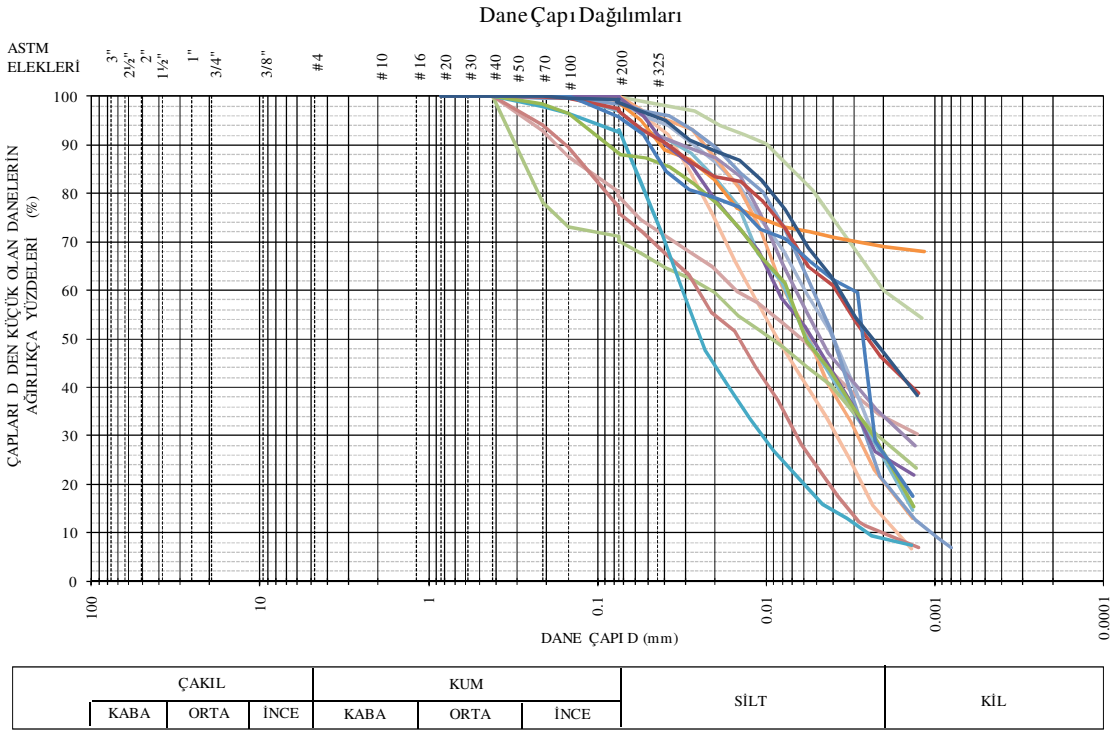



**Şekil 3.5 :** Numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleşimi (Holtz ve Kovacs, 1981'den uyarlanmıştır).

Deneylerde kullanılan numunelerin ıslak elek analizi ve hidrometre deneyleri sonucunda elde edilen dane çapı dağılımı eğrileri Şekil 3.6'da görülmektedir. Kullanılan numunelerin ince dane oranları % 52 ile % 100 oranında değiştiğinden numuneler ince daneli zemin olarak sınıflandırılmakta iken bir kaç numunenin kaba dane oranı (örneğin H6 numunesi için % 7 çakıl ve % 15 kum) dikkate değer derecede yüksektir. Deneylerde numune boyutundan kaynaklanacak uygunsuzlukların önüne geçmek amacıyla standart bir değer olarak çalışmada kullanılan numunelerin 40 nolu elek (<0.425 mm) altında kalan kısımları kullanılmıştır. 40 nolu elek üstü danelerin ayrıldıktan sonraki dane çapı dağılımları Şekil 3.7'de verilmiştir.



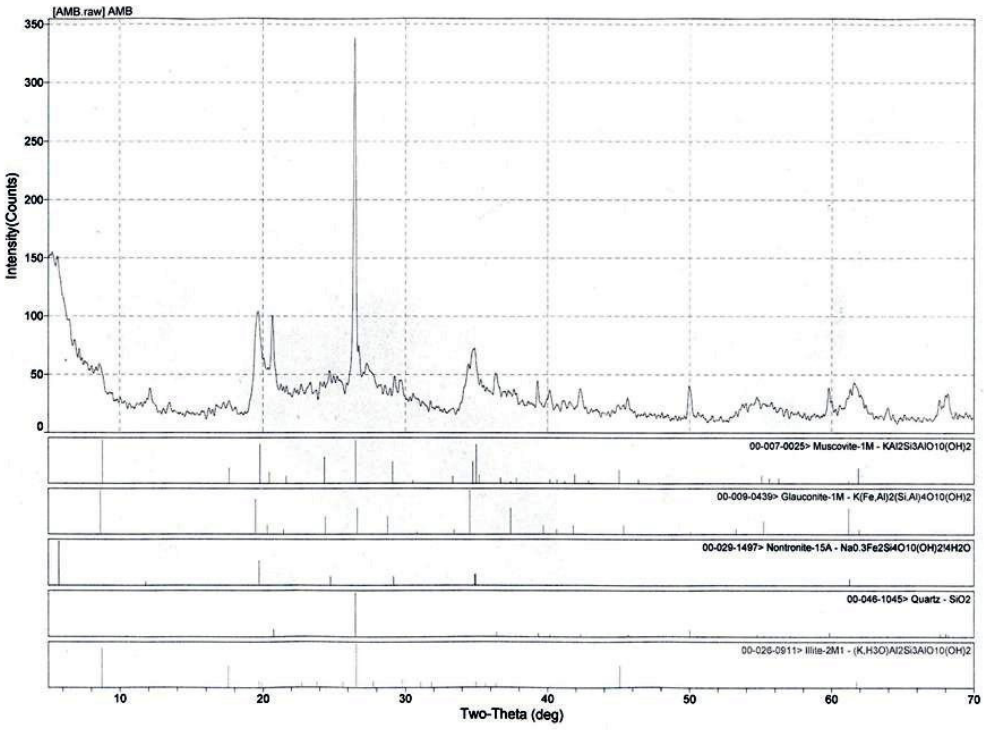

**Şekil 3.6 :** Numunelerin dane çapı dağılımı eğrileri.



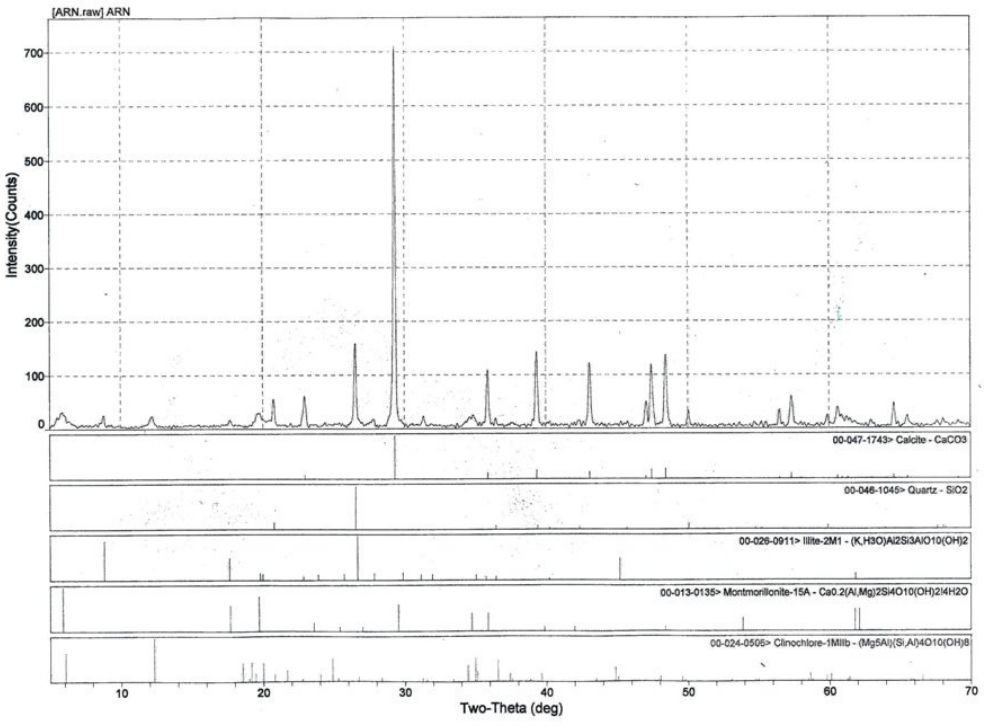

**Şekil 3.7 :** Numunelerin 40 nolu elek altına geçen kısmının dane çapı dağılımı eğrileri.

### 3.1.1 Numunelerin Mineralojik Yapıları

Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetine mineralojik yapının etkili olduğu bilinmektedir. X-Işını Kırınım Deneyi ince daneli zemin minerallerini ve minerallerin kristal yapılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. X dalgaları elektromanyetik spektrumdaki birçok dalgadan biri olup dalga boyları 0.01 Å ile 100 Å arasında değişmektedir. Araştırılan malzemeye çarpan yüksek hızlı elektronların dalga hızları yardımıyla kil mineralleri belirlenebilmektedir. X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınları karakteristik bir düzen içerisinde kırılması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi (sıvı, toz, kristal ve ince film halindeki) analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını Kırınım cihazıyla kayaçların, kristalin malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir. Zemin içerisinde bulunup 0.02 mm'den daha küçük dane çapına sahip olan ancak kil mineralleri içermeyen zeminlerde bu yöntem ile belirlenebilmektedir. Bu yöntem en iyi tek mineralli killerin yapısının belirlenmesinde iyi sonuçlar verse de içeriğinde farklı kil mineralleri bulunan zeminlerde çok iyi sonuçlar vermemektedir. Çalışma kapsamında numunelerin mineralojik yapısını ve baskın kil minerali tiplerini belirlemek için X Işını Kırınım (XRD) deneyleri yaptırılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan XRD deney sonuçlarına örnek olarak H2 ve H8 nolu numunelerin analiz sonuçları Şekil 3.8'de ve Şekil 3.9'da verilmiştir. XRD sonuçları incelendiğinde numunelerde bulunan kil minerali tipleri görülmektedir. Örneğin H2 numunesinde bulunan kil minerali tipleri; mika grubu mineral tiplerinden Muskovit ve Glakonit mineralleri, Nontronit minerali, kuvarz minerali ile illit mineralidir. H8 numunesinde bulunan kil minerali tipleri ise; kalsit minerali, kuvarz minerali, illit minerali, montmorillonit minerali ve klinoklorittir. Laboratuvarda ve kurum içinde her numune için bu deneyi uygulama imkanı olamamıştır. Birkaç numune üzerinde kurum dışındaki laboratuvarlarda XRD deneyleri yaptırılmış ve deney sonuçları incelenmiştir. Yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçlar için bir sınırlayıcı yan olarak numune içieriğindeki kil minerallerinin her birinden ne kadar olduğuna dair bir bilgi olmaması bu noktada minerolojik sınıflandırma yapılmasını engellemektedir.




**Şekil 3.8 :** H2 kodlu numunenin XRD analiz sonuçları.




**Şekil 3.9 :** H8 kodlu numunenin XRD analiz sonuçları.

Mineral tiplerinin miktarları konusunda bir bilgi edinilmediğinden pratik olarak XRD sonuçlarının çalışma kapsamında değerlendirmelerde kullanılması mümkün olmamıştır. Bu nedenle diğer numuneler için deney yaptırılmamış ve XRD deneyi bu çalışmada kapsam dışı bırakılmıştır.

### 3.2 Numune Hazırlama Yöntemi

Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek üzere halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullanılan numunelerin hazırlanmasında Rowe hücresi ve konsolidometreler kullanılmıştır. Numuneler İTÜ Hamdi Peynircioğlu Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan konsolidometre ve Rowe hücrelerinde 70-80 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek hazırlanmıştır. Çalışma öncesinde laboratuvarda bulunan ve 25 cm iç çapa sahip Rowe hücresi ve 19.5 cm iç çapa sahip konsolidometrelerin kullanılması planlanmıştır (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10 :** Kullanılan Rowe hücresi ve konsolidometreler.

Ancak bu aşamada;

- Rowe hücresinden çıkan numune yüksekliğinin yapılacak deneyler için yetersiz olması,

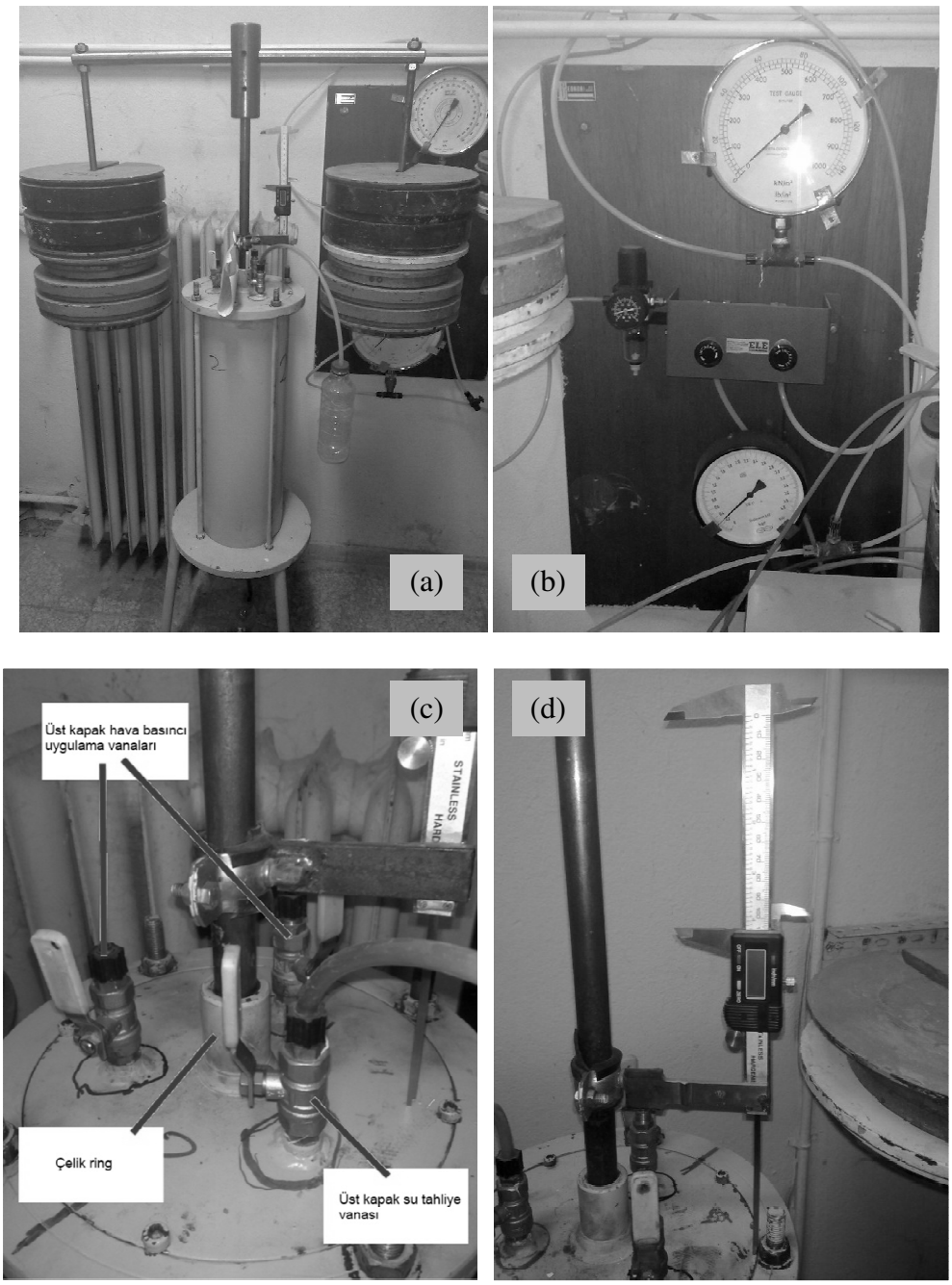
- Hem Rowe hücresinin hem de konsolidometrelerde hazırlanan numunelerin çapı, halka kesme deneyi için gerekli olan numune çapından 5 ila 10 cm büyük olması sebebiyle hazırlanmış numune israfının fazla olması,
- Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin hazırlama sürecinin konsolidasyon süreleri nedeniyle uzun olması,
- Konsolidometrelerde büyük çaplı numunelerin konsolidasyonu için istenilen düşey gerilmeleri sağlayabilmek için gerekli ölü yük açısından daha yüksek miktarda ağırlık ihtiyacı, bunun yerine hava basıncından yararlanma isteği,
- Konsolidasyon öncesinde çamur bulamacın hazırlandığı 40 nolu elek altı (0.45mm) kuru malzemenin öğütülmesinin zorlukları,
- Numune hazırlık sürecinin deneyleri aksatacak şekilde zaman kısıtı yaratmasını engellemek

amacıyla deneylerde kullanılacak numunelerin daha uygun boyutlarda hazırlanması için yeni konsolidometrelerin yaptırılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla 17.7 cm iç çapa ve yaklaşık 0.5 cm et kalınlığına sahip mukavemeti yüksek plastik boruların kullanıldığı ve aynı zamanda hava basıncı ile de çalışabilen örneği Şekil 3.11'de verilen üç adet yeni konsolidometre tasarlanmış ve imal ettirilmiştir.

Çamur konsolidometrelerin Şekil 3.11-(a)'da görüldüğü gibi ölü yük kullanılarak yüklenmesi temel olarak hedeflense de buna ek olarak sistemin hava basıncı ile çalışabilmesi için gerekli ilaveler (Şekil 3.11-(b)) yapılmıştır. Konsolidometrelerde alt ve üst kapaklardan su drenajını sağlamak üzere vana montajına ilave olarak hava basıncının verilmesi amacıyla üst kapakta iki ayrı vana daha eklenmiştir. Hava basıncı ile çalışılma durumunda sistemden basınçlı hava, su ve numune kaçaklarının önlenmesi amacıyla birleşim bölgelerinde O-ringler kullanılmıştır.

Ayrıca yükün numuneye uygulandığı yükleme başlığına ve yük askılarına bağlı pistonun hareketli olması nedeniyle üst kapak ile piston arasında hava kaçağını önleyen özel çelik ring (Şekil 3.11-(c)) uygulaması yapılmıştır. Bu sayede gerekirse hava basıncı kullanılarak ölü yük ile çıkılamayacak yüksek basınçlara çıkma imkanı kazanılmıştır. Numune hazırlığı sürecinde konsolidasyon aşamasında numunede meydana gelecek düşey oturmaları ölçebilmek maksadıyla Şekil 3.11-(d)'de görülen 1/100 mm hassasiyetli dijital kumpaslar sisteme monte edilmiştir. Alt ve üst drenaj vanalarından dışarı atılan suların toplanması amacıyla hazneler drenaj hortumları

yardımıyla vanalara bağlanmıştır. Bu sayede sistemden çıkan su miktarı kontrol altına alınmıştır.



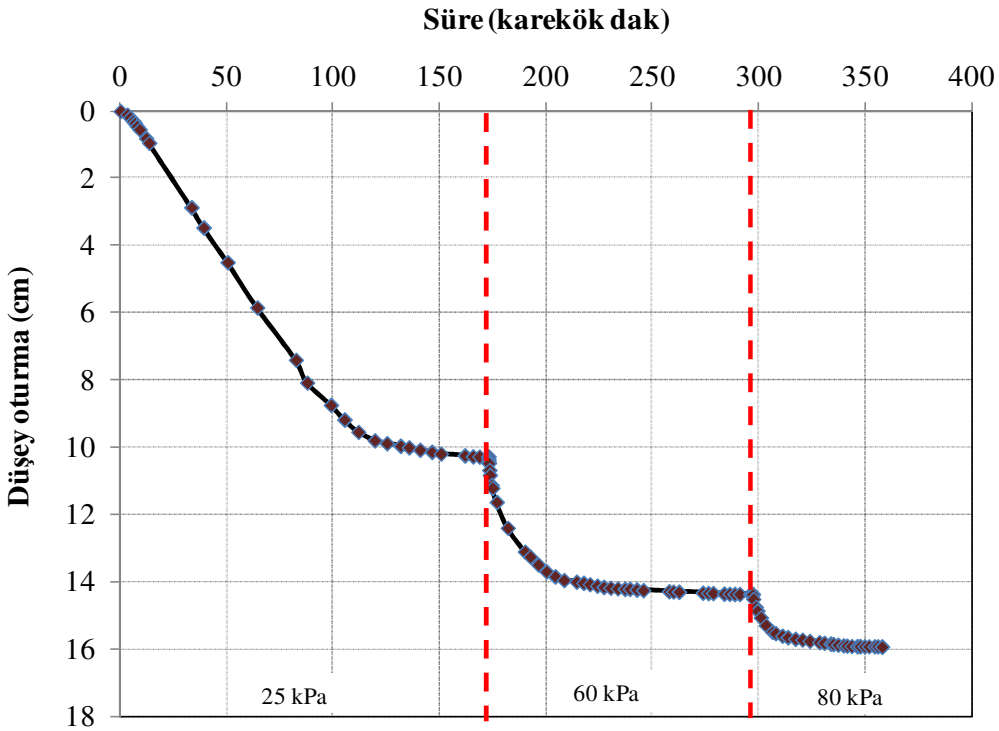

**Şekil 3.11 :** Çalışma için yaptırılan konsolidometrelerde (a) ölü yük ile yükleme (b) hava basıncı ile yükleme , (c) Yaptırılan konsolidometrelerin hava basıncı uygulama vanaları, (d) Düşey şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla kullanılan 1/100 mm hassasiyetli dijital kumpaslar.

Numune hazırlığı aşamasında, malzeme öncelikle ASTM # 40 Nolu elekten geçecek boyutta (0.425 mm) öğütülüp etüvde kurutulmuştur. Daha sonra kuru malzemeye likit limitin yaklaşık 1.5 katı su muhtevası elde edilecek şekilde su eklenmiş ve daha sonra numunenin tamamında homojen bir su muhtevası olacak şekilde jöle kıvamına

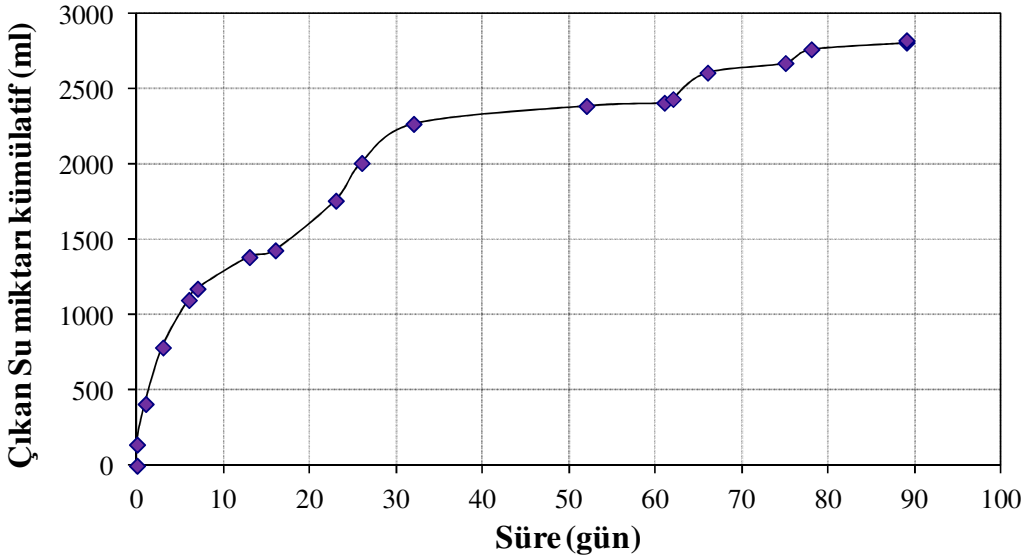
gelene kadar mikser yardımı ile karıştırılmıştır. Literatürde çamur bulamacın hazırlanması aşamasında likit limitin bir ila iki katı arasında değişen oranlarda su-kuru numune karışımları kullanıldığı bilinmektedir. Yapılan denemelerde en az su içeriğine sahip en homojen şekilde karışımın likit limitin 1.5 katı civarında olduğu görülmüştür. Daha yüksek su muhtevalarında karışımın sıvılığının arttığı bu nedenle konsolidasyon aşamasında segregasyon oluşma durumu, daha düşük su muhtevalarında ise homojen su muhtevası elde edilmesinde yaşanan sıkıntılar nedeniyle bu değer seçilmiştir. Çamur bulamaç halinde en az 3 gün hidratasyon için beklenmiştir. Hidratasyon sürecinde de ara ara kurumanın engellenmesi ve homojenliğin korunması için çamur bulamaç haline gelen malzeme karıştırılmıştır. Hidratasyonun sonrasında numune son kez iyice karıştırılıp konsolidometrelere aktarılmıştır. Bu aşamadan önce alt poroz taşla numune arasına poroz taşın içerisine kil malzeme girip tıkanma meydana gelmemesi için filtrasyon amacıyla poroz kağıt konulmuştur. Numune konsolidometre içine yerleştirilirken içinde hava boşluğu veya topaklanma meydana gelmiş parçaların olmamasına dikkat edilmiştir. Üst poroz taşını da içeren yükleme başlığı ve piston konulmadan önce üst tarafa da poroz kağıt konulmuştur. Piston ve üst kapağın montajından sonra numuneye düşük seviyede bir gerilme etkitilmiş ve konsolidasyon süreci başlatılmıştır. Genellikle 80 kPa (0.8 kg/cm$^2$) civarında maksimum yük olacak şekilde 3 ila 5 arasında değişen sayıda yükleme kademesi uygulanmıştır. Her yük kademesinde su çıkışlarının, oturma miktarlarının ve oturma hızının istenilen seviyelere düşmesi beklenmiştir. Kullanılan zemin numunesinin tipine bağlı olarak 1 ay ile 16 ay arasında değişen sürelerde konsolidometrelerde numune hazırlığı süreci devam etmiştir. Numune hazırlığı sırasında çalışmanın ilk aşamalarında konsolidasyon basıncı 50 kPa civarında seçilmiş

ancak bu gerilme altında konsolide olmuş zeminin kıvamı, numunenin işlenmesi, saklanması ve diğer deneyler için hazırlanması açısından uygun olmaması nedeniyle konsolidasyon basıncı yaklaşık 80 kPa deneyine yükseltilmiştir. Her bir yük kademesinde konsolidasyon sürecinin bitişinin belirlenmesi açısından oturmaların ve su çıkışının sonlanması beklenildiğinden dolayı bu su çıkış miktarları önem kazanmaktadır. Oturma miktarları zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve bilgisayar yardımı ile bunlar dijital olarak işlenip konsolidasyon süreci takip edilmiştir. Örnek

olarak H1 numunesinin konsolidometrede 80 kPa düşey gerilme altında elde edilen oturma-zaman ilşikisi Şekil 3.12'de verilmiştir. Düşey yükleme yapılırken yük kademeli olarak arttırılmış ve her kademe için yaklaşık % 100 konsolidasyona ulaşıldıktan sonra bir üst yük kademesine çıkılmıştır. Konsolidasyon sürecinde alınan zamana bağlı su çıkışı ölçümlerine Şekil 3.13'te örnek verilmiştir.




**Şekil 3.12 :** H1 numunesinin konsolidometrelerdeki konsolidasyon sürecinde oturmaların zamana bağlı değişimi.




**Şekil 3.13 :** H1 numunesi için konsolidometrelerde konsolidasyon sürecinde su cıkısların takibi.

Konsolidasyonun tamlanmasını takiben numune konsolidometrelerin alt tarafından çıkarılmış, su muhtevasını koruması için streç film ve alüminyum folyolarla sarılıp nemli saklama ünitesinde depolanmıştır (Şekil 3.14 ve Şekil 3.15).



**Şekil 3.14 :** Konsolidometreden çıkan numuneler.



**Şekil 3.15 :** Konsolidometreden çıkan numunelerin saklanması.

### 3.3 Kullanılan Deney Sistemleri

Bu çalışma kapsamında numunelerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için halka kesme deneyi, kesme kutusu deneyi ve üç eksenli basınç deney sistemi kullanılmıştır. Ayrıca konsolidasyon özelliklerinin berlirlenmesi amacıyla ödometre

deneyleri yapılmıştır. Aşağıda bu çalışma kapsamında kullnılan deney sistemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

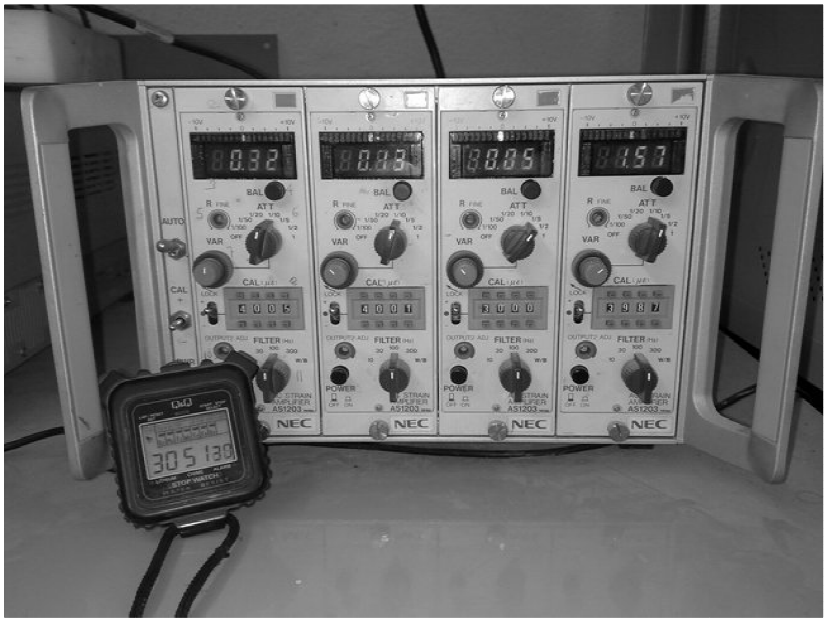
### 3.3.1 Halka Kesme Deneyi

Bu çalışmada kalıcı kayma mukavemeti paramtrelerini belirlemek amacıyla ağırlıklı olarak İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.16'da gösterilen Seiken inco./DTC-138 model halka kesme aleti kullanılmıştır. Bu deney sisteminde verilen bir düşey normal gerilme altında yatay düzlem üzerindeki halka şeklindeki numunenin alt yarısının, sabit üst yarısına göre kayma deformasyonu için hiçbir sınır olmaksızın dairesel deplasmana zorlanması şeklinde kesilmektedir. Şekil 3.16'da gösterilen halka kesme aletinin kesme hızları bu çalışma öncesinde 20 mm/dak ile 400 mm/dak arasında değişirken, bu çalışma kapsamında yapılan iyileştirmeler ile minimum kesme hızı olarak 0.015 mm/dak ve maksimum hızı olarak 1.8 mm/dak değerlerine inilebilmektedir. Bu sayede standartlara uygun deneyler yapabilme imkanı sağlanmıştır. Sistemin iyileştirilmesi ile ilgili detaylı bilgi sonraki bölümde verilecektir. Deney düzeneğinde kesme esnasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçme olanağı bulunmamaktadır. Deney düzeneğinde dış çapı 150 mm, iç çapı 100 mm ve yüksekliği 20~25 mm olan halka şeklindeki numuneler kullanılmaktadır. Numune kesit alanı 98.17 $cm^2$ dir.



**Şekil 3.16 :** Halka kesme deney aleti.

Deney sırasında açısal deplasmana göre, kesme kuvveti, düşey sürtünme kuvveti, düşey deplasman ve düşey gerilme sürekli olarak 4 kanallı amplifikatörden (Şekil 3.17) okunabilmektedir.



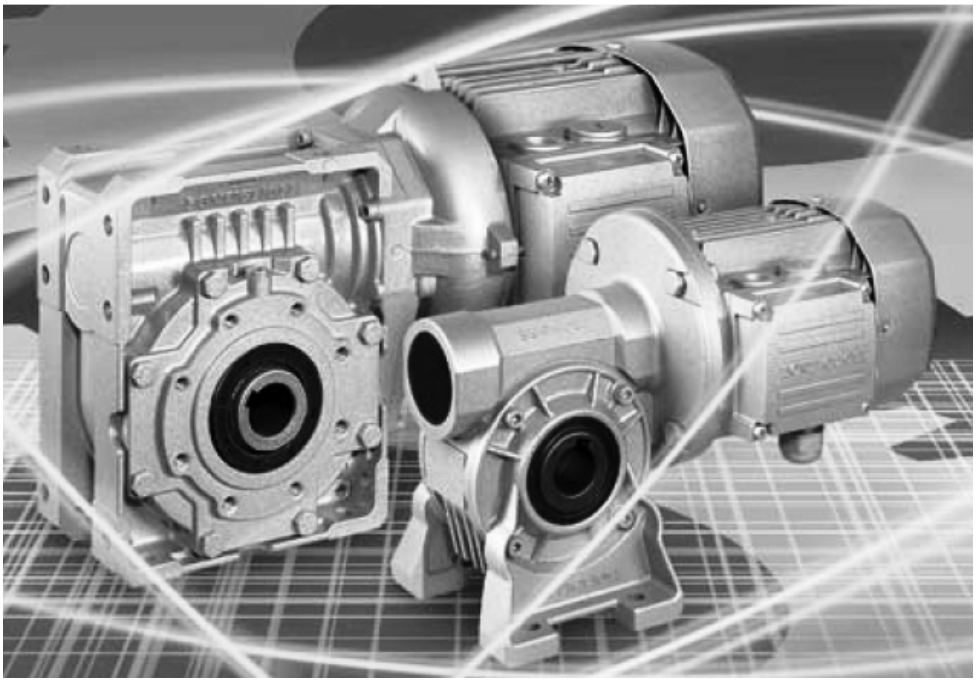

**Şekil 3.17 :** NEC marka 4 kanallı amplifikatör (sırasıyla kanallarda gösterilen değerler kayma gerilmesi, çevre sürtünmesi, düşey deformasyon, düşey gerilme).

Deney sırasında alınan veriler istenilen zaman aralıklarında National Instruments NI 6009 veri toplama cihazı ve National Instruments Signal Express 3.0 yazılımı yardımıyla toplanabilmektedir. Numuneye uygulanabilecek en büyük düşey gerilme değeri 500 kPa civarındadır. Kesme kuvveti yük hücresinin kapasitesi 2 kN olup, numune üzerinde oluşan ölçülebilen en büyük kayma gerilmesi yaklaşık 650 kPa'dır. Sistemin algılayabileceği en büyük düşey sürtünme kuvveti değeri ise 1 kN'dur. Bu çalışma öncesinde halka kesme deney düzeneği sismik şartları modellemeye yönelik olarak hızlı kesme hızlarında çalışabiliyordu. Deneyde numuneye en düşük 20 mm/dak, en yüksek ise 400 mm/dak kesme hızı uygulanıyordu. Kalıcı mukavemeti çok daha düşük kesme hızlarında elde edilebildiğinden birinci olarak düzeneğin kesme hızının standartlara uygun hale gelmesi gerekmekteydi. Bunun yanında deneyler sırasında alınan veriler manuel olarak kaydedilmekteydi. Düzeneğin eski halinde kesme hızlarının yüksek olması nedeni ile manuel veri toplama çok problem yaratmasada kesme hızlarının düşmesi nedeni ile deney süreleri uzayacağı için düzeneğe veri toplama ünitesi eklenmesi zorunluluğu doğdu. Sözü edilen değişiklikler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

### 3.3.1.1 Deney Sisteminin Geliştirilmesi

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.16'da gösterilen Seiken inco./DTC-138 model halka kesme aleti deprem şartlarında kumların kayma mukavemetindeki değişimlerin incelenebileceği kesme hızı kapasitesine sahipti. Numuneye uygulanabilen en düşük kesme hızı 20 mm/dak, enyüksek kesme hızı ise 400 mm/dak olarak tasarlanmıştı. İnce daneli zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebilmesi için numunede artık boşluk suyu basıncı oluşmayacak kadar yavaş olacak şekilde istenilen kesme hızları için bu en düşük hızın yaklaşık 1000 kat düşürülmesi gerekmekteydi. Bu nedenle deney sisteminin istenilen seviyelerde kesme hızına sahip olabilmesi için numuneyi kesmeye zorlayan mekanizmadaki motorun değiştirilmesi veya modifikasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla öncelikle deney sisteminin üreticisi olan Seiken ile irtibata geçilmiştir. Seiken tarafından kesme hızının düşürülmesi için yapılan öneride deney sisteminde deneyin kesme hızının ayarlandığı kontrol tablosu da dahil olmak üzere yapısal oldukça fazla değişiklik gerektirmektedir. Ayrıca ücretin imalattan birkaç ay önce yatırılması ve imalatın beklenmesi gerekiyordu. Yapılan değerlendirme sonucunda ülkemizde bu sistemin geliştirilmesi işleminin yapılması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla öncelikle motorun değiştirilmesi gündeme gelmiş, ancak istenilen seviyede düşük hızlarda çalışabilecek elektrik motorunun gerekli güce erişminde problem yaratabileceği ihtimali ortaya çıkmıştır. Bu noktada motorun değiştirilmesi aynı zamanda kumanda tablosunun da değişmesini gerektirdiği için motorun değişimi yerine sistemin geliştirilmesi öngörülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda redüktör yardımıyla kesme hızının düşürülebileceği tasarlanmıştır. Boyut ve entegrasyon açısından deney sistemine uygunluk ve temin edilme durumlarının yanında istenilen seviyede (yaklaşık 1000 kat) motorun hızını düşürecek redüktör arayışları için birkaç deneme sonrasında Bonfiglioli adlı İtalyan üreticide aranılan redüktör (WL 110-Şekil 3.18) bulunmuştur. İtalya'dan getirilen redüktörün sistem ile entegrasyonu için motora ve dişli kutuna bağlantısı için üretilen mil ve bağlantı aparatları ile deney sistemine kurulumu yapılmıştır (Şekil 3.19). Redüktör ile yapılan bu işlem sayesinde motorda bir değişiklik yapılmadığından kesme hızının kumanda tablosunda da herhangi bir değişikliğe gerek kalmamıştır. Sadece redüktörün azaltma katsayısı ile motorun görünen hızı azaltıldığında deneyde uygulanan hız belirlenebilmektedir. Yapılan bütün bu değişiklikler sonrasında deney düzeneği

istenilen seviyelerde kesme hızlarını numuneye uygulanabilecek şekilde tasarlanmış ve değişiklikler gerçekleştirilmiştir.



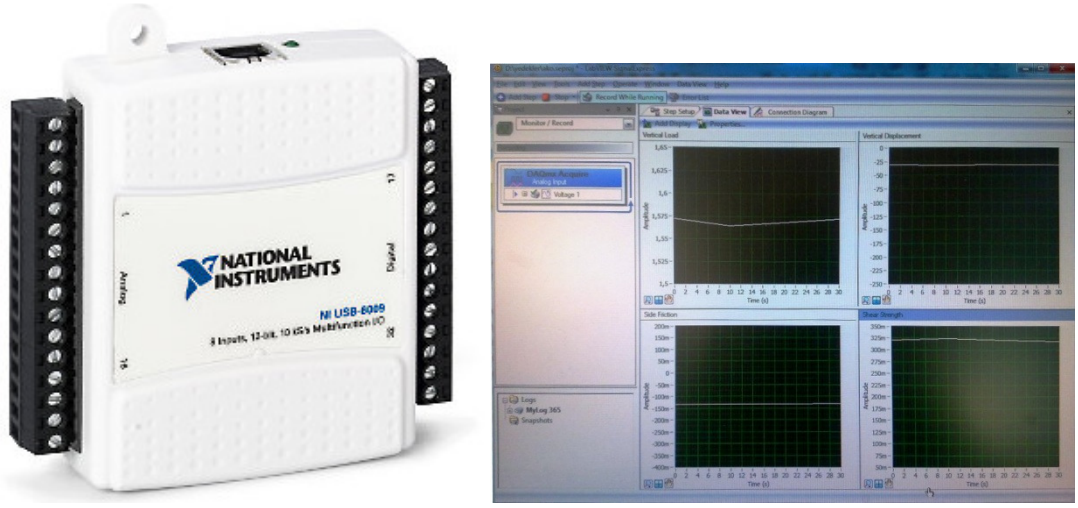
**Şekil 3.18 :** Bonfiglioli marka WL-110 redüktör .




**Şekil 3.19 :** Bonfiglioli marka WL-110 redüktörün deney sistemine bağlantısı ve hız kontrol kutusu.

### 3.3.1.2 Veri toplama Ünitesi

Deney sisteminde yapılan değişiklikler sonrasında deneylerin süresi, kesme hızının oldukça düşük olması nedeniyle ciddi derecede artmıştır. Değişiklikler öncesinde bir saat süren kesme işlemi numune türüne bağlı olarak numunelerin kalıcı kayma mukavemetine erişmesi için gereken deformasyonların yüksek olduğu durumlarda on günü bulabilmektedir. Bu durumda deney sırasında alınan verilerin veri toplama ünitesi ile toplanması zorunluluğu ortaya çıktı. Deney sistemine entegre olan üç adet yük hücresi ile bir adet deformasyon ölçerden alınan verilerin sistemi mümkün olduğunca değiştirmeden alınıp bilgisayar ortamına aktarılması amacıyla yapılan araştırmalar sonucunda dört kanallı amplifikatörün çıkış soketlerine doğrudan bağlanabilecek, istenilen sıklıkta veri toplama kapasitesine sahip ve bilgisayara bağlantısı USB üzerinden sağlanan bir veri toplama cihazı araştırılmıştır. Sonuç olarak National Instruments firmasının ürettiği National Instruments NI 6009 veri toplama cihazı (Şekil 3.20) temin edildi. Aynı firma tarafından piyasaya sunulan National Instruments Signal Express 3.0 yazılımı yardımıyla ise veri toplama cihazı ile bilgisayar arasındaki iletişim sağlandı. NI 6009 cihazı saniyede bin veri toplama kapasitesine sahip olduğundan yapılan deneylerde istenilen veri toplama sıklığının çok üstünde bir kapasiteye sahiptir. Yapılan deneylerde deney kesme hızına bağlı olarak genellikle saniyede bir veri (1 Hz) ile yirmi saniyede bir veri (0.05 Hz) arasında değişen sıklıklarda veri toplanmıştır.




**Şekil 3.20 :** National Instrument 6009 veri toplama ünitesi ve bilgisayarla veri toplama.

Veri toplama ünitesinin oldukça küçük boyutlarda olması ve USB bağlantısını kullanması nedeniyle kurulumu ve yerleştirilmesi de pratik açısından çok kolaylık sağlamıştır. Sonuç olarak hem redüktörün entegrasyonu hem de veri toplama ünitesinin bağlantısı için deney düzeneğinin imalatçısı olan Seiken tarafından daha önce verilen teklifin dört ila beş katı düşük maliyetle ve deney sisteminde fazla değişikliğe gidilmeden istenilen hızlarda deney yapabilme kapasitesine erişilmiştir.

### 3.3.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer deney yönetemi tekrarlı keme kutusu deneyidir. Bu amaçla halka kesme deneyinde kullanılan numuneler tekrarlı kesme kutusu deneyine maruz bırakılmıştır. Deneyler için 6 cm x 6 cm kesit alana sahip 2 cm yüksekliğinde hazırlanan numuneler ELE marka kesme kutusu deney aletinde (Şekil 3.21) bir gün konsolidasyona bırakılmış daha sonra kesme işlemine geçilmiştir. Deneylerde düşey ve yatay deformasyon ölçümleri 1/100 mm hassasiyete sahip deformasyon ölçerler yardımıyla alınmıştır.




**Şekil 3.21 :** ELE marka kesme kutusu deney aleti.

### 3.3.3 Üç Eksenli basınç Deneyi

Sahip olduğu dezavantajlar nedeni ile uygulamada sık kullanılmasa da zaman zaman zeminlerin kalıcı kayma mukavemetin belirlenmesinde konsolidasyonlu direnajlı üç

eksenli basınç deneyi kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmaya paralel olarak Y. Müh. Ayşegül Bayın tarafından yürütülen yüksek lisans tez çalışmasında bu çalışma kapsamında kullanılan numunelerin bazılarında üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 3.22'de gösterilen ELE marka üç eksenli basınç deney aleti kullanılmıştır. Deneyler sırasında hem manüel olarak hem de ELE marka ADU cihazı yardımı ile düşey deformasyon, boşluk suyu basıncı ve yük halkası okumaları alınmıştır.



**Şekil 3.22 :** ELE marka üç eksenli basınç deney aleti.

### 3.3.4 Konsolidasyon (Odometre) Deneyi

Hazırlanan numunelerin konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 5 cm çapında 2 cm yüksekliğinde numuneler üzerinde ELE ve Wykham Farrance marka ödometre deney aletleri kullanılarak ödometre deneyleri yapılmıştır. Konsolidasyon okumaları hem manuel olarak 1/100 mm hassasiyetli deformasyon ölçer yardımıyla hem de ELE marka ADU ünitesi yardımıyla LVDT cihazı kullanılarak alınmıştır.

# 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin farklı yöntemlerle belirlenmesi ve kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörlerin incelenmesi amacıyla laboratuvarda 50 numune üzerinde halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi ve üç eksenli basınç deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalıcı kayma mukavemeti deneylerinin yanısıra numuneler üzerinde standart kesme kutusu deneyleri de yapılmış ve kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre kesme hızının, kıvam limitlerinin, aşırı konsolidasyon oranının ve deney yönteminin kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Aşırı konsolidasyon oranı ile kayma mukavemeti ilişkisini belirlemek üzere farklı aşırı konsolidasyon oranlarında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin konsolidasyon parametrelerini ve halka kesme deneylerinde uygulanması gereken kesme hızlarını belirlemek üzere numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde kalıcı kayma mukavemetini ve etkiyen parametreleri belirlemek üzere yapılan deneyler kısaca anlatılmış ayrıca elde edilen deney sonuçları verilmiştir. Laboratuvar deneyleri kapsamında numuneler üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve üç eksenli basınç deneyleri ile numuneler üzerinde yapılan konolidasyon deneylerinin sonuçları özetlenmiştir.

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla 50 numune üzerinde halka kesme deneyi ve 44 numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deney tipinin etkisini görmek üzere numunelerin 15 tanesinde konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Ayrıca 25 numune üzerinde standart kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kesme hızının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek üzere seçilen 7 farklı numune üzerinde farklı kesme hızlarında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Aşırı konsolidasyon oranı ile kayma mukavemeti ilişkisini araştırmak üzere 10 numune üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Halka kesme deneyleri, tekrarlı kesme kutusu deneyleri ve standart kesme kutusu deneyleri

genellikle 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa olmak üzere en az üç farklı düşey gerilme altında, konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ise en az iki farklı düşey gerilme altında yürütülmüştür. Özet olarak yaklaşık 300 adet halka kesme deneyi, 132 adet tekrarlı kesme kutusu deneyi, 30 adet konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve 75 adet standart kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Bu bölümde çalışma kapsamında yapılan deneyler ayrıntıları ile açıklanmıştır.

## 4.1 Halka Kesme Deneyleri

Doktora çalışması kapsamında kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi ve kalıcı kayma mukavemetine etkiyen parametrelerin incelenmesi amacıyla halka kesme deneyleri yapılmıştır. Temel olarak üç farklı amaçla halka kesme deneyleri yapılmıştır. Birinci olarak kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi ve deney tipinin kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla numuneler üzerinde standart halka kesme deneyleri yapılmıştır. Standart halka kesme deneyleri üç farklı düşey gerilme altında kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini elde etmek üzere yapılmıştır. İkinci olarak kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızı ile ilişkisini belirlemek amacıyla belirlemek amacıyla seçilen 7 numune üzerinde üç farklı düşey gerilme altında ve farklı kesme hızlarında halka kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde verilen çalışmalarda kesme hızının etkisi üzerine yapılan çalışmalarla birlikte deney sonuçları değerlendirilmiş ve kesme hızının önemli derecede etkisinin olmadığı en yüksek kesme hızı belirlenmiştir. Son olarak aşırı konsolidasyon oranı ile kalıcı kayma mukavemeti davranışı arasındaki bağlantıyı araştırmak maksadıyla farklı aşırı konsolidasyon oranlarına sahip olacak şekilde ön konsolidasyona tabi tutulan numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yürütülmüştür. Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti davranışına etkilerini belirleyebilmek üzere 10 numune üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Aşırı konsolidasyon oranları 1,2,3,5,7 ve 10 olacak şekilde 50 kPa düşey gerilme altında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Aşırı konsolidasyon oranı ile ilgili deneylerde kesme hızı olarak yukarıda bahsedilen kalıcı mukavemete önemli dercede bir etkisi olmayan en yüksek hız olarak tanımlanan optimum kesme hızı kullanılmıştır. Aşırı konoslidasyon oranının değişimi ile kalıcı mukavemette ve pik mukavemette elde edilen değişimler

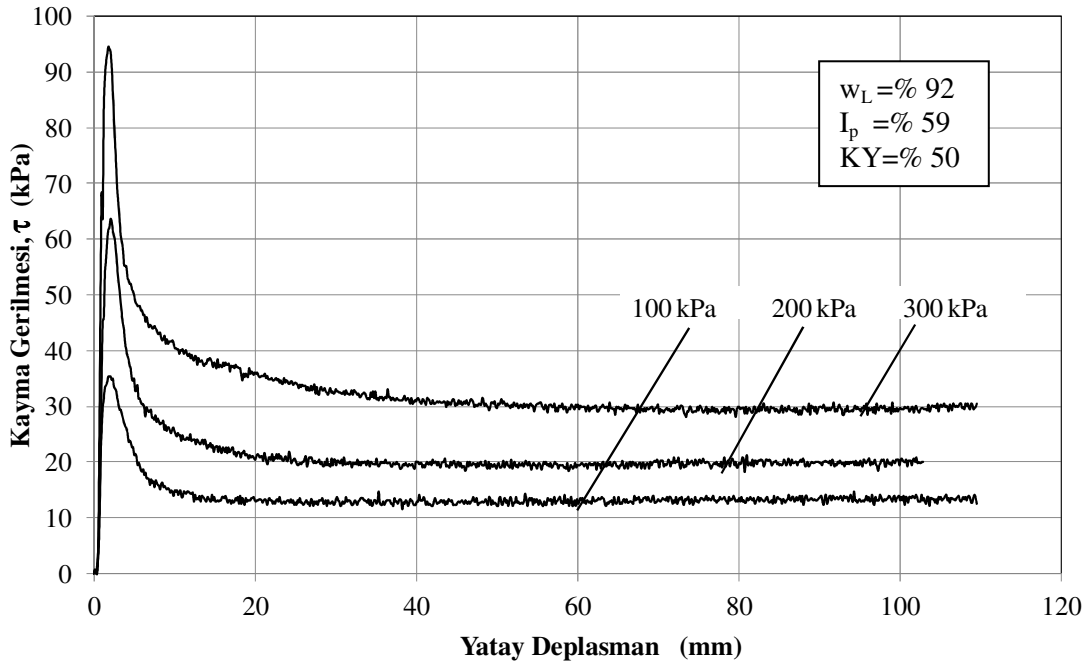
incelenmiştir. Bu bölümde yapılan halka kesme deneyleri hakkında bilgi verilmiş ve deneylerden elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

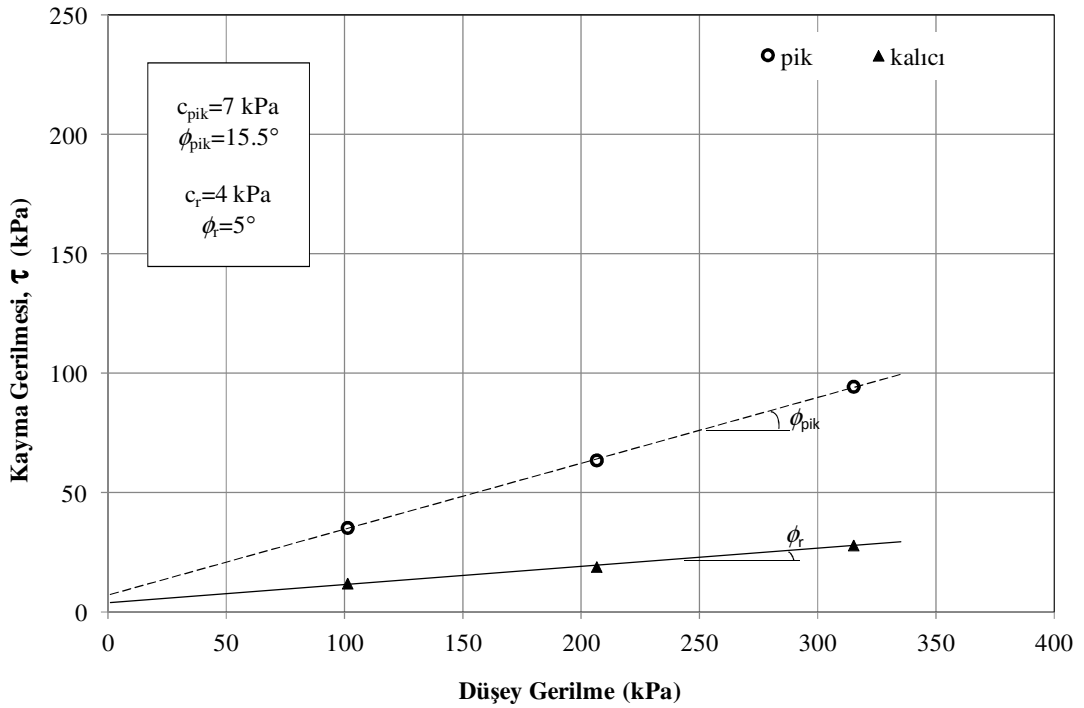
### 4.1.1 Standart Halka Kesme Deneyleri

Kalıcı kayma mukavemeti ve kalıcı kayma mukavemetine etkiyen faktörlerin belirlenmesi amacıyla hazırlanmış numunelerin üzerinde halka kesme deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak 50 numune üzerinde halka kesme deneyi yapılarak numunelerin kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti ile kıvam limitleri, kil yüzdesi gibi çeşitli zemin özellikleri arasında ilişki araştırılmıştır. Yapılan diğer deney yöntemleri ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin arazi şartlarına en uygun olarak belirlendiği deney sisteminin halka kesme deneyi olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu çalışma kapsamında da zeminlerin kalıcı kayma mukavemetini belirlemek üzere 50 numune üzerinde en az üç farklı düşey gerilme altında (100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa) halka kesme deneyleri yapılmıştır. Konsolidometrelerde hazırlanan numuneler istenilen yükseklikte en az örselenme olacak şekilde kesilmiş ve halka kesme deneyi numunesi hazırlama işlemine geçilmiştir. Numuneler deneyde kullnılmak üzere tasarlanmış olan numune hazırlama seti yardımıyla istenilen yüksekliğe sahip halka şeklinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler dikkatli ve özenli bir şekilde halka kesme deney aletine yerleştirilmiş ve deneyin kurulumu tamamlanmıştır. Halka kesme deneyinin kurulumu ile ilgili detaylı bilgi Eklerde verilmiştir. Konsolidasyon aşamasında istenilen seviyeye kadar kademeli olarak arttırılan düşey gerilme ve bunun sonucunda meydana gelen düşey deformasyonlar zaman bağlı olarak kaydedilmiştir. Konsolidasyon evresinin bitimini takiben kesme işlemine geçilmiştir. ASTM D 6467/06a'da yüksek plastisiteli killer için numunede artık boşluk suyu basıncı oluşmamasını sağlayacak en düşük hız için 0.02 mm/dak kesme hızının yeterli olacağı ifade edilmiştir. Yapılan deneylerde kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin kesme hızından etkilenmesini engellemek amacıyla ASTM D 6467/06a tarafından önerilen ve deney sisteminde de erişilebilen en düşük hız olan 0.02 mm/dak değeri kesme hızı olarak kullanılmıştır. Kesme sırasında zamana bağlı olarak kayma gerilmesi, düşey gerilme, çevre sürtünmesi ve düşey deformasyon okumaları alınmıştır. Deney esnasında aralıklarla deney aletinde

bulunan açısal deformasyon göstergesinden açısal deformasyonlar zamana bağlı olarak okunarak kesme hızı kontrol edilmiştir. Deney sırasında alınan veriler kesme hızına bağlı olarak belirli zaman aralıklarında National Instruments NI 6009 veri toplama ünitesi ve National Instruments Signal Express 3.0 yazılımı yardımıyla toplanmıştır. Ayrıca deney sırasında tüm değerler belli aralıklarla elle de kaydedilmiş ve veri toplama işlemi kontrol edilmiştir. Numunenin deney başında ve deney sonunda birim hacim ağırlığı ve su muhtevası değerleri belirlenmiştir. Aynı işlem farklı düşey gerilmeler altında hazırlanan yeni numune üzerinde tekrar edilerek kayma mukavemeti parametreleri elde edilmiştir. Yapılan deneylere örnek olması açısından H 2 numunesi üzerinde yapılan halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-yatay deplasman ilişkisi ve elde edilen mukavemet zarfları Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi halka kesme kutusu deneyinde 100 mm'yi aşan yüksek yatay deplasman değerlerine çıkılabilmiştir. Kalıcı mukavemetin elde edilebilmesi bakımından oldukça önemli olan bu durum halka kesme deneyinin diğer deney tiplerine göre üstünlüğüdür. Bu noktada tek sınırlama NGI-tipi halka kesme deneylerinde iki ring arasından kesme sırasında dışarı çıkan numune nedeniyle numune yüksekliğinin bir miktar azalmasıdır. Yapılan deneylerde sözü edilen bu zaiyat özellikle yavaş kesme hızları nedeni ile çok çok düşük seviyelerde olduğundan dolayı yatay deplasman için pratikte bir sınırlama olmadığı söylenebilir. Örneğin bu deneylerde diğer deney tiplerine göre onlarca kat fazla deplasman elde edilebilmiştir. Sadece bir kıyaslama olarak H2 numunesinde yapılan halka kesme deneyinde erişilen yatay deplasmana ulaşabilmek için tekrarlı kesme kutusu deneyinde yaklaşık 10 çevrim yapılması gerekmekte, dolayısı ile 10 günlük bir deney süresine gereksinim duyulmaktadır. Tabii burada kesme yüzeyinin her çevrim sonrası bozulmasının olmadığı ve geri dönüşler sırasında numune zaiyatının olmadığı kabul edilmiştir. Kalıcı mukavemetin elde edilebildiği diğer bir deney türü olan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinde ise bu zaten imkan dahilinde değildir. Ayrıca numune kesit alanının ve numuneye etki eden düşey efektif gerilmenin sabit olması diğer deneylere göre daha düzgün sonuçların ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bunun dışında halka kesme deneylerinde özellikle tekrarlı kesme kutusu deneyinde zaman zaman ortaya çıkan yüksek kohezyon değerleri de nadiren gözlenmektedir.




**Şekil 4.1 :** H 2 numunesi üzerinde yapılan halka kesme deney sonuçları.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi mukavemet zarflarında düşey efektif gerilmelerde ufak farklar göze çarpmaktadır. Bunun nedeni deney düzeneğinde ölçülebilen çevre sürtümesi bileşeni nedeni ile numuneye uygulanan düşey efektif gerilmenin değişmesidir. Numuneye etkiyen net düşey gerilme belirlenmesinde sürtünme kuvvetinden doğan gerilmenin etkisi dikkate alınmıştır. Şekilde kesikli çizgi ile

gösterilen zarf pik mukavemet zarfını, düz çizgi ile gösterilen zarf ise kalıcı mukavemet zarfını göstermektedir. Deney sırasında sürekli olarak veriler kaydedildiği için oldukça çok miktarda veri elde edilmektedir. Bu nedenle kesme işlemi sırasında kesme yüzeyinde oluşan düşük miktardaki mukavemet değişiklikleri kaydedilmektedir. Kayma gerilmesi-yatay deplasman grafiğinde görülen küçük titreşimlerin nedeni budur. Ancak bu titreşimler deney sonucunu etkilemeyecek kadar düşüktür ve genel eğilimde bir değişiklik gözlenmemektedir. Çalışma kapsamında 50 numune üzerinde yapılan halka kesme deneyi sonuçlarından elde edilen pik ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de görülen deney sonuçlarından son 8 numune üzerinde yapılan halka kesme deneyleri numune miktarının yetersiz olması nedeni ile çok aşamalı (multistage) adlı deney yöntemi kullanılarak yapılmıştır. . Bilindiği gibi çok aşamalı (multistage) deney tipinde bütün düşey gerilme seviyeleri aynı numune üzerinde yapıldığından dolayı ilk kesme sonrasında diğer düşey gerilmelerde daha önceden kesilmiş yüzeydeki kayma gerilmeleri ölçüldüğünden pik mukavemetler elde edilememektedir. Dolayısı ile tek bir değere göre çizilen mukavemet zarfından elde edilen parametreler yanıltıcı olabileceğinden sözü edilen numunelerin pik mukavemet parametreleri verilmemiştir

### 4.1.2 Farklı Kesme Hızlarında Yapılan Halka Kesme Deneyleri

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kalıcı kayma mukavemetine etki eden faktörler üzerinde literatürde daha önceden yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde kalıcı mukavemetin kesme hızından belli bir oranda etkilendiği görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda kesme hızının etkisini incelemek amacıyla 0.0001mm/dak ile 1000 mm/dak arasında değişen hızlarda deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde amaç statik durumda kalıcı mukavemet şartlarındaki kayma mukavemeti parametreleri ile yüksek hızlardaki kayma mukavemeti parametrelerinin kesme hızına bağlı değişimini elde edebilmektir. Kalıcı mukavemet yüksek kesme hızlarında önemli değişiklikler gösterse de 1.0 mm/dak ila 0.1mm/dak arasında değişen kesme hızlarının altında önemli derecede deşişiklikler göstermemektedir. Bu hızlardan sonra ise zemin cinsine bağlı olarak özellikle 10 mm/dak'dan daha büyük hızlarda kayma mukavemetinde genellikle büyük artışlar görülebilmektedir.

**Çizelge 4.1 :** Halka Kesme deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri.

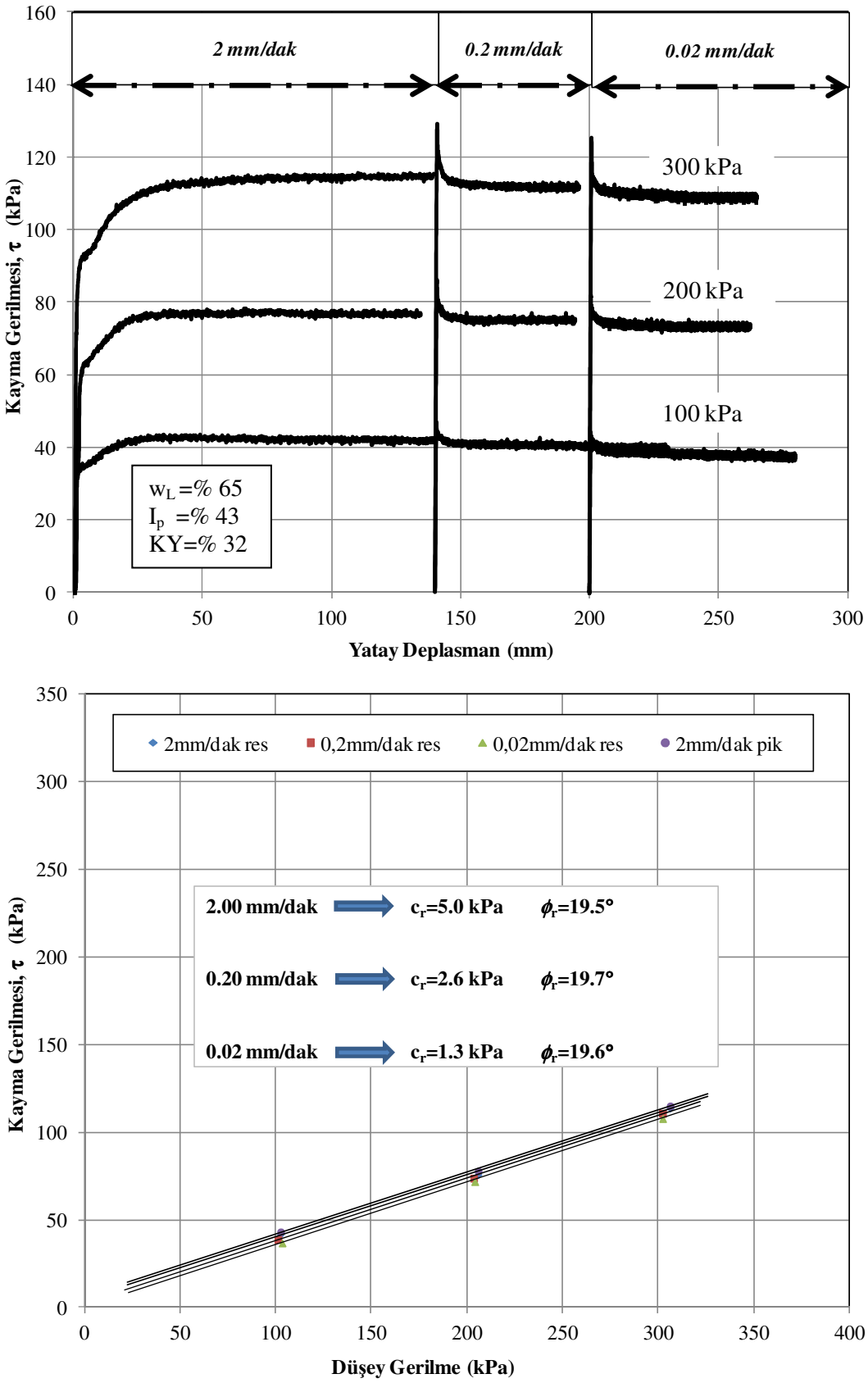
| Numune | $c_{pik}$ (kPa) | $\phi_{pik}$ ($^o$) | $c_r$ (kPa) | $\phi_r$ ($^o$) | Numune | $c_{pik}$ (kPa) | $\phi_{pik}$ ($^o$) | $c_r$ (kPa) | $\phi_r$ ($^o$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H1 | 10 | 14.5 | 0 | 6.0 | H26 | 0 | 36.5 | 0 | 28.0 |
| H2 | 7 | 15.5 | 4 | 5.0 | H27 | 5 | 24.0 | 0 | 20.0 |
| H3 | 15 | 12.0 | 10 | 9.0 | H28 | 13 | 20.0 | 0 | 9.0 |
| H4 | 28 | 13.0 | 4 | 15.5 | H29 | 19 | 14.0 | 0 | 10.0 |
| H5 | 13 | 12.5 | 4 | 6.0 | H30 | 10 | 18.0 | 0 | 14.0 |
| H6 | 0 | 24.0 | 7 | 18.0 | H31 | 19 | 11.0 | 0 | 7.0 |
| H7 | 50 | 20.0 | 0 | 10.0 | H32 | 6 | 19.0 | 0 | 16.0 |
| H8 | 7 | 15.5 | 0 | 20.0 | H33 | 8 | 19.0 | 0 | 15.0 |
| H9 | 0 | 38.0 | 0 | 27.0 | H34 | 19 | 13.0 | 0 | 10.0 |
| H10 | 10 | 17.0 | 10 | 15.5 | H35 | 11 | 16.0 | 0 | 14.0 |
| H11 | 30 | 14.0 | 7 | 15.0 | H36 | 18 | 14.0 | 0 | 10.0 |
| H12 | 25 | 14.0 | 4 | 6.0 | H37 | 7 | 17.0 | 0 | 14.0 |
| H13 | 24 | 19.0 | 3 | 6.0 | H38 | 14 | 15.0 | 0 | 13.0 |
| H14 | 18 | 17.0 | 2 | 6.0 | H39 | 14 | 15.0 | 0 | 12.0 |
| H15 | 30 | 13.5 | 5 | 14.5 | H40 | 17 | 14.0 | 0 | 11.0 |
| H16 | 25 | 11.5 | 3 | 6.5 | H41 | 12 | 15.0 | 0 | 12.0 |
| H17 | 13 | 21.0 | 5 | 7.5 | H42 | 0 | 19.0 | 0 | 8.0 |
| H18 | 23 | 11.0 | 6 | 3.7 | H43 | - | - | 0 | 11.0 |
| H19 | 30 | 8.0 | 3 | 7.0 | H44 | - | - | 0 | 21.0 |
| H20 | 25 | 4.6 | 2 | 4.0 | H45 | - | - | 0 | 10.0 |
| H21 | 22 | 20.0 | 3 | 7.0 | H46 | - | - | 0 | 14.0 |
| H22 | 25 | 21.5 | 15 | 10.5 | H47 | - | - | 0 | 11.0 |
| H23 | 27 | 3.6 | 7 | 3.5 | H48 | - | - | 0 | 18.0 |
| H24 | 23 | 11.0 | 6 | 3.7 | H49 | - | - | 0 | 14.0 |
| H25 | 27 | 10.0 | 7 | 4.0 | H50 | - | - | 0 | 12.0 |

$c_{pik}$: kohezyon (pik mukavemet için) ; $\phi_{pik}$: kayma mukavemeti açısı ;
$c_r$: kohezyon (kalıcı mukavemet için) ; $\phi_r$: kalıcı kayma mukavemeti açısı

Kalıcı kayma mukavemetinin etkilenmediği en yüksek kesme hızını belirlemek üzere seçilen numuneler üzerinde farklı düşey gerilmeler altında farklı kesme hızlarında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme hızının etkisini incelemek üzere seçilen numunelerin mümkün olduğunca farklı kıvam özelliklerine ve dane çapı dağılımlarına sahip olmasına özen gösterilmiştir. Seçilen 7 numune üzerinde yapılan deneyler üç farklı düşey gerilme (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa) altında ve 0.02 mm/dak, 0.2 mm/dak, ve 2 mm/dak olmak üzere en az üç farklı kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Halka kesme deney aletinin modifikasyonu öncesinde bazı numuneler üzerinde 20 mm/dak kesme hızında da deneyler yapılmıştır. Numune hazırlanması ve kurulumu, konsolidasyon süreci, deneyin yürütülmesi ve veri toplama önceki bölümde bahsedilen yöntemlerle benzer şekilde yapılmıştır. H 8 numunesi üzerinde farklı kesme hızlarında ve üç farklı düşey gerilme altında yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.2'de görülmektedir. Ancak farklı düşey gerilmelerde yeni numune kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere halka kesme deneyi yapılan hızlarda kalıcı mukavemet parametrelerindeki farklılıklar çok farklı olmamaktadır. Özellikle 0.02 mm/dak kesme hızında, çok küçük bir miktar düşüş gözlense de bu kesme hızında meydana gelen çevre sürtünmelerinin değişimi ile düşey efektif gerilme değiştiğinden zarfın eğimi değişmemekte sadece kohezyonun azladığı gözlenmiştir. Her deney sonrası bir sonraki kesme hızına geçmeden en az bir gün süreyle numune konsolidasyona bırakılmıştır. Bu nedenle 0.2 mm/dak ve 0.02 mm/dak hızlarında bazı pik değerler elde edilmiştir. Halka kesme deneyi için ASTM D 6467/06a'ya uygun olarak numunede artık boşluk suyu basıncının oluşmaması için gerekli kesme hızı konsolidasyon deneyinde ilgili düşey yük kademesinde % 50 oturma yüzdesi için gereken süre ($t_{50}$) kullanılarak belirlenmektedir. Bu işleme göre kesme hızı aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$d_r = d_f / t_f \qquad \textbf{(4.1)}$$

Burada $d_r$ kesme hızı, $d_f$ göçme anındaki tahmini kayma deformasyonu ve $t_f$ ise göçme anına kadar geçen tahmini süre olarak tanımlanmıştır. $d_f$ olarak tanımlanan göçme için gerekli tahmini deformasyon zemin türleri için farklılık göstermekle birlikte yüksek plastisiteli killer ve siltler için 5 mm; düşük plastisiteli killer, düşük plastisiteli siltler, killi kumlar ve siltli kumlar için ise için 2.5 mm alınabileceği ifade edilmiştir.




**Şekil 4.2 :** H 8 Numunesinin farklı hızlarda ve farklı düşey gerilmelerdeki halka kesme deneyi sonuçları.

Göçme için geçen tahmini süre ise,

$$t_f = 50 * t_{50} \quad \textbf{(4.2)}$$

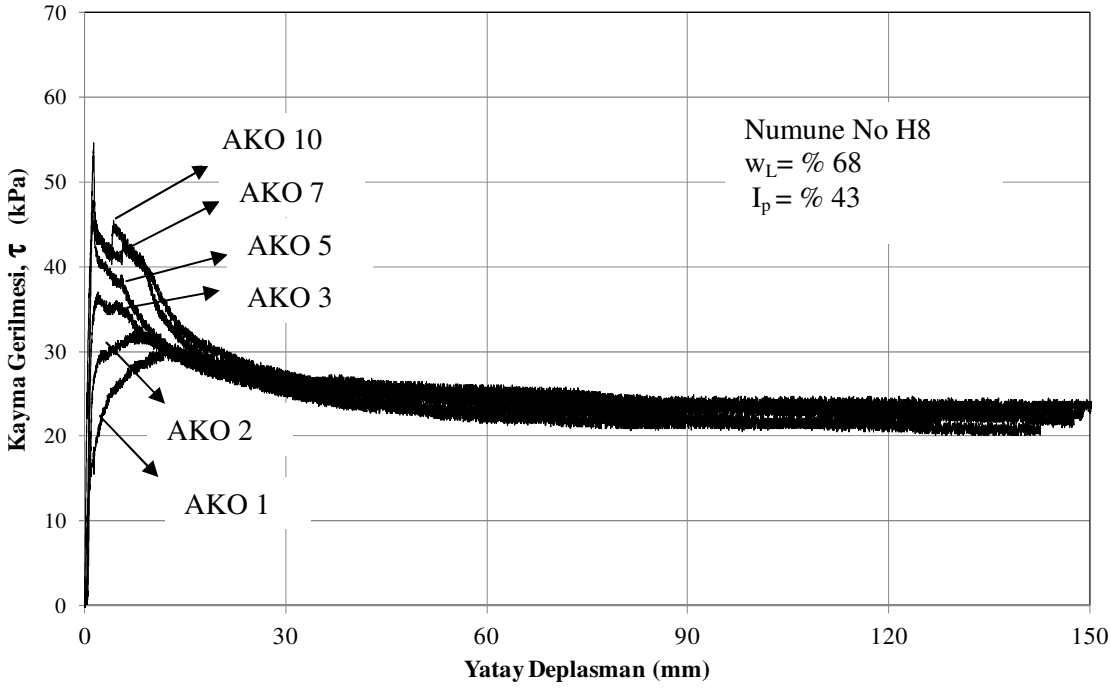
olarak tanımlanmıştır. Bu denklemde $t_{50}$ ise aynı düşey gerilme seviyesinde konsolidasyonun % 50'sinin tamamlanması için geçen süreye dakika cinsinden olmak üzere karşı gelmektedir. Aynı kaynakta bu veriler ışığında yüksek plastisiteli bir kil için kesme hızı için 0.02 mm/dak'lık bir hızın kullanılabileceği ifade edilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları ve literatürde verilen önceki çalışmaların sonuçları değerlendirilerek standart halka kesme deneylerinde 0.02 mm/dak kesme hızı, aşırı konoslidasyon oranının etkisinin incelendiği deneylerde ise belirlenen optimum kesme hızı değeri olan 0.1 mm/dak kesme hızı değerleri kullanılmıştır.

### 4.1.3 Farklı Aşırı Konsolidasyon Oranlarında Yapılan Halka Kesme Deneyleri

Kalıcı kayma mukavemeti daha önceden göçmüş bir yüzeyde tanımlı olduğundan kayma yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi zeminin hareket öncesi durumundan etkilenmemektedir. Dolayısı ile zeminin gerilme geçmişi yerine halihazırdaki düşey gerilme seviyesine bağlı olarak sadece sürtünmeye bağlı kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu bakımdan literatürde verilen bazı çalışmalarda aşırı konsolidasyon oranının kalıcı mukavemete bir etkisinin olmadığı vurgulanmaktadır (Skempton, 1964; Suzuki, 2000, Mitachi ve diğ., 2003 ve Suzuki ve diğ., 2007). Buna karşın pik mukavemetin aşırı konsolidasyon oranından önemli derecede etkilendiği bilinmektedir. Dolayısı ile pik mukavemetten kalıcı mukavemete düşüş miktarı aşırı konsolidasyon oranından etkilenecektir. Mühendislik uygulamalarında genelde pik kayma mukavemeti parametreleri kullanılmaktadır. Bu durumda kalıcı mukavemetin göz önüne alınması gereken durumlarda pik mukavemetten kalıcı mukavemete düşüş miktarı oldukça önem kazanmaktadır. Kalıcı mukavemet ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisini incelemek maksadıyla doktora çalışması kapsamında farklı aşırı konsolidasyon oranına sahip hazırlanmış numuneler üzerinde aynı düşey gerilme altında halka kesme deneyine tabii tutulmuştur. Numunelerin istenilen aşırı konsolidasyon değerlerine ulaşması için konsolidasyon süreçleri, halka kesme deney aletinde gerçekleştirilmiştir. Mümkün olduğunca yüksek aşırı konsolidasyon oranları elde edebilmek için halka kesme deney sisteminin kapasitesi de göz önünde bulundurularak 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 250 kPa, 350 kPa, 500 kPa olmak üzere

altı farklı konsolidasyon basıncı altında konsolide edilen numuneler, 50 kPa değerine boşaltılmıştır. Böylece aşırı konsolidasyon oranları 1, 2, 3, 5, 7 ve 10 olacak şekilde deneyler yürütülmüştür. NGI tipi halka kesme deney aletinde deney esnasında alt ve üst ringlerin birbirine bağlantısının olmamasından dolayı konsolidasyon sırasında oluşabilecek numune zayiatının önlenmesi veya en aza indirgenmesi ve konsolidasyon sürecinin sağlıklı gerçekleşmesi için en yüksek düşey gerilmeye kademeli olarak çıkılmıştır. Bu evrede yük artım miktarları mümkün olduğunca düşük tutulmuştur. Bu sebeple özellikle yüksek plastisiteye sahip, kil yüzdesi yüksek numunelerin, yüksek düşey gerilmelerdeki konsolidasyonu için bir hafta gibi oldukça uzun sürelere gerek duyulmuştur. Konsolidasyon ve boşaltma evreleri süresince düşey gerilme, çevre sürtünmesi ve düşey deformasyon verileri bilgisayar yardımı ile toplanmıştır. Boşaltma evresini müteakiben kesme işlemi 50 kPa düşey gerilme altında 0.1 mm/dak kesme hızında gerçekleştirilerek numunelerin kayma mukavemeti davranışı elde edilmiştir. Kalıcı kayma mukavemetinin dikkate değer oranda etkilenmediği en yüksek hız olarak ifade edilen optimum kesme hızı 0.1 mm/dak olarak belirlenmiştir. Aşırı konsolidasyon oranının etkisi incelenirken yapılacak halka kesme deneylerinin sürelerinin normal standart deneylere göre daha uzun olacağından bu optimum kesme hızı kullanılmıştır. Yukarıda bahsi geçen bütün aşırı konsolidasyon oranına sahip numuneler için aynı işlem ayrı ayrı uygulanmış pik ve kalıcı mukavemet değerleri belirlenmiştir. H 8 numunesi üzerinde yapılan halka kesme deneyi sonuçlarına göre farklı aşırı konsolidasyon oranlarına sahip numunelerin kayma gerilmesine karşı yatay yer değiştirme grafikleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aşırı konsolidasyon oranı arttıkça pik kayma mukavemeti artmakta ancak kalıcı kayma gerilmelerinde bir değişiklik olmamaktadır. Bu noktada değişen kalıcı kayma gerilmesine erişmek için gereken yatay deplasman miktarıdır. Numunelerin farklı aşırı konsolidasyon oranı değerleri için yapılan deneylerden en az ikisinde kalıcı mukavemete erişebilmek amacıyla mümkün olduğunca yüksek yatay deplasmanlara çıkılıp kayma mukavemetinin sabitleşmesi gözlenmiştir. Diğer aşırı konsolidasyon oranları için yapılan deneylerde ise bu sabit değere erişildiğinde daha fazla yatay yer değiştirme için beklenmemeiştir.. Bunun nedeni kesme işlemi için gerekli süre ve yatay deplasmanın bazı numunelerde oldukça yüksek seviyelerde olmasıdır. Örneğin bu yatay deplasman H5 numunesinde yüksek aşırı konsolidasyon değerlerinde 400 mm'nin üzerine çıkmaktadır. Bu yatay deplasmana karşılık gelen süre ise 0.1 mm/dak kesme

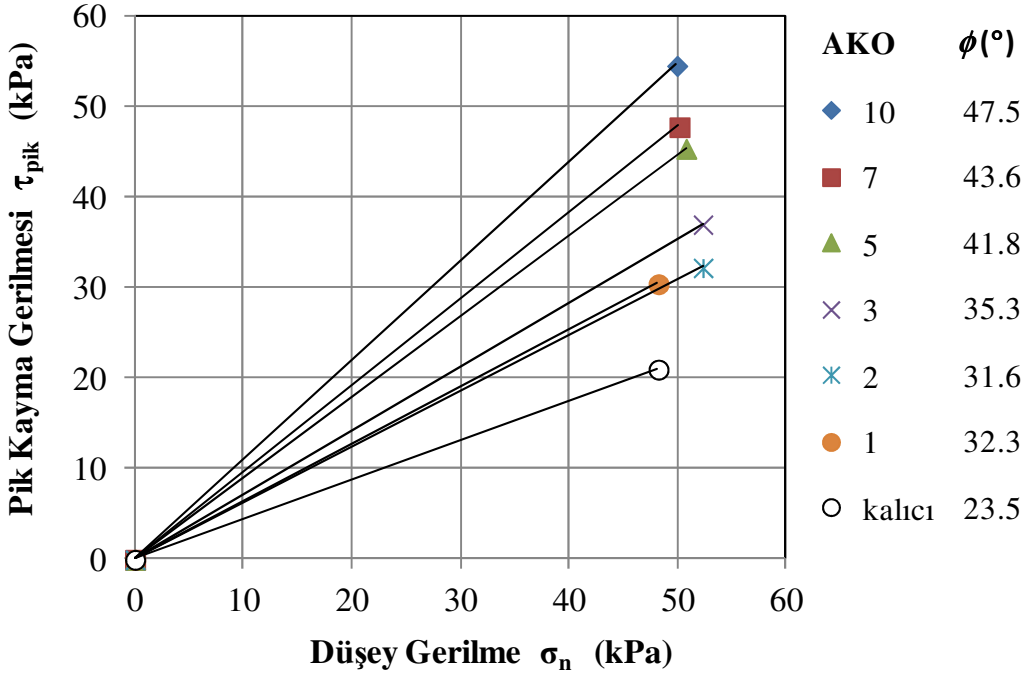
hızı için 4~5 güne karşılık gelmektedir. Bu sebeple yüksek plastisiteli numunelerde kalıcı mukavemet değerine yaklaşıldığında ve sabitleşme başladığında deney sonlandırılmıştır.




**Şekil 4.3 :** H8 Numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında gerilme şekil değiştirme eğrileri.

Gözlenen bir diğer durum ise bu yatay deplasman miktarının da aşırı konsolidasyonun artışıyla beraber arttığıdır. Bu kayma gerilmesi-yatay deplasman grafikleri kullanılarak H 8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarındaki pik mukavemet zarfları ile kalıcı mukavemet zarfları Şekil 4.4'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bu deneylerde kohezyon terimi ihmal edildiği takdirde kayma mukavemeti açılarının aşırı konsolidasyon oranının artışıyla arttığı açıkça ortaya çıkmaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde deney sırasında oluşan çevre sürtünmesi düşey efektif gerilme değerinin ve aşırı konsolidasyon oranının düşük miktarda değişimine sebep olmaktadır. Bütün deneylerde numunelerin deney başı ve deney sonu su muhtevaları ile birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Genel bir eğilim olarak bütün numunelerin aşırı konsolidasyon oranlarının değişimiyle kalıcı mukavemette bir değişiklik görülmemiştir. Ancak pik mukavemetlerde beklendiği üzere genel bir trend olarak aşırı konsolidasyon oranının artışı ile beraber pik mukavemetlerin dolayısı ile pik mukavemetten kalıcı mukavemete düşüş miktarının

arttığı görülmüştür. Buna ek olarak H8 adlı numunede kesme işlemindeki düşey gerilme seviyesi 100 kPa olacak şekilde aynı aşırı konsolidasyon oranına sahip numunelerde aşırı konsolidasyon oranı ile pik mukavemetten kalıcı mukavemetten düşüş miktarı ilişkisindeki değişim incelenmiştir. Yapılan bütün deney sonuçları Bölüm 5.6'da değerlendirilerek sunulmuştur.




**Şekil 4.4 :** H 8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında elde edilen mukavemet zarfları.

## 4.2 Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyleri

Çalışma kapsamında kullanılan numunelerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi amacıyla halka kesme deneylerinin yanında deney tipinin etkisinin araştırılması amacıyla tekrarlı kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. 6 cm x 6 cm kesit alana sahip 2 cm yüksekliğinde hazırlanan numuneler üzerinde 100 kPa ile 400 kPa arasında değişen en az üç farklı düşey yük altında belirlenen kesme hızında tekrarlı kesme kutusu deneyleri yürütülmüştür. Kalıcı mukavemetin elde edilmesi amacıyla numunede artık boşluk suyu basınçlarının oluşmaması istenmektedir. Bu amaçla konsolidasyon verileri kullanılarak tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kullnılacak kesme hızı için aşağıdaki bağıntı önerilmektedir (Head, 1988).

$$\vartheta = {}^{\delta}/_{t_f} \quad \textbf{(4.3)}$$

Bu denklemde υ kesme hızını, δ pik mukavemete erişmek için gerekli yatay deplasman, $t_f$ ise göçme için gereken süre olarak tanımlanmıştır. $t_{100}$ dakika cinsinden olmak üzere $t_f$ değeri için;

$$t_f = 12.7 \times t_{100} \quad \textbf{(4.4)}$$

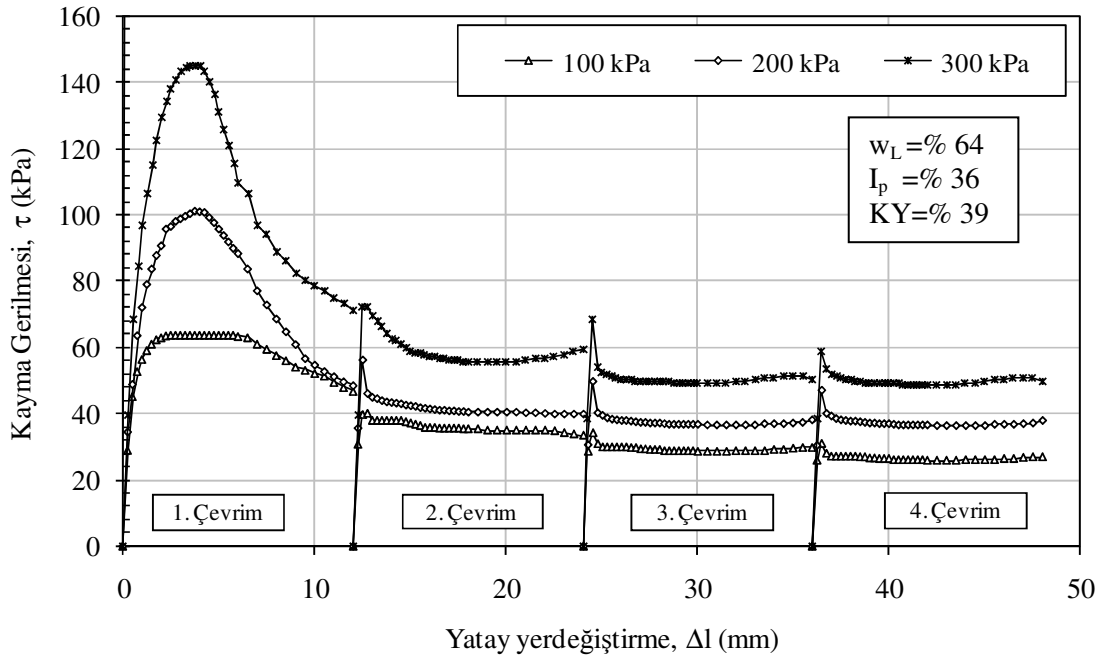
bağıntısı önerilmektedir. δ değerinin için ise ince daneli zeminin kıvamına göre olmak üzere; sert killer için 1 mm-2 mm, katı killer için 2 mm-5 mm ve plastik killer için ise 8 mm-10 mm arasında seçilebileceği belirtilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda bu çalışma kapsamında bütün tekrarlı kesme kutusu deneylerinde numunelere uygulanacak kesme hızı drenajlı şartları temsil etmek üzere 0.035 mm/dak olarak belirlenmiştir. Bu kesme hızının seçiminde deneyin uygulama aşamasında çevrim aralarında yapılacak geri dönüş ve konsolidasyon aşamaları da göz önünde bulundurulmuştur. 0.035 mm/dak kesme hızı ile 12 mm yatay yerdeğiştirme yaklaşık olarak 6 saat sürmektedir, konsolidasyon süreleri de gözönünde bulundurulduğunda herbir çevrimin bir günde tamamlanacağı kabulü ile literarürde verilen çalışmalarda da kesme hızının kalıcı mukavemete etkisinin önemli miktarda olmadığı 0.035 mm/dak kesme hızı seçilmiştir. Bu noktada Skempton (1985) tarafından verilen arazide statik şartlarda yeniden harekete geçen bir şev kaymasında kayma hızının 5 cm/yıl ile 50 cm/gün değerleri arasında değiştiği kabul edilirse, 0.035 mm/dak kesme hızının karşılığı olan 50 cm/gün değerinin arazi şartlarını sağlayan bir hız değeri olduğu anlaşılmaktadır. Deneyler genellikle dört veya beş çevrimde yapılmış ve her çevrim sonrası numune ilk durumuna geri çekilerek konsolidasyona bırakılmış daha sonra tekrar kesilmiştir. Genel prensip olarak kayma gerilmesinin sabitleşmesi sonrası aynı kayma gerilme değerleri elde edilene kadar çevrim sayıları arttırılmıştır. Deneylerde ELE marka kesme kutusu deney aleti kullanılmış, düşey ve yatay deformasyon ölçümleri 1/100 mm hassasiyete sahip deformasyon ölçerler ve LVDT'ler yardımıyla alınmıştır. Deney verileri ELE marka ADU adı verilen veri toplama ünitesi ve Dialog-ADU yazılımı yardımıyla veya manüel olarak toplanmıştır. H 17 numunesi üzerinde gerçekleştirilen tekrarlı kesme kutusu deney sonucunda elde edilen kayma gerilme-yatay deplasman grafikleri ile kayma mukavemeti zarfları ve pik ve kalıcı kayma mukavemeti

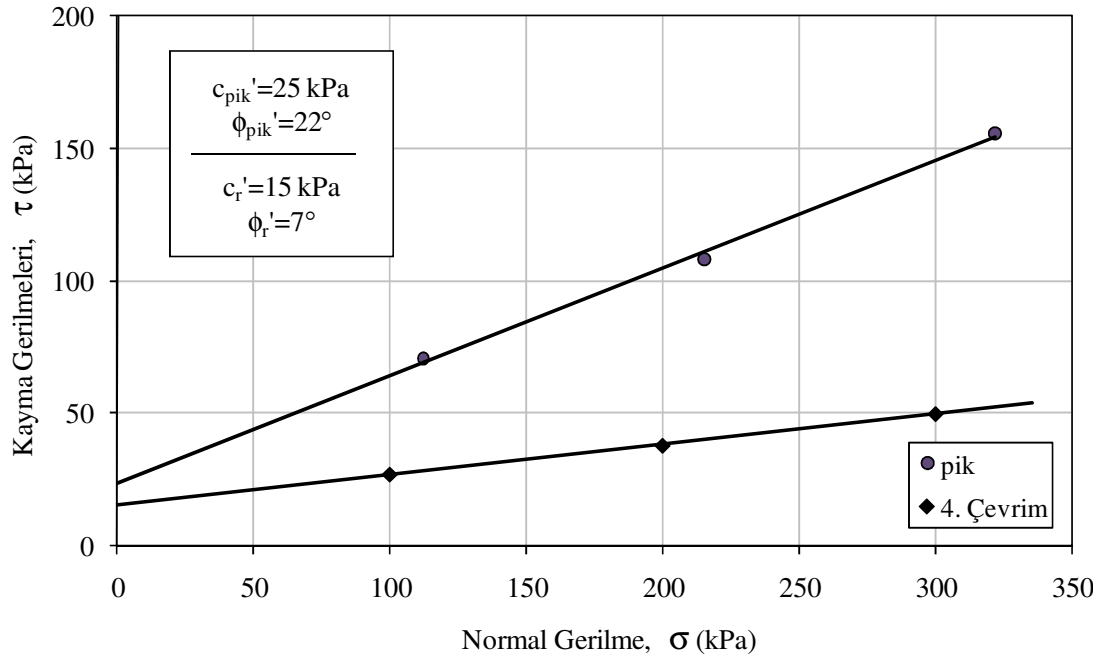
parametreleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde H17 numunesi üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deneyinde kalıcı mukavemete dört çevrimde olmak üzere 48 mm yatay deplasmana erişilmiştir. Her çevrim sonrası numunenin konsolidasyonu için beklendiğinden çevrim başlarında bir pik mukavemet gözlenmekte daha sonra bri miktar sonra kesilmiş yüzeyde oluşan kayma gerilmeleri kendi eğilimine devam etmektedir. Bu noktada deneyin bir sınırlayıcı yanı olan kesintili kesme işlemi nedeni ile cilalanmış kesme yüzeyinin oluşması gecikmektedir. Hareketin tek yönlü olmaması nedeni ile kayma yüzeyinin bozulması da bu açıdan bir sınırlayıcı yan olarak belirtilmelidir. Bunun gibi sebelerden dolayı kalıcı şartlarda oluşması beklenen dane yöneliminin gecikmesi veya bozulması deney sırasında yapıması gereken çevrim sayısını arttırmakta dolayısı ile deney süresi uzamaktadır. Şekil 4.5'te verilen H17 numunesine ait tekrarlı kesme deneyine ait kayma gerilmesi yatay deplasman grafiğinde görüldüğü gibi üçüncü çevrim ile dördüncü çevrimde elde edilen kayma gerilmeleri birbirine çok yakındır. Bu sebeple dördüncü çevrim sonrasında deney sonlandırılmıştır. Bu noktada yapılan tekrarlı kesme kutusu deneylerinde öncelikle en yüksek düşey gerilmedeki deney yapılmıştır. Bunun nedeni her çevrim sonrası kayma gerilmelerde meydana gelen düşüşlerin kayma gerilmelerinin yüksek olması nedeni ile en net olarak görülmesidir. Bu sayede en yüksek düşey gerilme için çevrimler arası kayma gerilmeleri farkının sıfırlandığı çevrim sayısı diğer düşey gerilmelerde de uygun sonuçlar verecektir. Kalıcı şartlarda mukavemet zarfı çizilirken görüldüğü gibi lan düzeltmesi uygulanmamıştır. Bunun nedeni sabit kayma gerimelerinin pik mukavemet sonrasında elde edilmiş olması dolayısı ile numune kesit alanının değişiminin çok sınırlı olmasıdır.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen pik ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Deneylerden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri başta halka kesme deneyi sonuçları olmak üzere diğer deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**TEKRARLI KESME KUTUSU DENEYİ**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Numune : H 17 | | | $w_n$= % 36 | |
| Düşey Gerilme | : | $\sigma_v$=100kPa | $\sigma_v$=200kPa | $\sigma_v$=300kPa |
| Deney Başı | : | $\gamma_n$=17.5 kN/m$^3$ | $\gamma_n$=17.9 kN/m$^3$ | $\gamma_n$=18.0 kN/m$^3$ |
| Deney Sonu | : | $w_{son}$=% 40 | $w_{son}$=% 38 | $w_{son}$=% 36 |




**Şekil 4.5 :** H 17 numunesinin tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları.

**Çizelge 4.2 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri.

| Numune | $c'_{pik}$ | $c'_r$ | $\phi'_{pik}$ | $\phi'_r$ | Numune | $c'_{pik}$ | $c'_r$ | $\phi'_{pik}$ | $\phi'_r$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ($kN/m^2$) | | (°) | | | ($kN/m^2$) | | (°) | |
| H1 | 10 | 0 | 21.0 | 10.0 | H27 | 15 | 0 | 29.0 | 26.0 |
| H2 | 0 | 0 | 19.0 | 8.0 | H28 | 27 | 0 | 21.0 | 16.0 |
| H3 | 17 | 10 | 18.0 | 9.0 | H29 | 29 | 0 | 18.0 | 13.0 |
| H4 | 22 | 16 | 20.0 | 16.5 | H30 | 20 | 0 | 24.0 | 21.0 |
| H5 | 8 | 0 | 15.0 | 7.0 | H31 | 29 | 0 | 15.0 | 11.0 |
| H6 | 25 | 0 | 29.0 | 22.0 | H32 | 17 | 0 | 26.0 | 23.0 |
| H7 | 0 | 0 | 21.0 | 12.0 | H33 | 19 | 0 | 25.0 | 22.0 |
| H8 | 20 | 0 | 29.0 | 21.0 | H34 | 28 | 0 | 16.0 | 14.0 |
| H9 | 9 | 27 | 32.0 | 27.0 | H35 | 19 | 0 | 23.0 | 20.0 |
| H10 | 10 | 10 | 17.0 | 17.0 | H36 | 28 | 0 | 19.0 | 15.0 |
| H11 | 7 | 0 | 22.0 | 13.0 | H37 | 16 | 0 | 23.0 | 21.0 |
| H12 | 3 | 0 | 21.0 | 9.5 | H38 | 26 | 0 | 20.0 | 17.0 |
| H13 | 20 | 0 | 19.0 | 12.0 | H39 | 27 | 0 | 22.0 | 19.0 |
| H14 | 6 | 0 | 25.0 | 10.0 | H40 | 24 | 0 | 18.0 | 15.0 |
| H15 | 20 | 0 | 20.0 | 15.0 | H41 | 22 | 0 | 21.0 | 18.0 |
| H16 | 21 | 10 | 14.5 | 6.5 | H42 | 0 | 0 | 19.0 | 8.0 |
| H17 | 24 | 15 | 22.0 | 7.0 | H43 | 50 | 0 | 20.0 | 16.0 |
| H18 | 26 | 10 | 13.0 | 4.0 | H44 | 25 | 0 | 26.0 | 21.0 |
| H19 | 20 | 0 | 18.0 | 13.0 | H45 | 0 | 0 | 24.0 | 7.0 |
| H20 | 8 | 5 | 9.0 | 5.0 | | | | | |
| H21 | 35 | 5 | 19.0 | 9.0 | | | | | |
| H22 | 10 | 7 | 27.0 | 14.0 | | | | | |
| H23 | 30 | 5 | 5.0 | 3.5 | | | | | |
| H24 | 26 | 10 | 13.0 | 4.0 | | | | | |
| H25 | 30 | 5 | 12.0 | 4.5 | | | | | |

## 4.3 Konsolidasyonlu Drenajlı (CD) Üç Eksenli Basınç Deneyleri

Çalışma kapsamında, kalıcı kayma mukavemeti halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinin yanısıra konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri ile de belirlenmiştir. Hazırlanan numunelerden üç eksenli deneyler için 5 cm çapında 10

cm yüksekliğinde üç eksenli basınç deneyi numuneleri çıkartılarak üç eksenli basınç deney düzeneği içerisinde aşırı konsolidasyon oranı (AKO) 2 olacak şekilde çevre basıncı altında konsolide edilmiştir. Doygunluk için sistemin elverdiği ölçüde ters basınç uygulanmıştır. Numune doygunluğu B parametresi ile kontrol edilmiş ve B≥%95 olduğunda drenajlar açık olarak kesme işlemine geçilmiştir. Üç eksenli basınç deneylerinde numuneye uygulanabilecek deformasyon sınırlı olduğundan ve kalıcı kayma mukavemetinin erişilmesi için kesme yüzeyinde (Şekil 4.6) her zaman cilanmış yüzey elde edilememektedir.



**Şekil 4.6 :** H 14 numunesinin konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinde elde edilen kesme yüzeyi (Bayın, 2011).

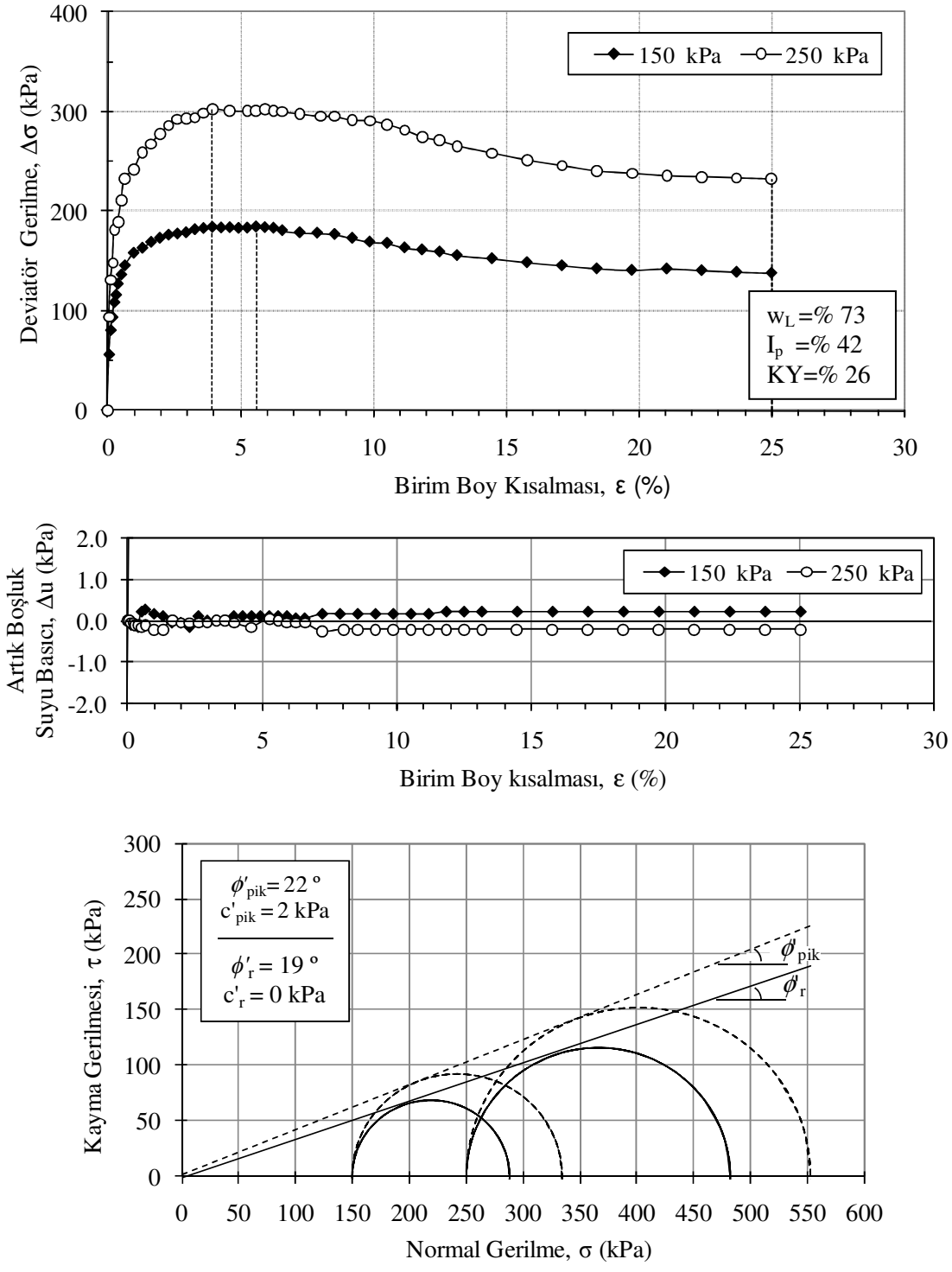
Kesme hızı olarak kalıcı kayma mukavemetinin tanımlı olduğu konsolidasyonlu-drenajlı (CD) şartlarını modelleyebilmek maksadıyla numunede artık boşluk suyu basıncı oluşmayacak kadar düşük hızların kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle deneyler numuneye göre değişmekle beraber genellikle artık boşluk suyu basınçlarının oluşmadığı kesme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme hızları 0.02 mm/dak ile 0.08 mm/dak arasında değişmektedir. Standart olarak zemin mekaniğinin teorisinde göçme kriteri olarak kabul edilen % 20 deformasyona kadar CD deneyleri yürütülüyor olsa da, üç eksenli basınç deneyleri sırasında mümkün olan en fazla deformasyona erişilene kadar deneyler devam ettirilmiştir. Bu anlamda deneyin bir kısıtı olarak kesilen yüzey üzerinde hareket eden alt veya üst parçalardan birisi hücre duvarına temas edene kadar deney sürdürülmüştür. Deneyler sırasında hem elle olarak hem de ELE marka ADU veri toplama ünitesi yardımı ile deformasyon, boşluk suyu basıncı ve yük halkası okumaları alınmıştır. H14

numunesi üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrileri ile kayma mukavemeti zarfları ve kayma mukavemeti parametreleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneyi yapılan ve Bayın (2011) adlı çalışmada da kullanılmış 12 adet numuneye ait kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Konsolidasyonlu Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Sonuçları (Bayın, 2011).

| Numune | $c_{pik}$ (kPa) | $\phi_{pik}$ ($^o$) | $c_r$ (kPa) | $\phi_r$ ($^o$) |
|---|---|---|---|---|
| H 1 | 20 | 22 | 15 | 15 |
| H 2 | 71 | 16 | 23 | 11 |
| H 3 | 40 | 21 | 0 | 16 |
| H 4 | 0 | 27 | 0 | 23 |
| H 5 | 16 | 18 | 26 | 11 |
| H 6 | 23 | 30 | 0 | 27 |
| H 7 | 3 | 21 | 0 | 17 |
| H 8 | 42 | 18 | 0 | 19 |
| H 11 | 0 | 25 | 8 | 17 |
| H 13 | 0 | 24 | 0 | 17 |
| H 14 | 2 | 22 | 0 | 19 |
| H 15 | 0 | 24 | 0 | 20 |

Şekil 4.7 de verildiği gibi H14 numunesinde yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinde numunede % 25 deformasyona karşılık olarak 25 mm boy kısalması değerine erişilebilmiştir. Numunede oluşan artık boşluk suyu basınçları 0.5 kPa değerinin altında kalmış dolayısı ile drenajlı şartlarda deney yapıldığı anlaşılmıştır. Mukavemet zarflarına bakıldığında efektif şartlardaki pik mukavemet zarfı ve Mohr daireleri kesikli çizgi ile gösterilmiş, kalıcı şartlardaki mukavemet zarfı ve Mohr daireleri düz çizgi ile gösterilmiştir.




**Şekil 4.7 :** H 14 numunesinin konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları.

## 4.4 Kesme kutusu deneyleri

Kalıcı kayma mukavemetine erişilmesi için büyük deformasyonlar gerekmektedir. Bu nedenle kesme kutusu deneyinde numune tekrar tekrar kesilerek kalıcı

mukavemet parametreleri elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında standart kesme kutusu deney sonuçları ile tekrarlı kesme kutusu deneylerinin karşılaştırılması ve kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini tahmin etmek amacıyla üç farklı gerilme (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa) altında standart kesme kutusu deneyleri de yapılmıştır. Deneyler için 6 cmx6 cm kesit alanına sahip ve 2 cm yüksekliğinde hazırlanan numuneler en az bir gün konsolidasyona bırakılmış daha sonra belirlenen kesme hızında kesme işlemine geçilmiştir. Bowles (1992), Das (1997) ve Bardet (1997) de verildiği üzere kesme kutusu deneylerinde 0.5 mm/dak ile 2.5 mm/dak arasında değişen kesme hızları önerilmektedir. Bu aralıkta kesme hızının seçimi için ise göçmenin 3 ila 5 dakika sürmesini sağlayacak kesme hızı sınırlaması uygun görülmektedir Bowles (1992). Bardet (1997)'de ince daneli zeminlerde CU ve CD şartlarında farklı hızlarda deney yapılması gerektiği belirtilmektedir. CU şartlarındaki deneylerin yaklaşık 1mm/dak hızında yapılabileceği ifade edilirken CD şartlarındaki deneylerin numunede artık boşluk suyu basıncı oluşmayacak derecede yavaş olması gerektiği belirtilmektedir. Bu amaçla konsolidasyon verileri kullanılarak kesme hızı için aşağıda bağıntı önerilmektedir.

$$\vartheta = {}^{\delta}/_{t_f} \qquad \textbf{(4.5)}$$

Bu denklemde υ kesme hızını, δ pik mukavemete erişmek için gerekli yatay deplasman, $t_f$ ise göçme için gereken süre olarak tanımlanmıştır. $t_f$ değeri için;

$$t_f = 11.7 \times t_{90} \qquad \textbf{(4.6)}$$

formülü önerilmektedir. Bu denklemde $t_{90}$ konsolidasyonun %90'ı için geçen süre olarak tanımlanmıştır. δ değerinin için ise ince daneli zeminin kıvamına göre olmak üzere; sert killer için 1mm-2mm, katı killer için 2mm-5mm ve plastik killer için ise 8mm-10mm arasında seçilebileceği belirtilmiştir. ASTM D3080'e göre ise göçme için geçecek süre

$$t_f = 50 \times t_{50} \qquad \textbf{(4.7)}$$

denklemi ile elde edilebilir. Bu denklemde $t_{50}$ konsolidasyonun %50'ı için geçen süre olarak tanımlanmıştır. Konsolidasyon verilerin karekök zaman yöntemine göre

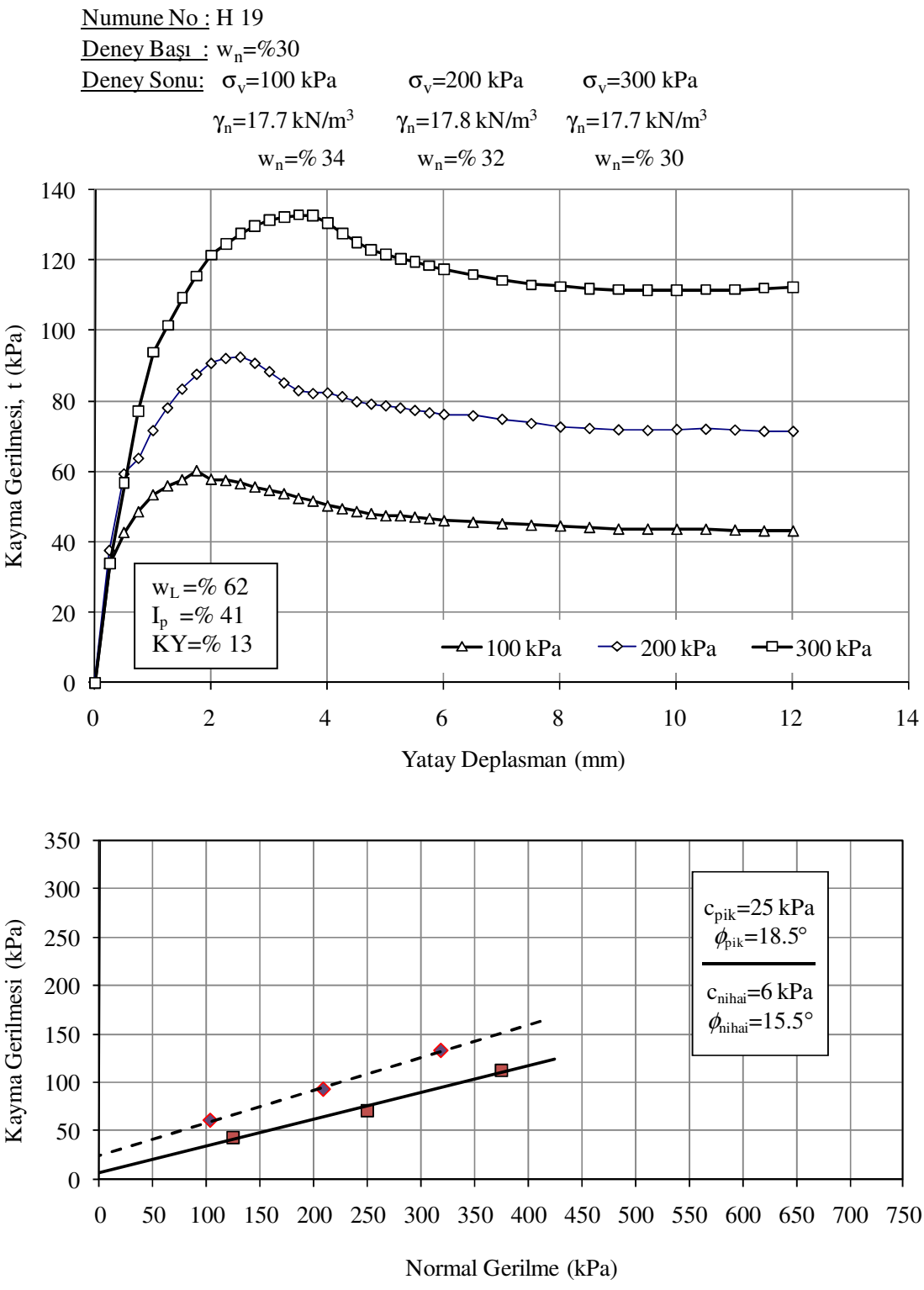
işlenmesi durumunda $t_{50}$ ile $t_{90}$ arasında aşağıdaki bağıntının kullanılabileceği ifade edilmiştir.

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4.28} \quad \textbf{(4.8)}$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda bu çalışma kapsamında bütün numunelerde bir hız olarak bütün kesme kutusu deneyleri drenajlı şartlar temsil etmek üzere 0.12 mm/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ELE marka kesme kutusu deney aleti kullanılmış, düşey ve yatay deformasyon ölçümleri 1/100 mm hassasiyete sahip deformasyon ölçerler yardımıyla alınmıştır. Yapılan deneylere örnek olarak H 19 numunesi üzerinde gerçekleştirilen kesme kutusu deney sonucunda elde edilen gerilme-yatay deplaman grafikleri ile kayma mukavemeti zarfları ve elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilde kesikli çizgi ile gösterilen mukavemet zarfı pik mukavemetlere göre çizilen mukavet zarfını, düz çizgi ile gösterilen ise nihai durumdaki gerilmelere göre çizilen mukavemet zarfını gçstermektedir. Nihai durumdaki mukavemet parametreleri o deneye ait en son veriler göz önüne alınarak elde edilen mukavemet parametreleridir. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi H19 numunesi üzerinde üç farklı düşey gerilme altında yapılan kesme kutusu deneyi sonucuna göre pik kayma mukavemeti parametreleri nihai kayma mukavemeti parametrelerine göre daha yüksek değerler almıştır. Deformasyonun ilerlemesi ile birlikte zemin danecikleri arasındaki çekim kuvvetleri nedeni ile oluşan kohezyon teriminin azaldığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen kayma mukavemeti parametreleri Çizelge 4.4'te özet olarak verilmiştir. Çizelge 4.4'te pik kayma gerilmeleri için elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin yanında her bir düşey gerilme seviyesinde deneyin en son verisi (en büyük yerdeğiştirme değerindeki veriler) baz alınarak elde edilen ve nihai olarak isimlendirilen kayma mukavemeti parametreleri de verilmiştir. Bir sonraki bölümde nihai kayma mukavemeti parametreleri ile kalıcı mukavemet parametreleri karşılaştırılmıştır. Deneylerden elde edilen parametreler yapılan diğer mukavemet deneylerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

KESME KUTUSU DENEYİ




**Şekil 4.8 :** H 19 numunesi kesme kutusu deney sonucu.

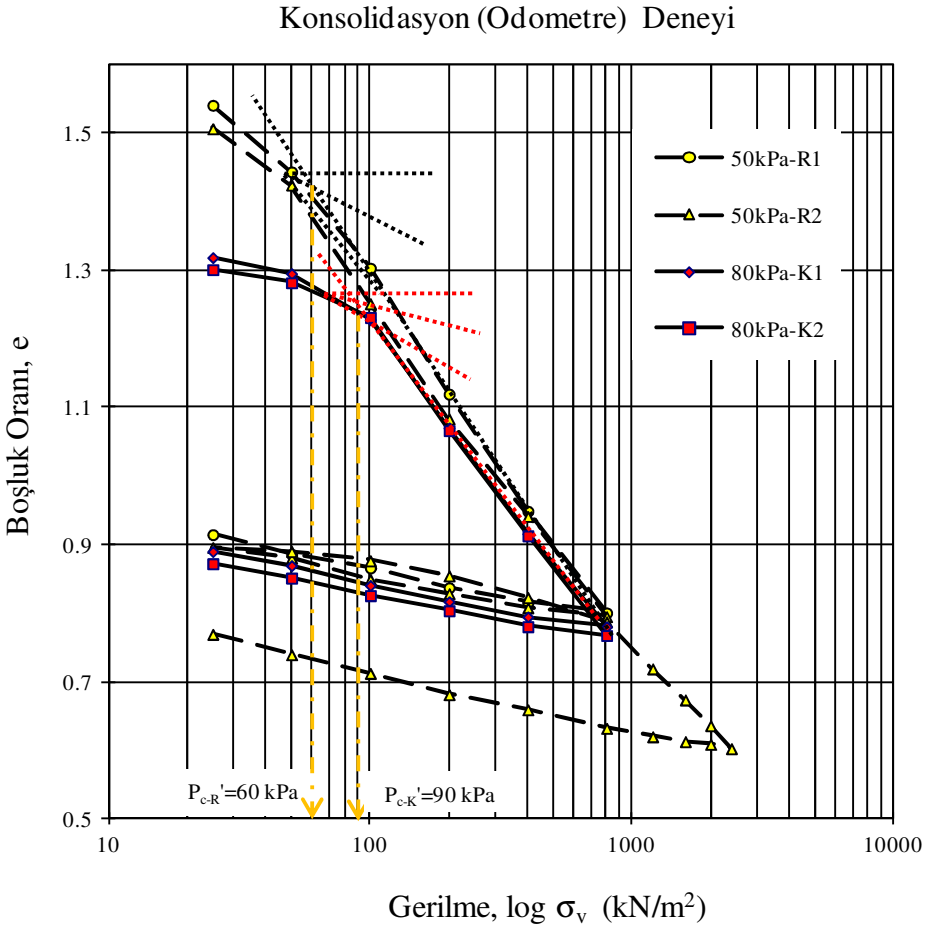
**Çizelge 4.4 :** Kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri.

| Numune | $c_{pik}$ (kN/m$^2$) | $\phi_{pik}$ (°) | $c_{nihai}$ (kN/m$^2$) | $\phi_{nihai}$ (°) |
|---|---|---|---|---|
| H1 | 0 | 16.0 | 0 | 9.0 |
| H2 | 20 | 12.0 | 0 | 8.0 |
| H3 | 20 | 16.0 | 25 | 11.0 |
| H4 | 15 | 21.0 | 15 | 21.0 |
| H5 | 5 | 14.5 | 14 | 5.50 |
| H6 | 0 | 31.0 | 0 | 30.0 |
| H7 | 20 | 19.5 | 0 | 18.0 |
| H8 | 7 | 25.0 | 2 | 24.5 |
| H9 | 0 | 36.0 | 20 | 30.5 |
| H10 | 5 | 17.0 | 5 | 17.0 |
| H11 | 35 | 16.0 | 20 | 15.5 |
| H12 | 15 | 16.0 | 3 | 13.0 |
| H13 | 45 | 17.5 | 20 | 17.0 |
| H14 | 15 | 18.0 | 20 | 9.5 |
| H15 | 35 | 16.0 | 40 | 10.5 |
| H16 | 15 | 16.5 | 7 | 9.0 |
| H17 | 35 | 23.0 | 15 | 17.0 |
| H18 | 55 | 13.5 | 20 | 10.0 |
| H19 | 25 | 18.5 | 6 | 15.5 |
| H20 | 25 | 5.0 | 22 | 2.5 |
| H21 | 45 | 19.5 | 8 | 11.0 |
| H22 | 10 | 26.0 | 2 | 24.0 |
| H23 | 10 | 5.0 | 5 | 3.0 |
| H24 | 55 | 13.5 | 20 | 10.0 |
| H25 | 25 | 13.0 | 25 | 8.0 |

## 4.5 Konsolidasyon Deneyleri

Konsolidometrelerde ve Rowe hücresinde hazırlanan numunelerin konsolidasyon özelliklerini ve ön konsolidasyon basınçlarını belirlemek üzere numuneler üzerinde en az iki konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Aynı zamanda kalıcı kayma mukavemeti ve kayma mukavemeti parametrelerinin elde dilmesi için yapılacak halka kesme, tekrarlı kesme kutusu, üç eksenli basınç deneyi ve kesme kutusu deneylerinin kesme hızı hesaplarında ilgili yük kademesi için $t_{50}$, $t_{90}$ ve $t_{100}$ değerlerinin belirlenmesi amacıyla konsolidasyon deney sonuçlarından faydanılmıştır. Konsolidasyon deneyleri 5 cm çapında 2 cm yüksekliğinde numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. ELE marka Ödometre deney aleti kullanılarak yapılan deneylerden birisinde kademeli olarak 25 kPa düşey gerilmeden başlayarak yük artım oranı 1 olacak şekilde 800 kPa düşey gerilmeye çıkılmış ve boşaltmaya geçilmiştir. Diğer konsolidasyon deneyinde ise yine 25 kPa düşey gerilmeden başlayarak kademeli olarak 800 kPa düşey gerilmeye çıkıldıktan sonra boşaltma sürecinde 25 kPa düşey gerilmeye inilmiş daha sonra tekrar yüklemeye geçilerek yine 1 yük artım oranı kullanılarak 2400 kPa düşey gerilmeye çıkılmış ve son olarak aynı yük azalım oranı kullnılarak 25 kPa düşey gerilemeye inilerek deney tamamlanmıştır. Aşırı konoslidasyon oranı ile kalıcı mukavemet ilişkisi incelenirken numuneye aşırı konsolidasyon oranı laboratuvar şartlarında uygulanacaktır. İkinci deney tipi laboratuvar şartlarında aşırı konsolidasyonun sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmek amacıyla yapılmıştır. Konsolidasyon okumaları hem elle 1/100 mm hassasiyetli deplasman ölçer yardımıyla hem de elektronik olarak alınmıştır. Örnek olarak H 8 numunesi üzerinde yapılan konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen boşluk oranı (e) – logaritma düşey yük (log p) eğrileri Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere H 8 numunesinden dört adet konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Konsolidometre ve Rowe hücresinde farklı düşey gerilmeler altında hazırlandığından deney başı boşluk oranları farklı olarak görülmektedir. 25 kPa düşey gerilemeye ait boşluk oranı yaklaşık olarak 1.5 olan ve R1 ve R2 notasyonları ile gösterilen numuneler, 50 kPa düşey gerilme altında Rowe hücresinde hazırlanan numunelerdir. 25 kPa düşey gerilemeye ait boşluk oranı yaklaşık olarak 1.3 olan ve K1 ve K2 notasyonları ile gösterilen numuneler ise konsolidometrelerde 80 kPa düşey gerilme altında hazırlanan numunelerdir. Konsolidasyon deneylerinde 100 kPa düşey gerilme seviyesine kadar bir farklılık görülsede bu gerilmeden sonra numunelerin birbirlerine

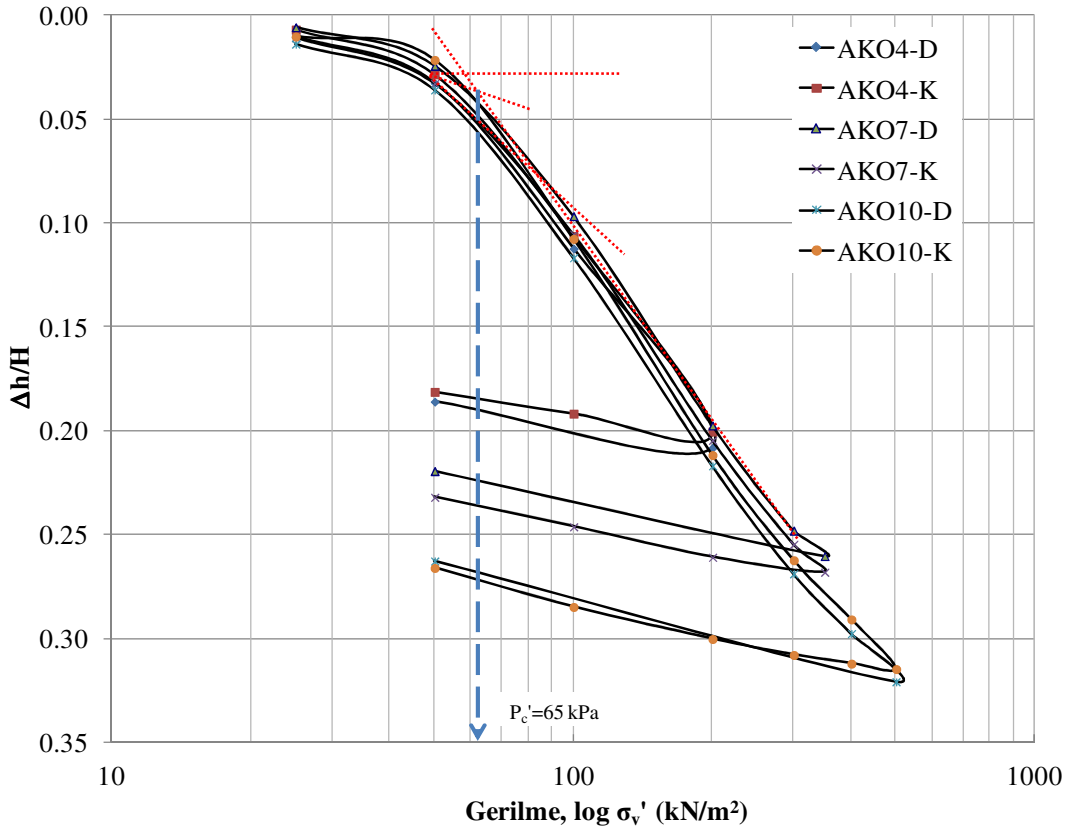
uygun şekilde davrandıkları açıkça görülmektedir. Casagrande yöntemine göre hesaplanan ön konsolidasyon basınçları Rowe hücresi numunelerinde yaklaşık 60 kPa, konsolidometre numunelerinde ise 90 kPa olarak hesaplanmıştır. İlk boşaltma sonrası tekrar yükleme yapılarak 2400 kPa düşey gerilmeye çıkılan numunenin ön konsolidasyon basıncı ise 800 kPa olarak bulunmuştur.




**Şekil 4.9 :** Farklı düşey gerilmelerde hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deneyi sonuçları.

Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek üzere yapılacak deneylerde halka kesme deneyinde konsolidasyon aşamasında en yüksek düşey gerilmeye çıkıldıktan sonra 50 kPa düşey gerilmeye doğrudan veya kademeli olarak boşaltmanın numune özelliklerini ne ölçüde değiştirdiğini belirlemek üzere konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Nihai aşırı konsolidasyon oranları 4, 7 ve 10 ve nihai düşey gerilmeleri 50 kPa olacak şekilde son boşaltma bölümünün kademeli düşüş (K) ve doğrudan düşüş (D) olarak yapıldığı deney sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu deneyler 80 kPa altında konsolidometrede

hazırlamış olan H 2 numunesi üzerinde yapılmıştır. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi numunelerin birim deformasyona karşılık logaritmik ölçekte verilen efektif düşey gerilme grafiği incelendiğinde genel trend olarak uyumlu eğriler elde edilmiştir. Ön konsolidasyon basınçları yaklaşık olarak 65 kPa olarak elde edilmiştir. Numunelerin birim oturma değerlerinde düşük mertebelerde farklar olsa da genel eğilim olarak uyumlu sonuçlar vermiştir. Eğrilerde boşaltma bölümlerinin eğimleri (Cs) karşılaştırıldığında önemli miktarda bir değişiklik gözlenmemektedir. Yapılan deneylerde elde edilen Cs ve Cc değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.




**Şekil 4.10 :** H 2 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen konsolidasyon eğrileri.

**Çizelge 4.5 :** H2 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için kademeli (K) ve doğrudan (D) boşaltma durumlarında elde edilen Cs ve Cc değerleri

| | AKO4-D | AKO4-K | AKO7-D | AKO7-K | AKO10-D | AKO10-K |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cs | 0.0246 | 0.0213 | 0.0357 | 0.0400 | 0.0447 | 0.0374 |
| Cc | 0.3184 | 0.3121 | 0.2588 | 0.2611 | 0.2394 | 0.2466 |

Bu sonuçlara göre aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti ile ilişkisinin incelendiği deneylerde konsolidasyon sonrasında boşaltma bölümünde düşey gerilme kademeli yerine doğrudan indirilerek deney süresinin kısaltılması yoluna gidilmiştir.

# 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi ve etkiyen faktörlerin etkisinin incelendiği bu çalışma kapsamında farklı geoteknik özelliklere sahip 50 adet numune üzerinde halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi ve üç eksenli basınç deneyi yapılmış, kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalıcı kayma mukavemetine kesme hızının, kıvam limitlerinin, deney tipinin, ince dane oranı, kil yüzdesi, aktivite ve aşırı konslidasyon oranının etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Kalıcı kayma mukavemetinin pratik amaçlar doğrultusunda tahmin edilebilmesi için çeşitli korelasyonlar önerilmiştir. Aşağıda öncelikle deney yönteminden başlayarak kıvam limitleri, zemin özellikleri, kesme hızı ve aşırı konsolidasyon oranı ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi incelenmiştir.

## 5.1 Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması

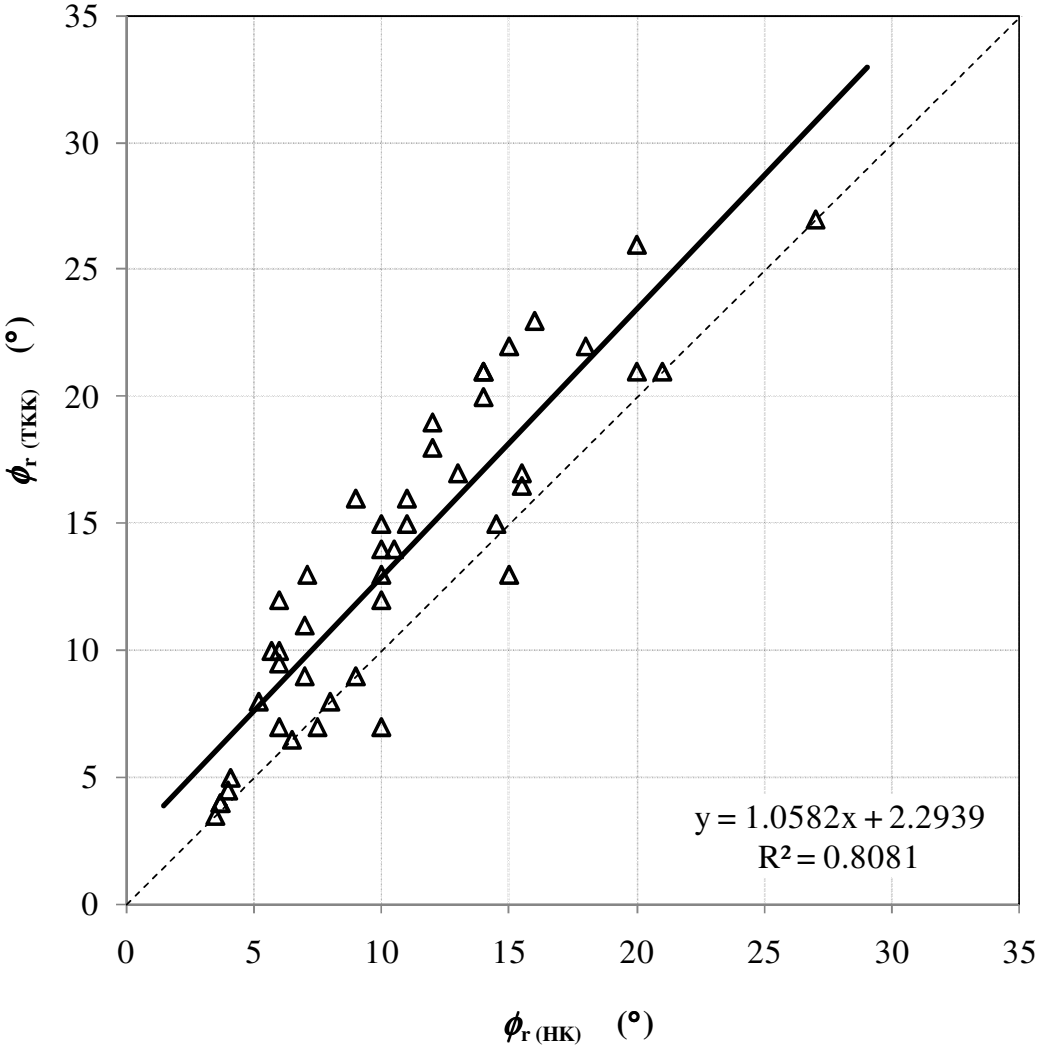
Kalıcı kayma mukavemeti halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi gibi farklı deney yöntemleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu deney yöntemlerinin birbirlerine karşı üstünlükleri ve sınırlayıcı zayıf yanları önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu çalışma kapsamında kalıcı kayma mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla hazırlanan numuneler üzerinde halka kesme deneyi, tekrarlı kesme kutusu deneyi ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmış, belirlenen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri üzerinde deney yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında bu deneylere ek olarak aynı numuneler üzerinde standart kesme kutusu deneyleri de yürütülmüş ve deney sonuçları diğer deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde en uygun yöntem halka kesme deneyidir. Ancak uygulamada kullanım kolaylığı açısından yaygın olarak tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi tercih edilmektedir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yönteminin kullanımı ise diğer

deneylere göre oldukça sınırlı kalmaktadır. Erişilebilen deformasyon seviyesi, deney süresince kesit alanın sabit olması ve diğey gerilmenin üniform dağılımı karşılaştırıldığında halka kesme deney yöntemi diğer deney yöntemlerinden daha fazla öne çıkmaktadır. Farklı tipleri bulunan halka kesme deneyinin kurulum ve numune boyutları zayıf yönüdür. Kullanılan numune boyutları nedeni ile çoğunlukla örselenmiş numunenin kullanılması halka kesme deneyinin sınırlayıcı yanlarından birisidir. Büyük deplasmanlar sonrasında kesme yüzeyinde örselenmenin etkisi çok anlamlı olmayacağından dolayı numune hazırlamanın kalıcı mukavemete büyük bir etkisinin olmadığı göz önüne alınırsa örselenmemiş numune kullanımı uygunsuz bir durum yaratmayacaktır. Bu açıdan numune hazırlama şeklinin diğer faktörlere göre daha az etkisinin olduğu düşünülmektedir. Uygulamada sıklıkla kullanılan tekrarlı kesme kutusu deneyinde numunede oluşan gerilme yığılmaları ile deney süresince kesme yüzeyinin kesit alanının sabit olmaması bu deney yöntemi için en önemli sınırlamalardandır. Ayrıca halka kesme deneyine göre daha düşük deformasyonlarda deneye son vermek gerekebilmektedir. Her ne kadar üç eksenli basınç deneyine göre tekrarlı kesme kutusu deneyi daha fazla deformasyona izin verse de, bu deformasyonun sürekli olmaması ve geri çekme sırasında kesme yüzeyinin bozulması nedeniyle birtakım olumsuzluklar içermektedir. Deney düzeneğinin yaygın olarak bulunması, gerekli numune boyutları ve kullanım kolaylığı ise tekrarlı kesme kutusunun kuvvetli yönleridir. Üç eksenli basınç deneyinin kesme yüzeyinin belirli olmaması ve sınırlı kesme deformasyonu bu deneyin zayıf yönlerinin başlıcalarıdır. Kesme yüzeyinde üniform düşey gerilmenin olmaması ve kesme yüzeyinde kesit alanının sabit olmaması bu deney yöntemi için de sınırlayıcı yanlar olarak sayılmaktadır. Kalıcı kayma mukavemetinin geçerli olduğu kesme hızı mertebeleri açısından her üç deney tipi de yeterli kapasiteye sahiptir.

Bu çalışmada yaklaşık 50 numune üzerinde halka kesme kutusu ve 44 numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu ve 12 numune üzerinde konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bölüm 2'de verilen konu üzerindeki önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında başta Skempton tarafından yapılan yayınlarda olmak üzere üzerinde durulan halka kesme deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneyi karşılaştırılması bu çalışma sonuçları ile uyum göstermektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında tekrarlı kesme kutusu deneylerinin halka kesme deneyinden yaklaşık 1° ~ 2° daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açısı vermektedir. Bu

çalışma sonucunda elde edilen halka kesme deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edile kalıcı kayma mukavemeti açılarının birbirlerine göre değişimi Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekilde kesikli olarak verilen çizgi tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ($\phi_{r\ (TKK)}$) halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısına ($\phi_{r\ (HK)}$) eşit olması durumunu göstermektedir.




**Şekil 5.1 :** Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi.

Şekilde gösterilen veriler kullanılarak yapılan lineer regresyon analizi sonucunda tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneylerinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında belirleme katsayısı $R^2$=% 81 olan

$$\phi_{r\,(TKK)} = 1.06 \times \phi_{r\,(HK)} + 2.29 \quad \textbf{(5.1)}$$

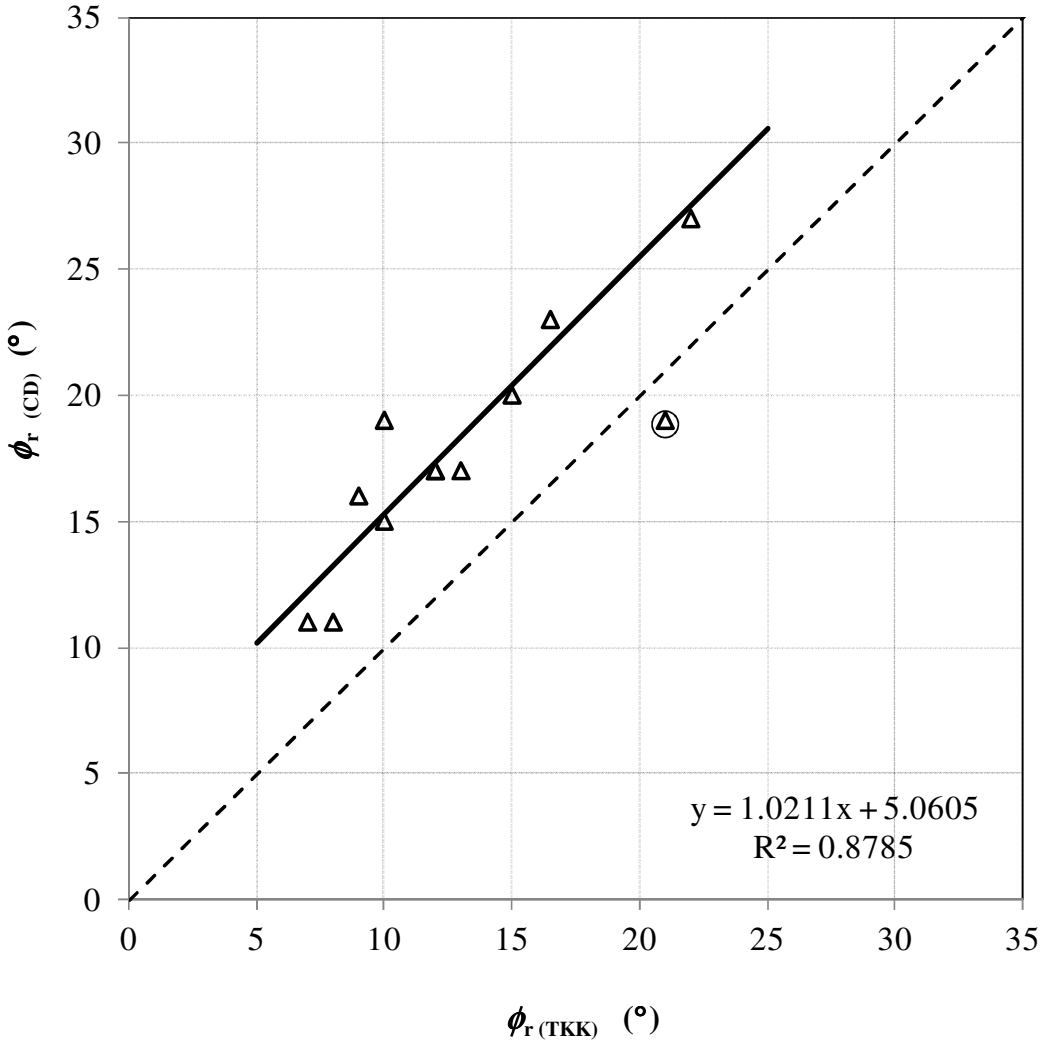
bağıntısı elde edilmiştir. Bu bağıntıdan anlaşılacağı üzere halka kesme deneyi sonuçları tekrarlı kesme kutusu deneyine göre yaklaşık olarak 2.3° daha düşük kalıcı kayma mukavemeti açısı vermektedir. Bu farklılığın ana sebebi erişilebilen kesintisiz yerdeğiştirme seviyesi olarak görülmektedir. Kalıcı kayma mukavemeti davranışında pik mukavemet sonrasında görülen, tamamıyla yumuşamış veya kritik durum olarak tanımlanan hal ile kalıcı durum arasıda kayma mukavemeti açısı anlamında en az 1°'lik bir fark olduğu Stark ve Eid (1994) tarafından ifade edilmiştir. O halde tekrarlı kesme kutusu deneyinde de erişilen deformasyonlar sınırlı kaldığı için kalıcı mukavemet olarak tanımlanan durum aslında kritik durum olabilir. Kritik durum sonrasında kalıcı duruma erişilme, danelerin yönelimi sonrasında oluştuğundan çok daha fazla deformasyon gerekmektedir. Aynı zamanda tekrarlı kesme kutusu deneyinde her çevrim sonrası kesme yüzeyinin bozulup tekrar tekrar oluşturulması nedeni ile kalıcı duruma erişilmesi geciktirilmektedir. Hareketin sürekli tek yönde olmaması nedeni ile dane yöneliminin tam olarak sağlanması mümkün olamamaktadır. Halka kesme deneyinde ise yüksek deformasyonlar sonrası dane yönelimi sağlandığından daha düşük kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmektedir.

Yapılan halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerine ek olarak 12 numune üzerinde konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç (CD) deneyleri yapılmış ve kalıcı kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Diğer deneylere göre erişilebilen deformasyon seviyesi sınırlı olan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinde,genel olarak halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerine göre daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir. Şekil 5.2'de konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırması yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ($\phi_{r\,(CD)}$) tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen değerlere ($\phi_{r\,(TKK)}$) göre ortalama olarak 5° daha yüksektir. Yapılan lineer regresyon analizi sonucunda konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile

tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında belirleme katsayısı $R^2$=% 87 olan aşağıdaki bağıntıya ulaşılmıştır.

$$\phi_{r\,(CD)} = 1.02 \times \phi_{r\,(TKK)} + 5.06 \qquad \textbf{(5.2)}$$

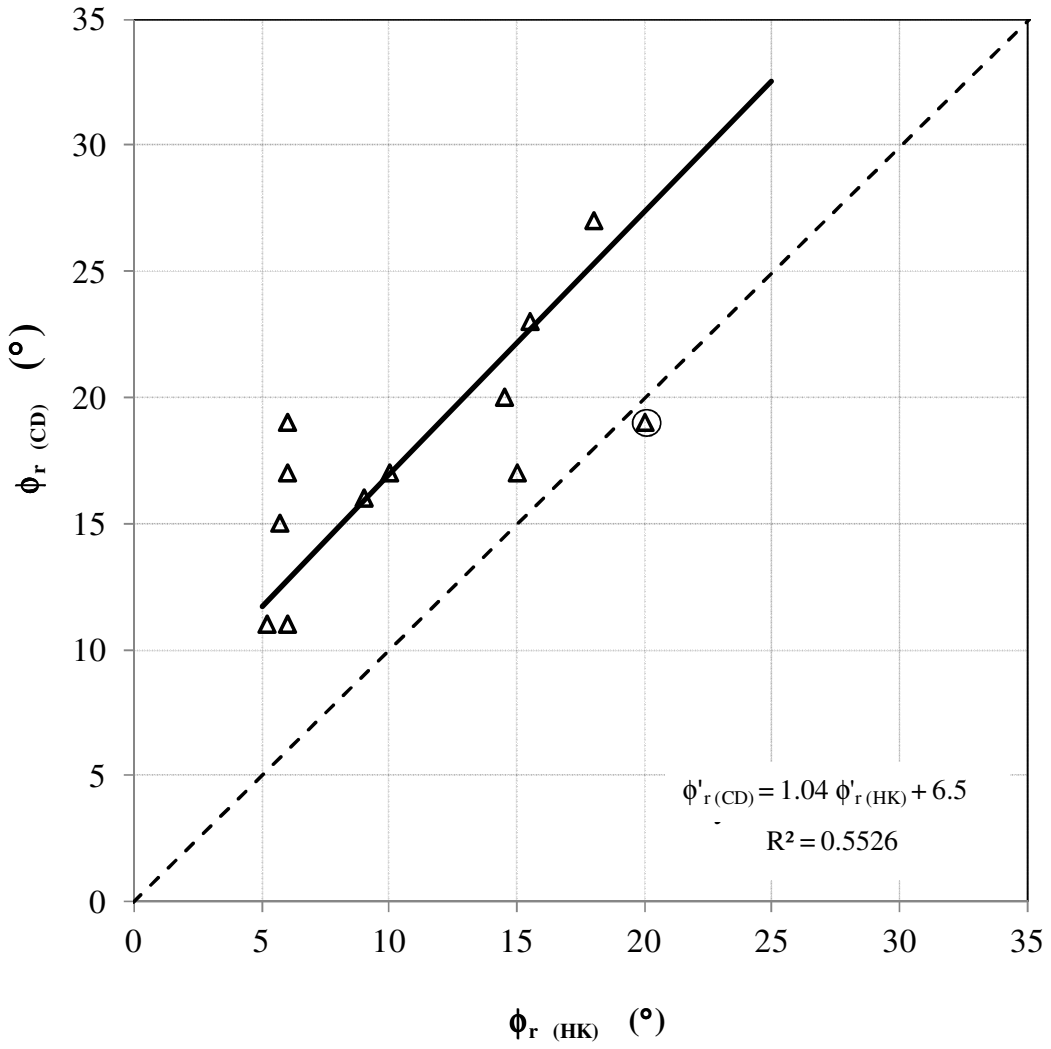
Bu regresyon analizinde diğer verilerden aykırı bir değere sahip olan ve yuvarlakla işaretlenmiş değer analiz dışında tutulmuştur.




**Şekil 5.2 :** Üç eksenli basınç (CD) deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi.

Üç eksenli basınç deneyleri ile halka kesme deneyleri karşılaştırıldığında kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki fark daha da artmaktadır. Şekil 5.3'te halka kesme deneyi ile üç eksenli basınç deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları karşılaştırılmıştır. Yapılan lineer regresyon analizi sonrasında kalıcı kayma mukavemeti açısı anlamında iki deney arasında yaklaşık 6° civarında bir fark olduğu

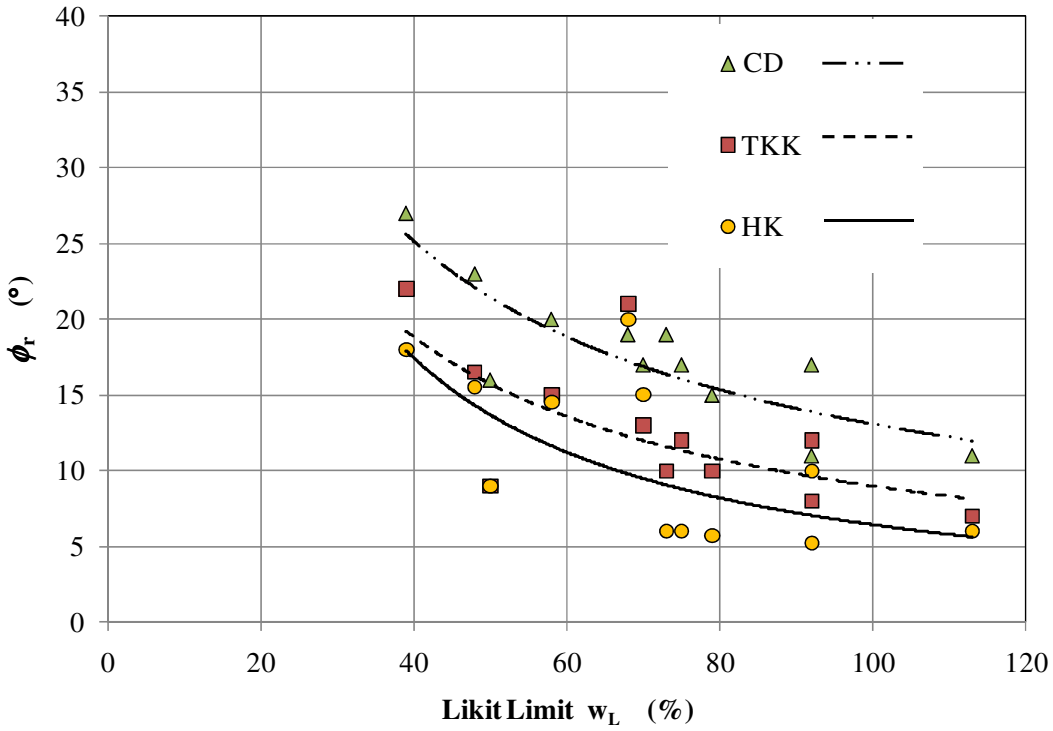
görülmüştür. Regresyon analizinde yuvarlak içinde işaretlenmiş veri analiz dışında bırakıldığında belirleme katsayısının çok yüksek olmadığı $R^2$=0.55 gibi bir değer aldığı görülmüştür. Kalıcı kayma mukavemeti açısının alabildiği değerler göz önüne alındığında iki deney yöntemi sonuçları arasındaki bu fark oldukça yüksek bir değer olarak nitelendirilebilir. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde üç eksenli basınç deneyi sonuçlarının çok geniş bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu durumun deneyde erişilen deformasyon seviyesinin düşük olmasından kaynaklandığı varsayılarak bazı özel tasarım üç eksenli basınç deneyleri haricinde bu deney yönteminden yeniden harekete geçmiş şevlerin stabilitesinin tahkikinde mümkün olduğunca kaçınmakta fayda vardır.




**Şekil 5.3 :** Üç eksenli basınç (CD) deneyi ile halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının değişimi.

Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney yapılmış olan 12 numunenin likit limite bağlı olarak kalıcı kayma mukavemeti açıları karşılaştırılmış ve Şekil 5.4'te

verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere yukarıda verilen kalıcı kayma mukavemeti açıları arasındaki farklar likit limite bağlı olarak ta yaklaşık aynı mertebede elde edilmektedir.




**Şekil 5.4 :** Üç eksenli basınç deneyi, halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limite göre karşılaştırması.

Yukarıda verilen şekiller ve önceki çalışmaların sonuçları değerlendirildiğinde kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneylerinin daha düşük değerler verdiği ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinin sonuçlarının diğerlerine göre yüksek değerler verdiği görülmektedir.. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinin kullanıladığı durumlarda diğer deney yöntemlerine göre daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açılarının elde edildiği unutulmamalıdır. Deney yönteminin üstünlükleri ve güvenli tarafta kalmak açısından bu anlamda en uygun deney yönteminin halka kesme deneyi olduğu söylenebilir.

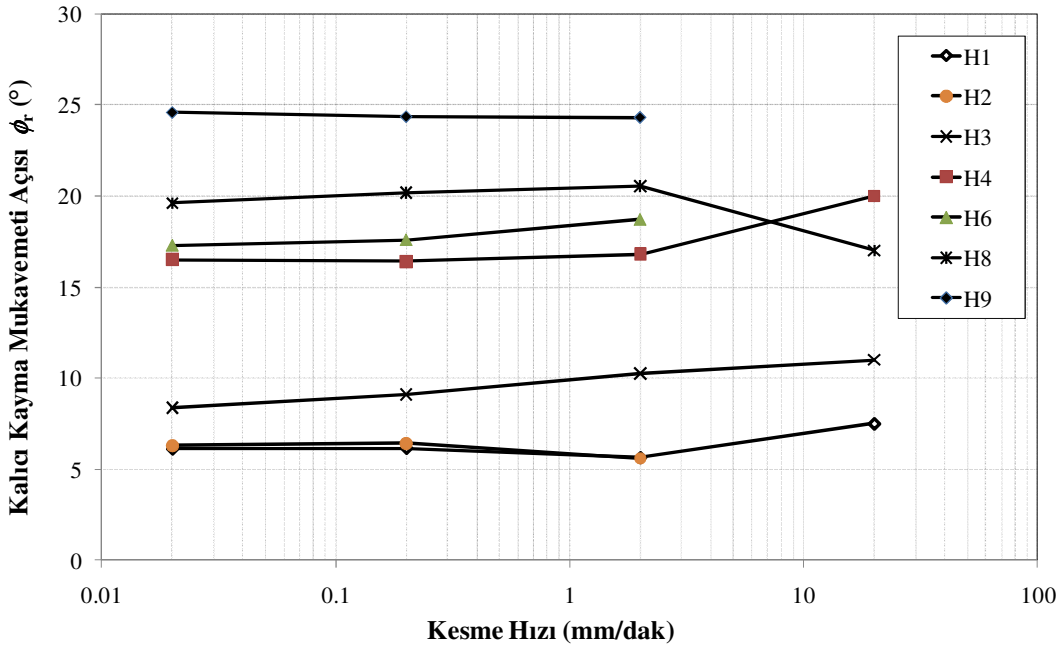
## 5.2 Kesme Hızı ile Kalıcı Kayma Mukavemeti İlişkisi

Kalıcı kayma mukavemeti oluşan kesme yüzeyinde büyük deformasyonlar sonucunda, danelerin yönelimi ile birlikte sabit bir kayma mukavemeti değerine

erişilmesine olarak tanınmaktadır. Bu noktada şartlardan birisi de hareketin hızının kesme yüzeyinde artık boşluk suyu basıncı doğuramayacak kadar düşük kesme hızlarında olmasıdır. Bu sayede deney sırasında kesme yüzeyinde daneler arası sürtünme haricinde başka bir bileşen oluşmayacak ve dayanım tamamen arayüzeydeki sürtünme kuvvetine bağlı kalacaktır. Literatürde kalıcı kayma mukavemetinin ilk olarak gündeme geldiği zamanlardan itibaren kesme hızının kalıcı kayma mukavemeti araştırmacıların bu konuda ilgilendiği ana unsurlardan birisi olmuştur. Önceki bölümlerde konu ile ilgili olarak literatürde verilen çalışmalar özetlenmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti tarafından kontrol edilen daha önceden kaymış olan şevlerde kesme hızı çok geniş bir aralıkta oluşabilmektedir. Sismik hareketler nedeni ile çok hızlı kaymalar meydana gelebilirken çok yavaş akma hareketleri de gözlenebilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar bu konuda yaptıkları çalışmalar ile kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızı ile olan ilişkisini belirlemeye çalışmışlardır. Genel olarak kalıcı kayma mukavemetinin kesme hızının artması ile birlikte bir artış gösterdiği bilinmektedir. Bazı zemin türlerinde tersine bir davranış olarak kesme hızının artışı ile birlikte kalıcı mukavemetin düşüşe geçtiği de görülmüştür (Skempton, 1985). Öncelikle Skempton olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneylerden anlaşıldığı üzere kalıcı mukavemet 0.1 mm/dak kesme hızına kadar önemli bir değişim göstermemekte, 1.0 mm/dak kesme hızına kadar düşük bir artış olmakta daha sonra ise yüksek kesme hızlarında kalıcı mukavemette ciddi değişiklikler gözlenmektedir (Skempton, 1985).

Literatürde ve deney standartlarında kesme hızının belirlenmesi amacı ile çoğunlukla konsolidasyon verilerine bağlı olarak tanımlanmış yöntemler verilmiştir. Örneğin ASTM D6467 - 06a standartında halka kesme deneyi için ilgili yük kademesindeki konsolidasyon verilerine Casagrande (log t) yöntemi kullanılarak elde edilen oturmanın yarısının meydana gelmesi için gereken süreye '$t_{50}$' bağlı olarak kesme hızının belirlenmesine yönelik bir yöntem önerilmektedir. BS standartlarında ise bundan biraz farklı olarak ilgili yük kademesindeki konsolidasyon verilerine karekök t yöntemi kullanılarak oturmanın %100'ünün meydana gelmesi için gereken süre '$t_{100}$' göçme için gereken süre hesabında kullanılmaktadır. Halka kesme deneyinin yapılışı hakkında hazırlanmış olan ASTM D6467 - 06a standartında yönlendirici olarak yüksek plastisiteli bir kil için yaklaşık olarak 0.02 mm/dak'lık bir hızın yeterli olabileceği ifade edilmektedir.

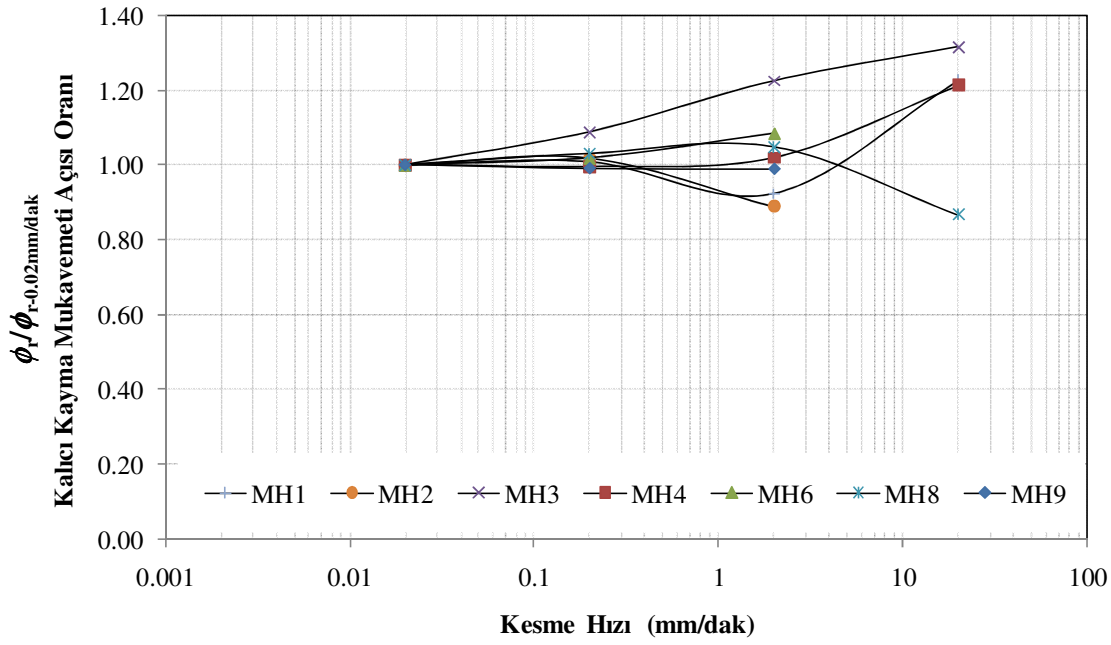
Bu çalışma kapsamında kullanılan numuneler üzerinde yapılan halka kesme deneylerinde standart olarak 0.02 mm/dak kesme hızı kullanılmıştır. Ancak hem ileriki bölümlerde sunulacak olan aşırı konsolidasyon oranının etkisinin araştırıldığı deneylerde de kullanılacak kesme hızının tayini hem de kullanılan numuneler üzerinde kesme hızının etkisinin olup olmadığının tespiti için 7 farklı numune üzerinde farklı düşey gerilme seviyelerinde en az üç kesme hızında halka kesme deneyleri yürütülmüştür. Numuneler farklı kıvam özelliklerine bağlı kil numuneleri olarak seçilmeye özen gösterilmiştir. Kesme hızları ise 0.02 mm/dak, 0.2 mm/dak ve 2 mm/dak olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak halka kesme deney düzeneğinin modifikasyonu öncesinde bazı numuneler üzerinde 20 mm/dak kesme hızında deneyler yapılmış ve sonuçları değerlendirmeye alınmıştır. Literatürde özellikle deprem şartlarını modelleyebilmek amacıyla daha yüksek kesme hızlarıda kullanılmış olsa da bu çalışma çerçevesinde daha yüksek kesme hızlarına çıkma gereksinimi duyulmamıştır. Bu çalışma kapsamında farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneylerinin sonuçları Şekil 5.5'te görülmektedir.




**Şekil 5.5 :** Seçilmiş numuneler üzerinde farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları.

Yapılan deney sonuçlarına dikkat edilirse kalıcı kayma mukavemeti açısı değerleri 5° ile 25° arasında değişmektedir. Numunelerin likit limitleri ise %24 ile % 92 arasında değerler almaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere genel olarak çalışılan kesme hızı aralığında çok değişken kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmemiştir. Göreceli

olarak yüksek bir kesme hızı olan 20 mm/dak kesme hızında yapılan deneylerde numunelerin kalıcı kayma mukavemeti açılarında artışlar veya düşüşler görülmüştür. Bu artış ve düşüşler Skemton (1985)'te verilen deney sonuçları ile benzerlik taşımaktadır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde genellikle birbirine yakın kalıcı mukavemet açıları gözlenirken bazı numunelerde mukavemet zarfının kohezyon teriminde küçük miktarda farklılılar göze çarpmıştır. Skempton (1985) tarafından verilen gösterime benzer olarak yapılan en düşük kesme hızındaki (0.02 mm/dak) kalıcı kayma mukavemet açısı esas alınarak diğer kesme hızlarında elde edilen kesme hızları normalize edildiğinde Şekil 5.6'da verilen grafik elde edilmiştir. Yukarıda sözü edilen durum burada daha açık olarak görülmektedir. 0.1 mm/dak kesme hızına kadar hızın artışıyla beraber kalıcı kayma mukavemeti açısında önemli bir degişim gözlenmezken özellikle 1 mm/dak kesme hızından sonra mukavemette genelde artış gözlenmektedir.



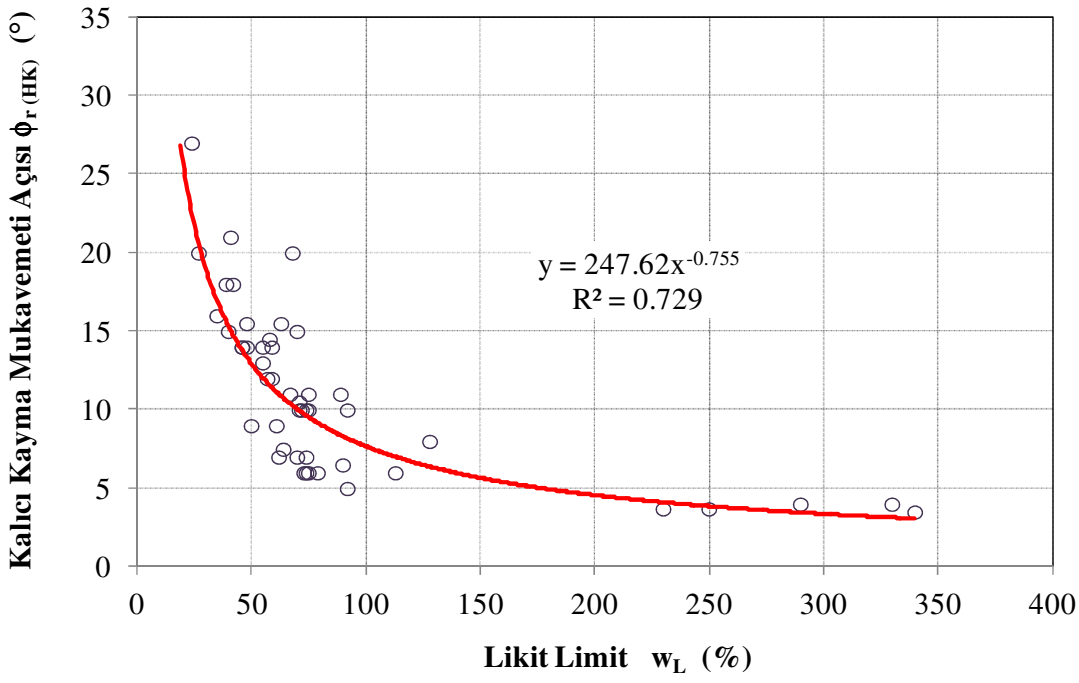

**Şekil 5.6 :** Farklı kesme hızlarında yapılan halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının 0.02 mm/dak kesme hızında elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısına oranı.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında yapılacak deney sayısının ve deney sürelerinin fazla olması nedeni ile aşırı konsolidasyon oranının etkisinin araştırıldığı deneylerde 0.1 mm/dak kesme hızının kullanıldığı takdirde kalıcı mukavemet değerlerinde

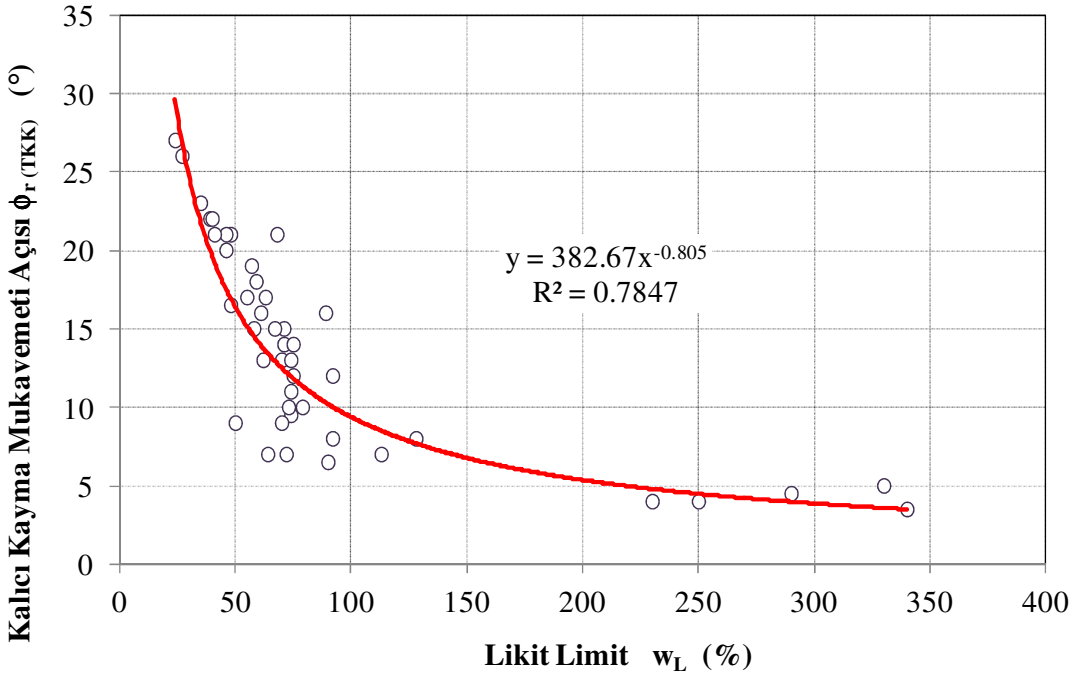
meydana gelebilecek farklılığın kabul edilebilir seviyede olduğu sonucuna varılmıştır.

### 5.3 Kıvam Limitlerinin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi

Değişik araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmaların çoğunda kalıcı kayma mukavemeti ile en çok ilişkilendirilen zemin özelliklerinin kıvam limitleri olduğu görülmektedir. Bugüne kadar birçok araştırmacı ince daneli zeminlerin sınıflandırılmasında da en önemli parametre olan plastisite özellikleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı, sekant modülü gibi mukavemet parametreleri ile bağlantısını incelemiştir. Çoğunlukla likit limit ve plastisite indisini temel alan korelasyonlar olduğu gibi bir kaç parametreyi birlikte kullanan korelasyonlar da bulunmaktadır. Literatürde verilen başlıca çalışmalar Bölüm 2.3.1.1'de özetlenmiştir. Bu çalışma kapsamında da yapılan deneylerden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin kıvam limitleri ile ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının likit limit ile değişimleri sırasıyla Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir.




**Şekil 5.7 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ile likit limit ile değişimi.




**Şekil 5.8 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ile likit limit ile değişimi.

İstatistiksel çalışmada kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit değerleri arasındaki ilişki için Ms Excel 2007 ve SPSS v18 yazılımları kullanılarak yapılan analizlerde lineer regresyon başta olmak üzere logaritmik, üslü ifade, ters (inverse), quadratik (quadratic), kübik (cubic), birleşik (compound), s eğrisi (s curve), yükseliş (growth), üstel (exponential) ve lojistik (logistic) eğilim çizgileri denenmiştir. Çizelge 5.1'de bu eğilim çizgilerinin ifadeleri, likit limite bağlı olarak kalıcı kayma mukavemeti açısı denklemi ve bu denklemin belirleme katsayıları verilmiştir. Çizelge 5.1'deki denklemler halka kesme deneyinden elde edilen verilere göre oluşturulmuştur. Bu denklemlerden en yüksek belirleme katsayısını veren denklem üslü ifade kullanılarak elde edilmiş olup aşağıda verilmiştir.

$$\phi_{r\,(HK)} = 247.62\, {w_L}^{-0.755} \qquad \textbf{(5.3)}$$

Denklemin belirleme katsayısı ($R^2$) % 73 olarak belirlenmiştir. Yukarıda verilen bağıntıda $w_L$, likit limit olup % cinsinden denklemde yerine konulmalıdır.

Aynı işlem tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına uygulandığında Çizelge 5.2'de verilen eğilim çizgilerinden en yüksek belirleme katsayısına (% 78) sahip olan denklem üslü ifade kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Halka kesme deneyi ile belirlenmiş kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimini gösteren korelasyon bağıntıları ve korelasyon katsayıları.

| Eğilim çizgisi türü | Denklem tipi | Likit limite göre kalıcı mukavemeti açısı bağıntısı | Korelasyon katsayısı (R) |
|---|---|---|---|
| Lineer | $y = ax + b$ | $\phi_r = -0.045\, w_L + 14.971$ | 0.620 |
| Logaritmik | $y = a \ln x + b$ | $\phi_r = -7.111 \ln w_L + 41.442$ | 0.780 |
| Üslü ifade | $y = ax^b$ | $\phi_r = 247.62\, {w_L}^{-0.755}$ | 0.854 |
| Ters (inverse) | $y = \frac{a}{x} + b$ | $\phi_r = \frac{581.604}{w_L} + 1.781$ | 0.850 |
| Quadratik (quadratic) | $y = ax^2 + bx + c$ | $\phi_r = 0.0001{w_L}^2 - 0.216w_L + 23.702$ | 0.789 |
| Kübik (cubic) | $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ | $\phi_r = -2.867E^{-6}{w_L}^3 + 0.002w_L - 0.408w_L + 30.307$ | 0.837 |
| Birleşik (compound) | $y = ab^x$ | $\phi_r = 15.576 * 0.995^{w_L}$ | 0.754 |
| S eğrisi (s curve) | $y = e^{\left(a + \frac{b}{x}\right)}$ | $\phi_r = e^{\left(1.414 + \frac{54.583}{w_L}\right)}$ | 0.824 |
| Yükseliş (growth) | $y = e^{(a+bx)}$ | $\phi_r = e^{(2.746 - 0.005w_L)}$ | 0.754 |
| Üstel (exponential) | $y = ae^{(bx)}$ | $\phi_r = 15.576e^{(-0.005w_L)}$ | 0.754 |
| Lojistik (logistic) | $y = \left(\frac{1}{u} + ab^x\right) - 1$ | $\phi_r = \left(\frac{1}{u} + 0.064 * 1.005^{w_L}\right) - 1$ | 0.754 |

$$\phi_{r\,(TKK)} = 382.67\, {w_L}^{-0.805} \qquad \textbf{(5.4)}$$

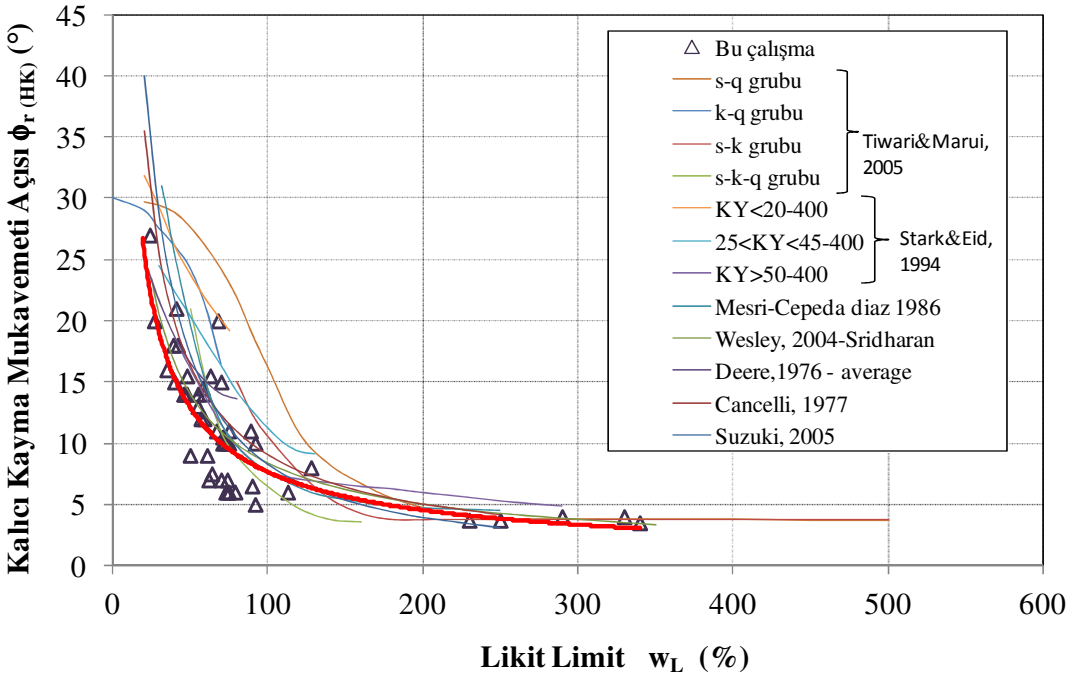
Bu denklemde de likit limit yüzde cinsinden hesaba katılmıştır.

**Çizelge 5.2 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile belirlenmiş kalıcı kayma mukavemeti açısının likit limit ile değişimini gösteren korelasyon bağıntıları ve korelasyon katsayıları.

| Eğilim çizgisi türü | Denklem tipi | Likit limite göre kalıcı mukavemet açısı bağıntısı | Korelasyon katsayısı (R) |
|---|---|---|---|
| Lineer | $y = ax + b$ | $\phi_r = -0.057\, w_L + 18.874$ | 0.689 |
| Logaritmik | $y = a \ln x + b$ | $\phi_r = -8.850 \ln w_L + 51.693$ | 0.836 |
| Üslü ifade | $y = ax^b$ | $\phi_r = 382.671\, {w_L}^{-0.805}$ | 0.886 |
| Ters (inverse) | $y = \frac{a}{x} + b$ | $\phi_r = \frac{690.229}{w_L} + 2.811$ | 0.869 |
| Quadratik (quadratic) | $y = ax^2 + bx + c$ | $\phi_r = 0.001{w_L}^2 - 0.258 w_L + 29.171$ | 0.846 |
| Kübik (cubic) | $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ | $\phi_r = -2.916E^{-6}{w_L}^3 + 0.002 w_L - 0.455 w_L + 35.987$ | 0.881 |
| Birleşik (compound) | $y = ab^x$ | $\phi_r = 20.386 * 0.994^{w_L}$ | 0.812 |
| S eğrisi (s curve) | $y = e^{\left(a + \frac{b}{x}\right)}$ | $\phi_r = e^{\left(1.613 + \frac{55.720}{w_L}\right)}$ | 0.817 |
| Yükseliş (growth) | $y = e^{(a+bx)}$ | $\phi_r = e^{(3.015 - 0.006 w_L)}$ | 0.812 |
| Üstel (exponential) | $y = ae^{(bx)}$ | $\phi_r = 20.386e^{(-0.006 w_L)}$ | 0.812 |
| Lojistik (logistic) | $y = \left(\frac{1}{u} + ab^x\right) - 1$ | $\phi_r = \left(\frac{1}{u} + 0.049 * 1.006^{w_L}\right) - 1$ | 0.812 |

Tekrarlı kesme kutusu sonuçlarında halka kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre daha yüksek bir korelasyon katsayısı ve diğer korelasyonlara daha yakın bir eğilim gözlenmiştir. Yaklaşık % 78 gibi belirleme katsayına sahip olsada özellikle % 100'den daha yüksek likit limite sahip değerler için diğer korelasyonlardan daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmektedir.

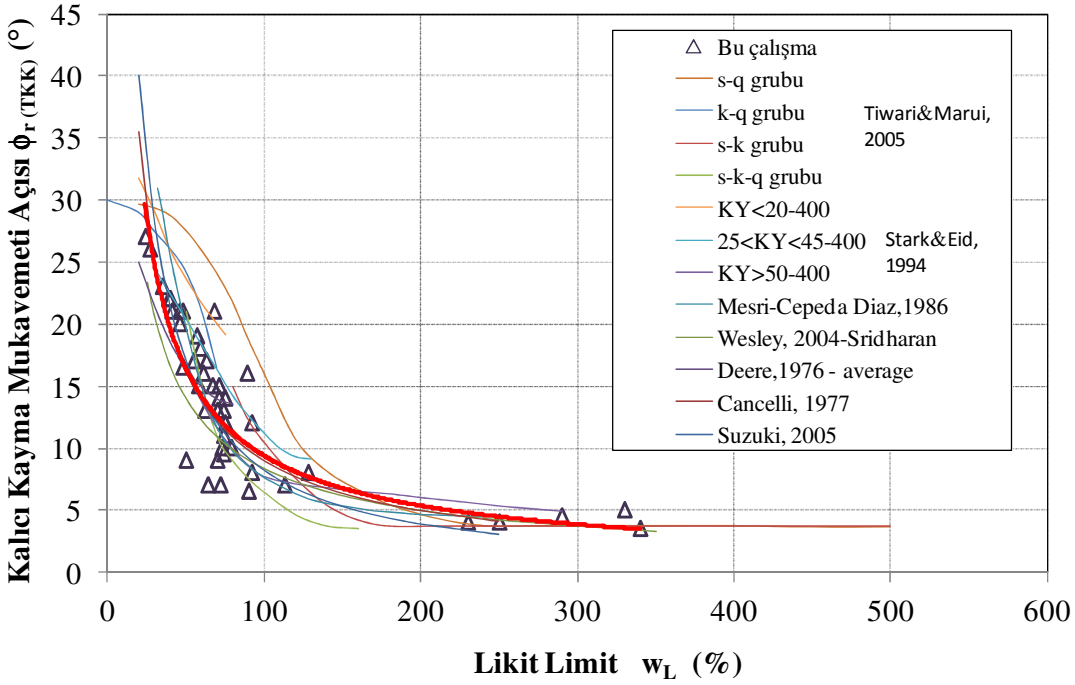
Her iki deney tipi için elde edilen en iyi eğilim çizgileri literatürde verilen çeşitli korelasyonlara Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi literatürde daha önce verilen korelasyonların bazıları ile bu çalışma kapsamında yapılan halka kesme deney sonuçlarına göre elde edilen kalıcı kayma mukavemeti – likit limit ilişkisi belli oranda birbiriyle uyumlu sonuçlar vermektedir. Şekilde Tiwari ve Marui (2005)'ten verilerde görülen s kısaltması smektit yani bentoniti, k kısaltması kaolin kilini ve q kısaltması ise kuvars kumunu göstermektedir. Diğer korelasyonlarla uyum irdelendiğinde daha çok yapraksı kil mineralleri kullanılarak geliştirilmiş korelasyonlarla bu çalışma sonuçları daha uyumlu sonuçlar vermektedir. İçeriğinde farklı şekle sahip kil mineralleri veya kum içeriği bulunan numuneler kullanılarak elde edilen korelasyonlarla özellikle likit limitin % 150'den küçük değerlerinde bir farklılık göze çarpmaktadır. Bu çalışmada erişilen değerler ve korelasyon genel olarak sözü edilen korelasyonlara göre daha düşük kalıcı kayma mukavemeti açıları vermektedir.




**Şekil 5.9 :** Halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı-likit limit ilişkisinin diğer korelasyonlarla karşılaştırılması.

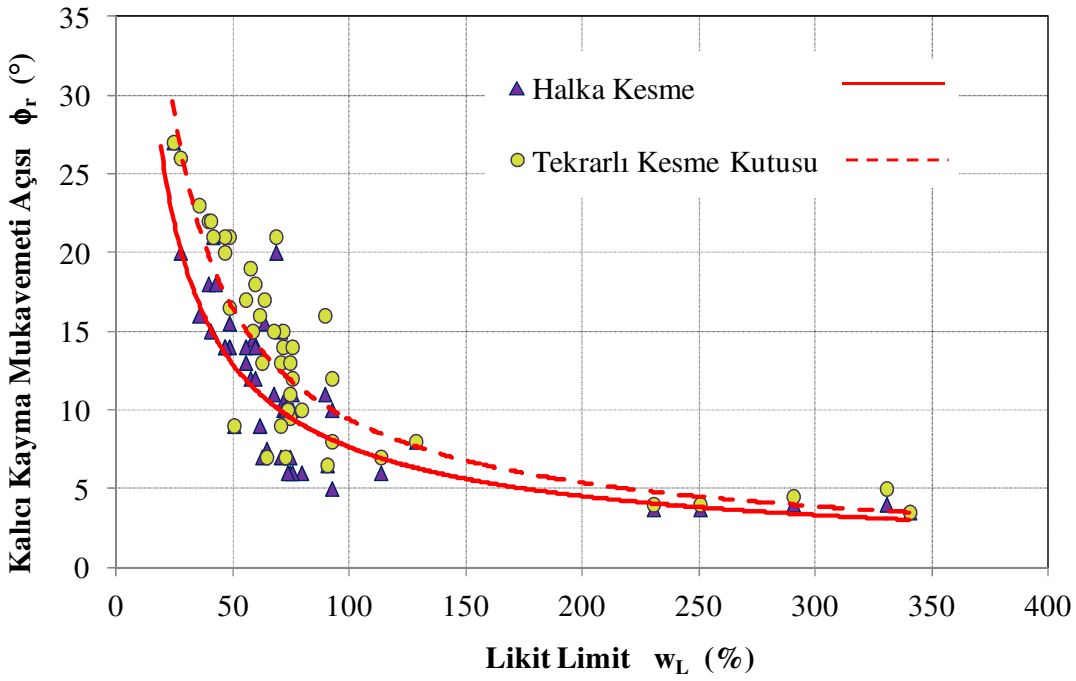
Şekil 5.10'da ise tekrarlı kesme kutusu deneyi kullanılarak elde dilen kalıcı kayma mukavemeti açıları - likit limit ilişkisi diğer korelasyonlarla karşılaştırılmaktadır. Halka kesme deneyindeki davranışa benzer bir durum gözlenmekle beraber tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarının diğer koresyonlarla uyumun daha iyi olduğu

söylenebilir. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilen Tiwari ve Marui, 2005 tarafından verilen korelasyonlarda s harfi smektit, k harfi kaolinve q harfi ise kuvartz malzemelerini göstermektedir. Aynı şekillerde Stark ve Eid, 1994 tarafından verilen korelasyonlar ise kil yüzdelerine göre değişmektedir. Stark ve Eid, 1994 tarafından verilen çalışmada farklı düşey gerilme seviyeleri için farklı korelasyonlar verilmekle birlikte burada grafikte karışıklığı önlemek amacıyla sadece 400 kPa düşey gerilme değeri için verilen korelasyonlar sunulmuştur. Korelasyonlarala ilgili daha detaylı bilgi Bölüm 2'de verilmiştir. Buna ek olarak yapraksı kil mineralleri haricindeki kil mineralleri kullananılan koresyonlarla ayrışma aynı şekilde gözlenmektedir.




**Şekil 5.10 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı-likit limit ilişkisinin diğer korelasyonlarla karşılaştırılması.

Likit limite bağlı olarak halka kesme deneyi ile tekrarlı kesme kutusu deneylerinin sonuçları karşılaştırıldığında ise Şekil 5.11'de verilen grafik ortaya çıkmaktadır. Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ile halka kesme deneyinden elde edilen mukavemet açıları karşılaştırıldığında daha yüksek değerlerin elde edildiği Bölüm 5.1'de irdenmişti. Bu şekilde de sözü edilen durum net bir şekilde gözlenebilmektedir. Şekilde kesikli çizgi ile gösterilen eğilim çizgisi tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilmiş değere ait, düz çizgi ile gösterilen eğilim çizgisi ise halka kesme kutusu deneyine ait verilerle elde edilmiştir.



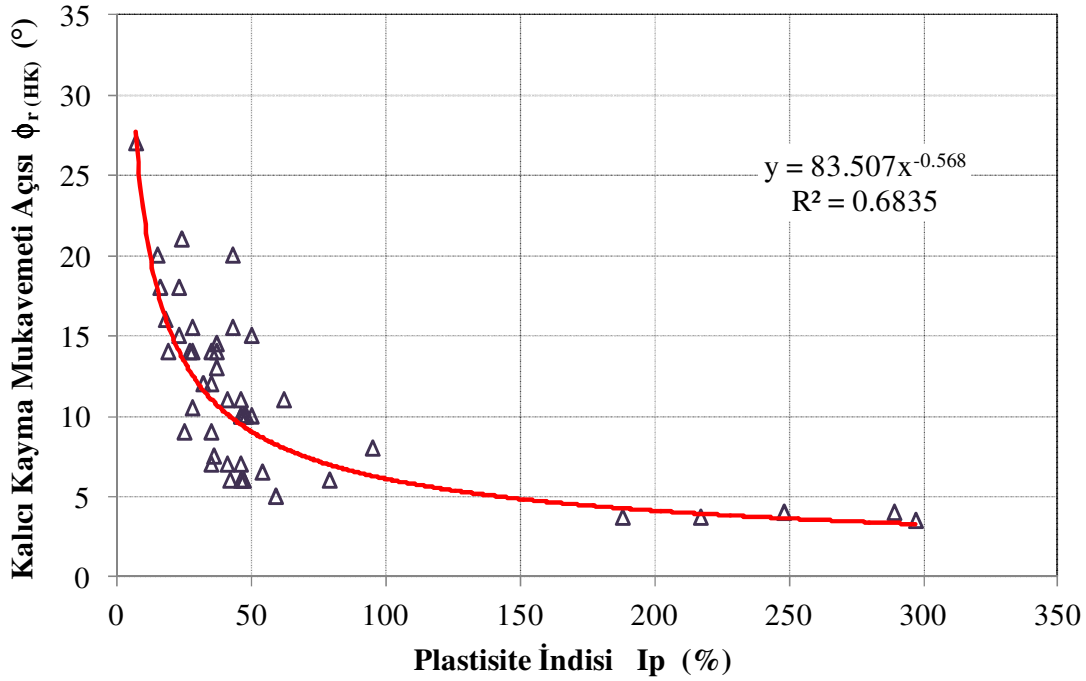

**Şekil 5.11 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması.

Likit limitin artmasıyla birlikte özellikle yaklaşık % 120 likit limit değerinin üzerinde iki deney sonucu arasındaki farkın gittikçe kapandığı gözlenmektedir. Bu noktada halka kesme deneyi sonuçlarına göre bulunan korelasyon denklemi tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre bulunan korelasyon denklemine oranlandığı takdirde

$$\frac{\phi_{r\,(HK)}}{\phi_{r\,(TKK)}} = 0.647\ {w_L}^{0.05} \qquad \textbf{(5.5)}$$

ilişkisi ortaya çıkmaktadır.

Literatürde kalıcı kayma mukavemeti ile ilişkisi incelenen kıvam limitleri değerlerinden birisi de plastisite indisidir. Hatta plastisite indisinin kalıcı kayma mukavemetinin tahmin edilmesinde likit limite göre daha iyi sonuçlar verdiği çeşitli yayınlarda iddaa edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları da plastisite indisi ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla halka kesme kutusu deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarının plastisite indisi ile değişimleri sırasıyla Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te verilmiştir.




**Şekil 5.12 :** Halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastisite indisi ile değişimi.

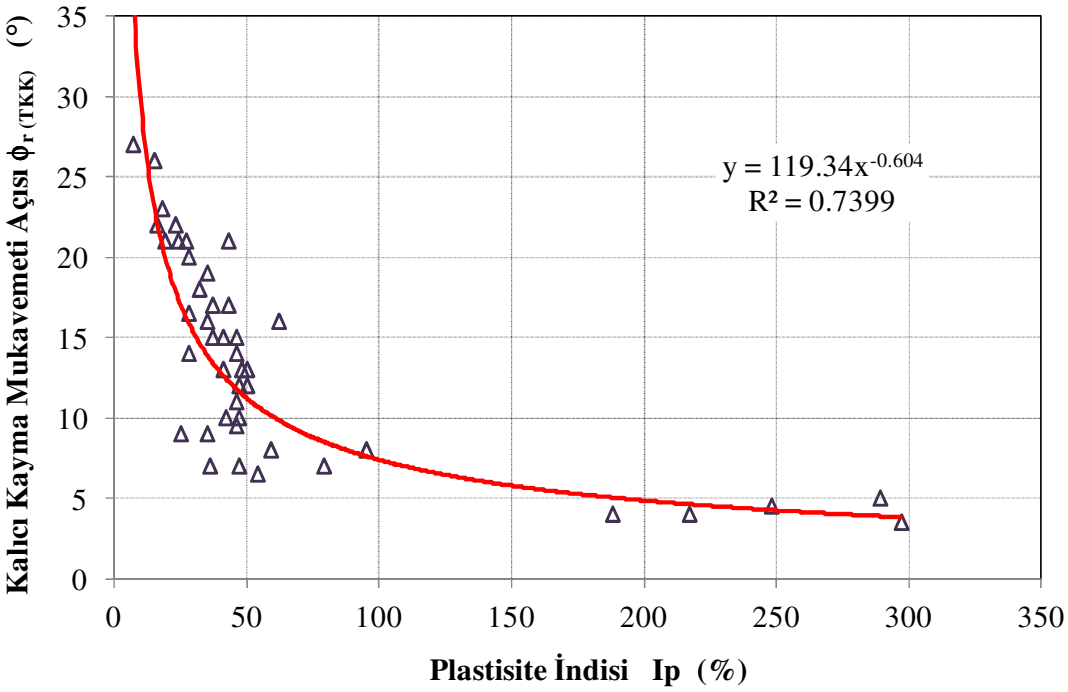
Likit limit ilişkisinde yapılan istatistiki çalışma plastisite indisi içinde yapılmış ve çeşitli eğilim çizgileri denenmiştir. Şekillerde ise bu analizlerde en iyi belirleme katsayısını veren üslü eğilim çizgisi gösterilmektedir.

Halka kesme deneyi sonuçlarına göre elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı bağıntısı ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre elde edilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı bağıntısı sırasıyla aşağıda verilmiştir.

$$\phi_{r(HK)} = 83.507\, I_p{}^{-0.568} \qquad \textbf{(5.6)}$$

$$\phi_{r(TKK)} = 119.34\, I_p{}^{-0.604} \qquad \textbf{(5.7)}$$

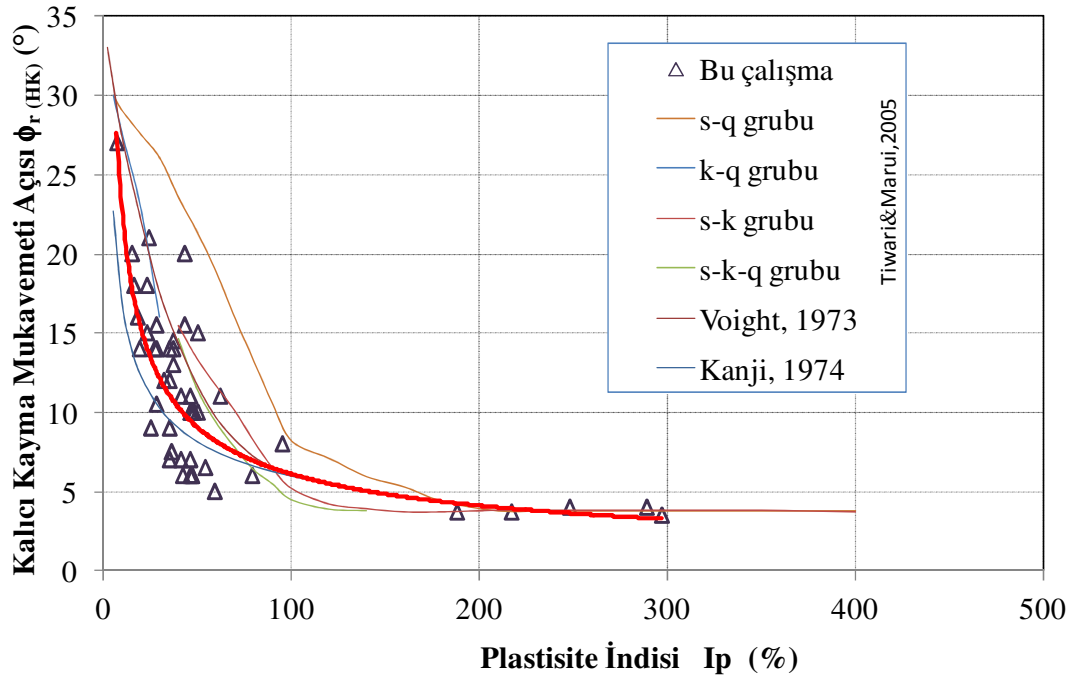
Halka kesme deney sonuçlarındaki belirleme katsayısı % 68 gibi bir değer alırken, tekrarlı kesme kutusu plastisite indisi ilişkisinde yaklaşık %74 olarak belirlenmiştir. Her iki deney sonucunda elde edilen eğriler literatürde verilen başlıca korelasyonlarla karşılaştırılmıştır.



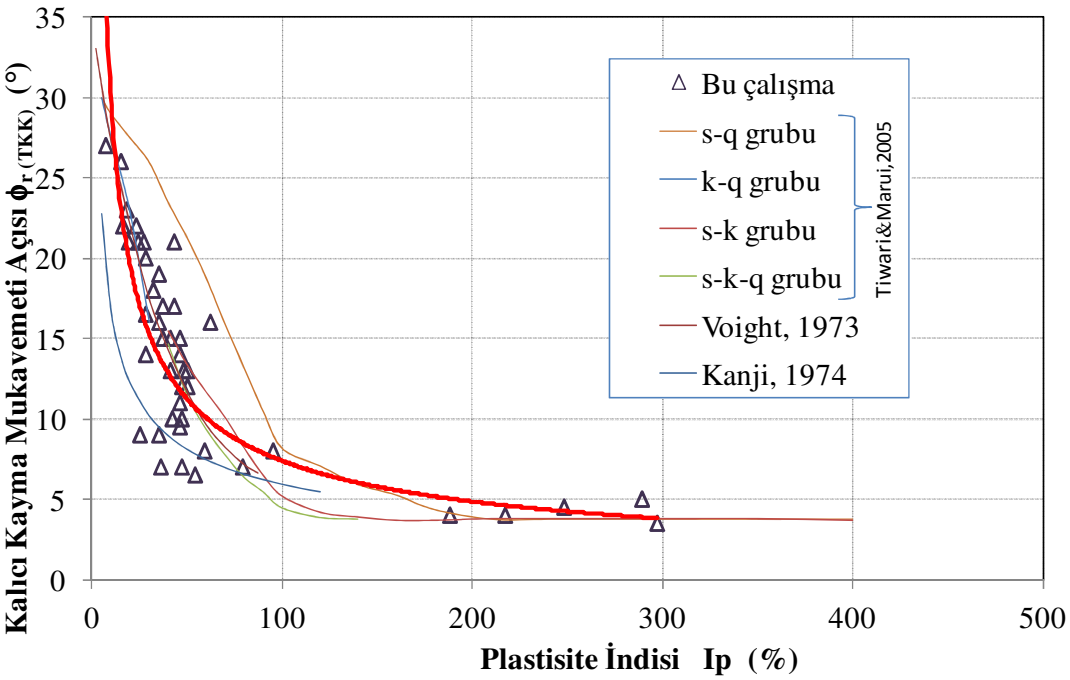

**Şekil 5.13 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastisite indisi ilişkisi.

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te sırasıyla halka kesme kutusu deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastisite indisi ile ilişkileri önceki korelasyonlarla birlikte verilmektedir.

Likit limit ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiye benzer olarak plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısının önceki çalışmalarla karşılaştırmasında da literatürde daha önce verilmiş olana başlıca korelasyonlarla bir uyum gözlenmektedir. Mineralojik farklılıklar burada da etkisini göstermektedir. Yassı kil minerallerine sahip olmayan zemin türleri diğer korelasyonlara uymayan sonuçlar vermektedir. Şekil 5.14'te Tiwari ve Marui (2005)'te verilmiş olan s-q grubu olarak tanımlanmış smektit(bentonit)- quartz karışımları ile elde edilmiş olan kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisi ilişkisi çok açık bir biçimde farklılık göstermekte ve quartz mineralleri plastisite indisinin % 100 değerine kadar baskın bir karakter olurken % 100 değerinden itibaren ise smektit mineralleri baskın hale gelmektedir. Burada dikkati çeken bir nokta ise kaolin quartz karışımının smektit quartz karışımından aynı plastisite indisi değerine göre daha düşük kalıcı kayma mukavemeti açısı vermesidir.




**Şekil 5.14 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisi ilişkisinin önceki korelasyonlarla karşılaştırması.

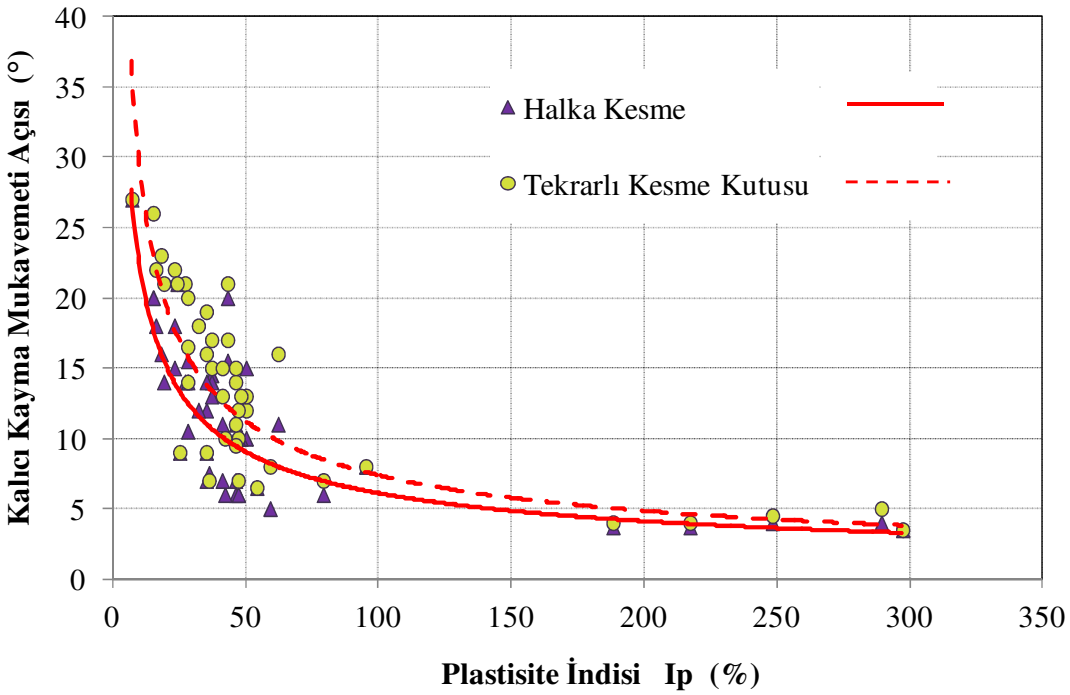



**Şekil 5.15 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı plastisite indisi ilişkisinin önceki korelasyonlarla karşılaştırılması.

Bunun sebebi olarak aynı plastisite indisini elde edebilmek için karışımdaki kil yüzdesinin miktarı görülmektedir. Doğal olarak düşük kıvam limitlerine sahip olan kaolin mineralleri daha yüksek oranda karışıma girdiği takdirde aynı etkiyi

göstermektedir. Bu durumda ise kil yüzdesi ve ince dane oranı artmakta dolayısı ile kalıcı kayma mukavemeti açısı düşmektedir.

Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları da aynı şekilde literatürde verilen önceki korelasyonlarla uyumlu sonuçlar vermiştir (Şekil 5.14). Halka kesme deneyine göre daha yüksek mukavemet açıları elde edilen tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları göz önüne alındığında literatürde verilen korelasyonlara daha uyumlu bir durum gözlenirken Kanji (1974) tarafından verilen korelasyonla net bir fark göze çarpmaktadır. Kanji (1974)'de verilen plastisite indisi kalıcı kayma mukavemeti açısı ilşikisi halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen korelasyonla önemli derecede benzerlik göstermektedir.



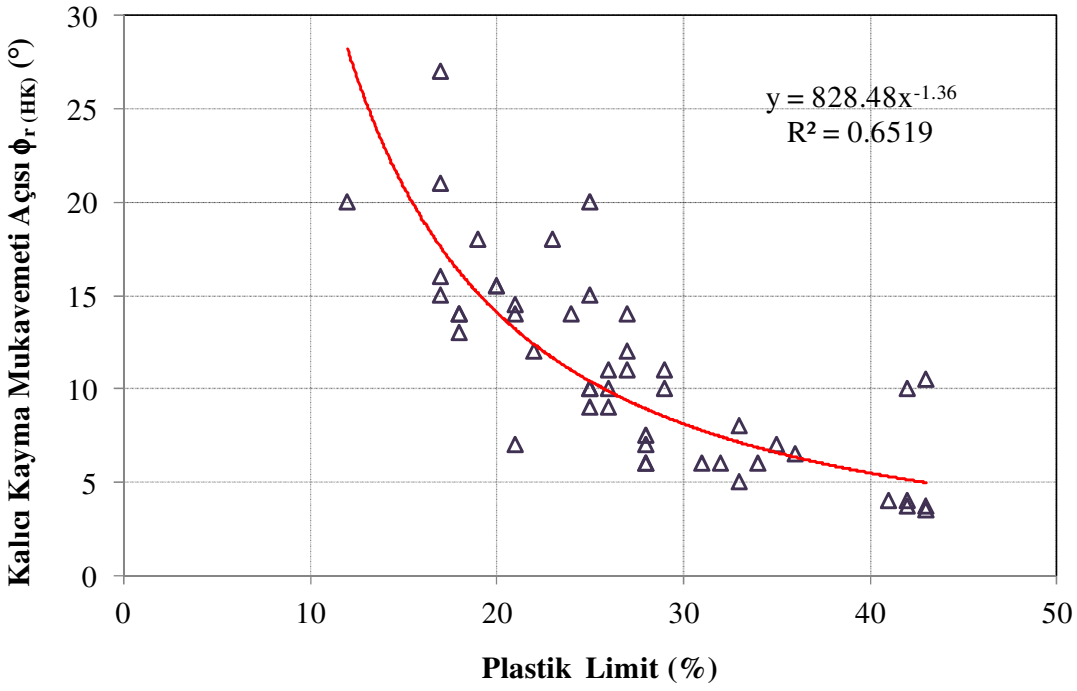

**Şekil 5.16 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi ile halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması.

Bunlara ek olarak tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ile halka kesme deneyi sonuçlarının plastisite indisi bazında birlikte değerlendirildiğinde likit limit bazındaki değerlendirmeye benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.16'da verildiği üzere kesikli çizgi ile gösterilen tekrarlı kesme kutusu sonuçlarına göre elde edilen eğilim çizgisi halka deneyinden elde edilene göre daha yüksek değerler vermektedir. Halka kesme deneyi sonuçlarına göre bulunan korelasyon denklemi tekrarlı kesme kutusu deneyi

sonuçlarına göre bulunan korelasyon denklemine oranlandığı takdirde plastisite indisne bağlı olarak aşağıdaki ifadeye ulaşılmaktadır.

$$\frac{\phi_{r\,(HK)}}{\phi_{r\,(TKK)}} = 0.7\ I_p{}^{0.036} \qquad \textbf{(5.8)}$$

Kıvam limitleri açısından son olarak işlenecek durum ise plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasındaki ilişkidir. Literatürde plastik limitle kalıcı kayma mukavemet arasında doğrudan bir ilişki üzerine çalışmaya rastlanılmamıştır.. Genellikle birden fazla zemin parametresinin birlikte kullanıldığı çalışmalarda plastik limit devreye girmektedir. Plastik limitin alabildiği değer aralığı dar ve killi zeminler ile siltli zeminlerin plastik limit bazında ayrımının zorluğu bu durum için neden olarak gösterilebilir. Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi farklı deneyler için Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de verilmiştir.




**Şekil 5.17 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit ilişkisi.

Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile plastik limit arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek amacıyla yapılan istatistik analizlerde en iyi belirleme katsayısına sahip bağıntılar birleşik (compound) ve üstel

(expotential) ifadeler olarak belirlenmiştir. Her iki korelasyonun belirleme katsayısı 0.655 olarak belirlenmiştir.

Bu denklemler sırasıyla,

$$\phi_{r(HK)} = 38.64 * 0.951^{w_p} \quad \textbf{(5.9)}$$

$$\phi_{r(HK)} = 38.64 * e^{(-0.05*w_p)} \quad \textbf{(5.10)}$$

olarak elde edilmiştir.

Aynı verilere üslü ifade uygulandığı takdirde yukarıdaki denklemlere göre belirleme katsayısında çok düşük bir farka sahip bir denklem elde edilmektedir.

$$\phi_{r\,(HK)} = 824.68\, {w_p}^{-1.358} \quad \textbf{(5.11)}$$

şeklinde ifade edilen denklemin belirleme katsayısı ise % 65.2'dir. Diğer bağıntılara göre belirleme katsayısı çok az bir farkla daha düşük çıkmaktadır. Ancak kullanım kolaylığı anlamında diğer bağıntılara göre daha üstün olması nedeniyle üslü ifade plastik limit ile kalıcı kayma mukavmeti açısı bağıntısında öne çıkmaktadır.

Aynı analizler kullanılarak tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları için en iyi uyumu veren belirleme katsayısına sahip üstel fonksiyonu elde edilmiştir (Şekil 5.18). Bu bağıntının belirleme katsayısı da halka kesme kutusu deneyi sonuçlarından elde edilen belirleme ktsayısına çok yakın olarak 0.665 olarak belirlenmiştir.

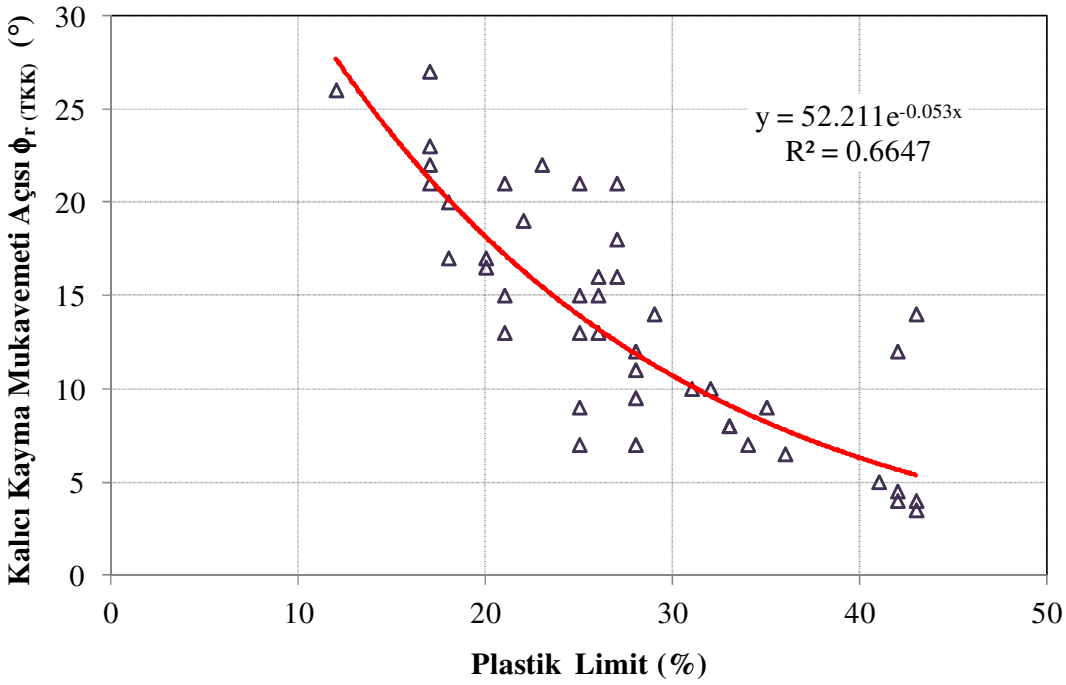
Bu üstel fonfsiyon plastik limite bağlı olarak,

$$\phi_{r(TKK)} = 52.211 * e^{(-0.053*w_p)} \quad \textbf{(5.12)}$$

olarak belirlenmiştir. Aynı verilere üslü ifade kullanılarak

$$\phi_{r(TKK)} = 1246.7\, {w_p}^{-1.415} \quad \textbf{(5.13)}$$

şeklinde bir denklem elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı da % 65'tir. Sözü edilen bağıntılarda plastik limit % cinsinden denklemlere girmektedir.




**Şekil 5.18 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi.

Ancak Şekil 5.19'da görüldüğü gibi, daire içine alınmış 5 adet numuneye analiz dışında tutulduğunda korelasyon katsayısı oldukça yükselmiş ve yapılan analiz sonucunda $R^2$=0.88 olan bir bağıntı elde edilmiştir. Aykırı noktalar olarak kabul edilen ve çoğunluğu silt sınıfı zeminler olan H7, H8, H9, H19 ve H22 nolu numuneler analiz dışında bırakıldığı takdirde oldukça etkili bir oranda uyumluluk göze çarpmaktadır.

Ayrık verilerin analiz dışında tutulması sonrasında üstel fonksiyon plastik limite bağlı olarak,

$$\phi_{r(HK)} = 47.013 * e^{(-0.059*w_p)} \quad \textbf{(5.14)}$$

olarak belirlenmiştir. Aynı verilere üslü ifade kullanılarak

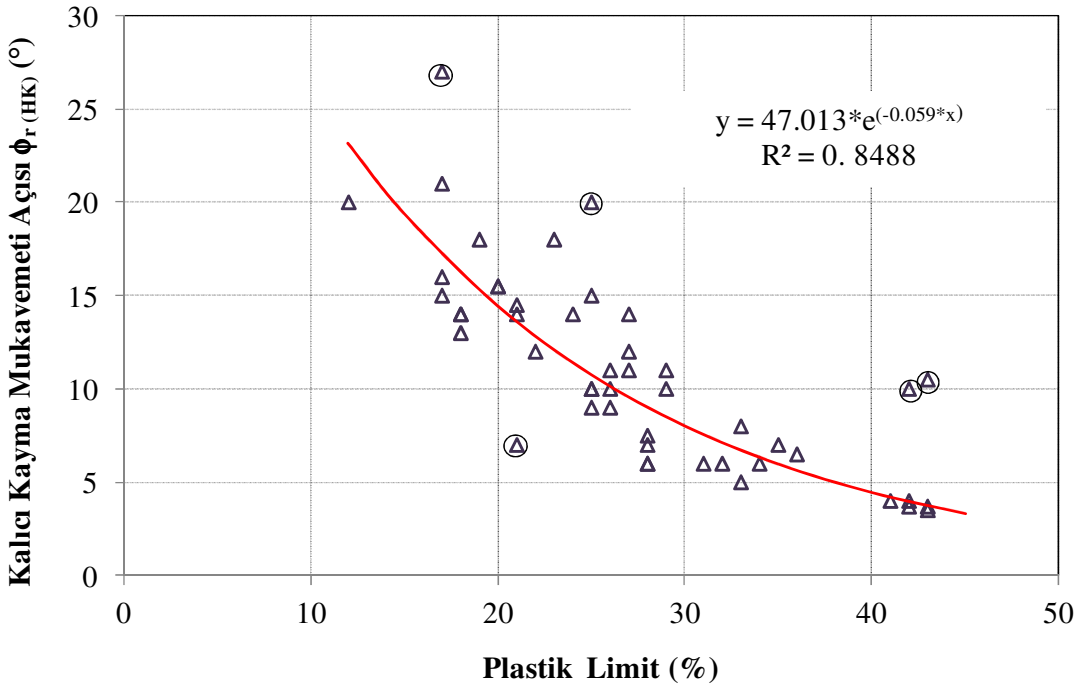
$$\phi_{r(HK)} = 1399.2\, {w_p}^{-1.534} \quad \textbf{(5.15)}$$

şeklinde bir denklem elde edilmiştir. Bu bağıntının belirleme katsayısı da $R^2$=% 80 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi için halka kesme deneyi sonuçlarına dayanarak kullanım kolaylığını da göz önünde bulundurarak

$$\phi_{r(HK)} = \frac{1400}{{w_p}^{1.5}} \qquad \textbf{(5.16)}$$

şeklinde bir bağıntı kullanılabilir. Yüksek bir korelasyon katsayısına (R≅%90) sahip bu denklemin aynı zamanda akılda kalıcı bir formda olması da bir üstünlük olarak görülmektedir.




**Şekil 5.19 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile plastik limit ilişkisi.

Kıvam limitlerine bağlı olarak bu çalışma kapsamında verilen bütün korelasyonlar Çizelge 5.3'te özetlenmiştir. Her bir korelasyona ait belirleme katsayıları da aynı çizelgede verilmiştir.

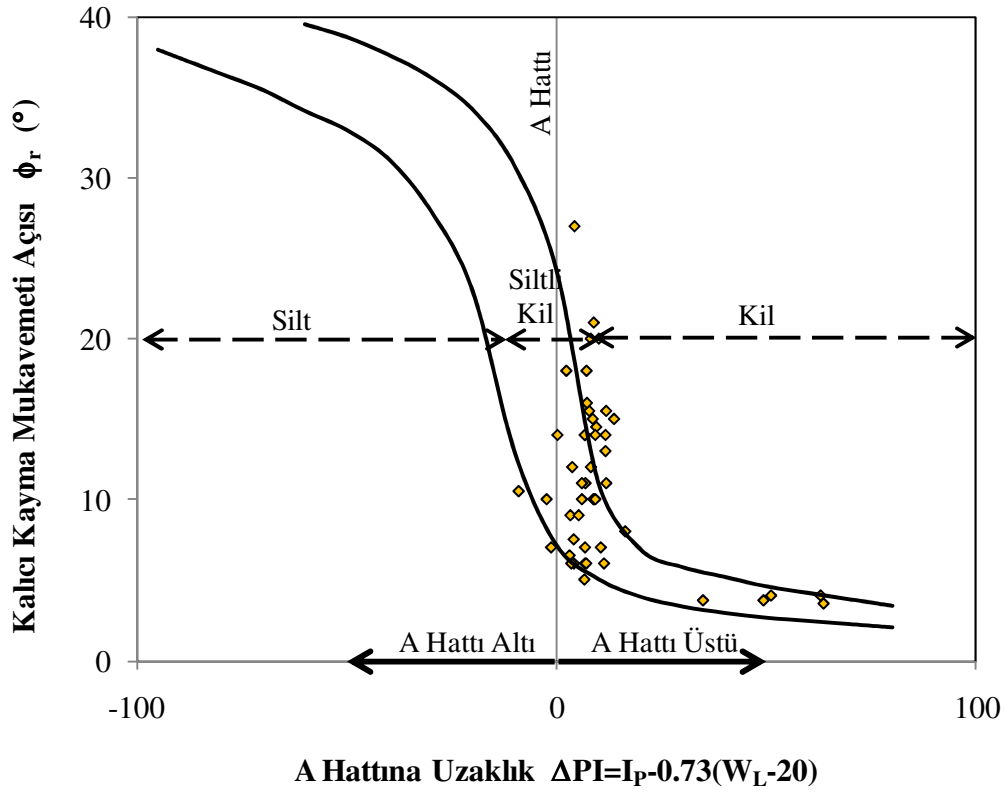
Wesley, 2003 tarafından savunulan kıvam limitleri kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarına uyarlandığı takdirde Şekil 5.20'de verilen grafik elde edilmiştir. Şekil 5.20'de görüldüğü üzere kullanılan numuneler üzerinde yapılan halka kesme deney sonuçları Wesley (2003) tarafından verilen bağıntıya kısmen uymaktadır.

**Çizelge 5.3 :** Kıvam limitleri ile kalıcı kayma mukavemeti açısı arasında önerilen korelasyonlar.

| Kıvam Limiti | Deney türü | Bağıntı | Korelasyon katsayısı (R) |
|---|---|---|---|
| Likit Limit | H.K. | $\phi_r = 247.62\ {w_L}^{-0.755}$ | 0.85 |
| | T.K.K | $\phi_r = 382.67\ {w_L}^{-0.805}$ | 0.88 |
| Plastisite İndisi | H.K. | $\phi_r = 83.507\ {I_p}^{-0.568}$ | 0.82 |
| | T.K.K | $\phi_r = 119.34\ {I_p}^{-0.604}$ | 0.86 |
| Plastik Limit | H.K. | $\phi_r = 824.68\ {w_p}^{-1.358}$ | 0.81 |
| | T.K.K | $\phi_r = 1246.7\ {w_p}^{-1.415}$ | 0.81 |
| Plastik Limit * | H.K | $\phi_r = 1399.2\ {w_p}^{-1.534}$ | 0.89 |

*:Çoğunluğu siltli zeminler olan 5 adet numune analiz dışında bırakıldığı takdirde elde edilen bağıntı.

Burada dikkati çeken nokta kalıcı kayma mukavemeti açısının yaklaşık olarak 14°'den daha düşük değerlere sahip noktaların büyük oranda ilgili yayında verilen banta uyumlu olması, 14°'den büyük kalıcı kayma mukavemeti açısına sahip numunelerde ise uyumsuzluk görülmesidir. Buna ek olarak Wesley (2004)'te Sridharan ve Rao tarafından Wesley (2003) adlı çalışmaya yapılan eleştiriler bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla da örtüşmektedir. Özellikle A hattına uzaklık olarak tarif edilen ΔPI parametresinin 0 ile +15 değer aralığındaki saçılım ve bu aralıkta kalıcı kayma mukavemeti açısı değişim aralığının genişliği bu korelasyonun kullanımı için dezavantaj olarak göze çarpmaktadır

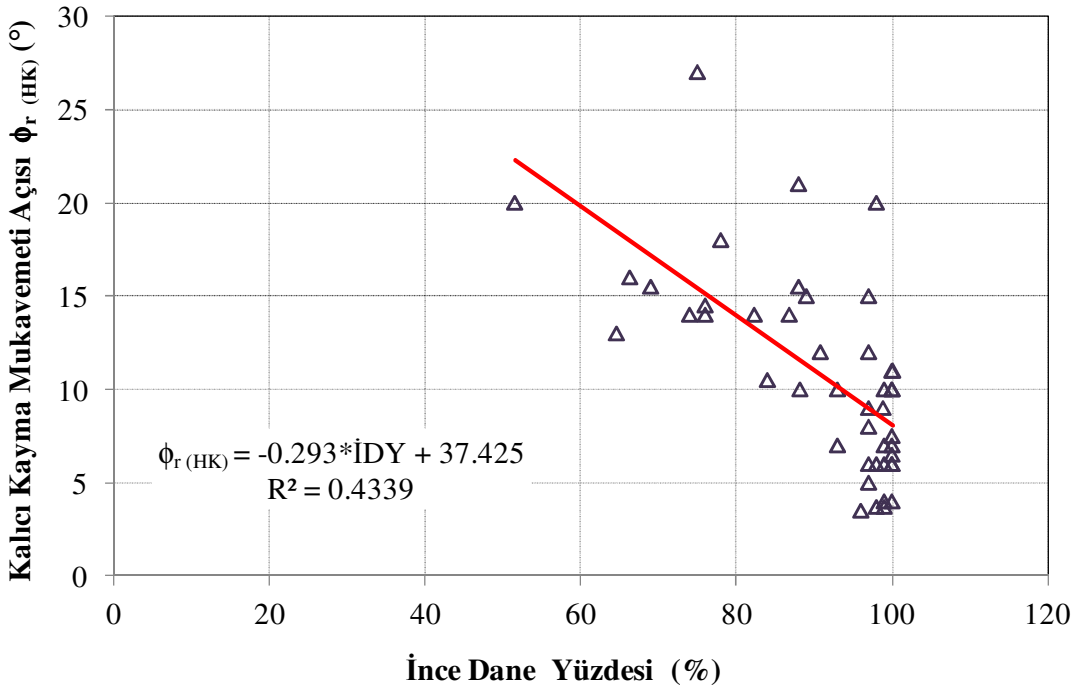



**Şekil 5.20 :** Kalıcı kayma mukavemeti açısı A hattına uzaklık ilişkisi (Wesley, 2003'ten uyarlanmıştır).

## 5.4 İnce Dane Oranı, Kil Yüzdesi ve Aktivitenin Etkisi

Önceki çalışmalarda kalıcı kayma mukavemeti ile ince dane oranı, kil yüzdesi, aktivite gibi zemin özellikleri arasında da bağıntılara rastlanmaktadır. Bu kapsamda en çok kil yüzdesinin kalıcı kayma mukavemet etksi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bilindiği gibi kalıcı kayma mukavemetinin önem kazandığı zeminler çoğunlukla kil içeriği yüksek ince daneli zeminlerdir. Bu nedenle salt ince dane oranının kalıcı kayma mukavemeti ile ilişkilendirilmesi zor olmaktadır. Bu duruma sebep olarak kil içeriğinin minerolojik farklılığı gösterilmektedir. Aynı sorun kil yüzdesi için de geçerli olmakla birlikte aynı derecede etki yapmamaktadır. Literatürde verilmiş olan aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkileri incelendiğinde dikkate değer bağıntının olmadığı gözlenmektedir. Bunun bir sebebinin aktivitenin tanımından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi aktivite tanım olarak plastiste indisinin kil yüzdesine oranı şeklinde verilmektedir. Kil yüzdesi ise hidrometre deneyinden bulunan 0.002 mm'den küçük dane çaplı malzemelerdir. Ancak bu hesaba aynı zamanda kil minerali içermeyen kil boyutlu malzemelerde girmektedir.

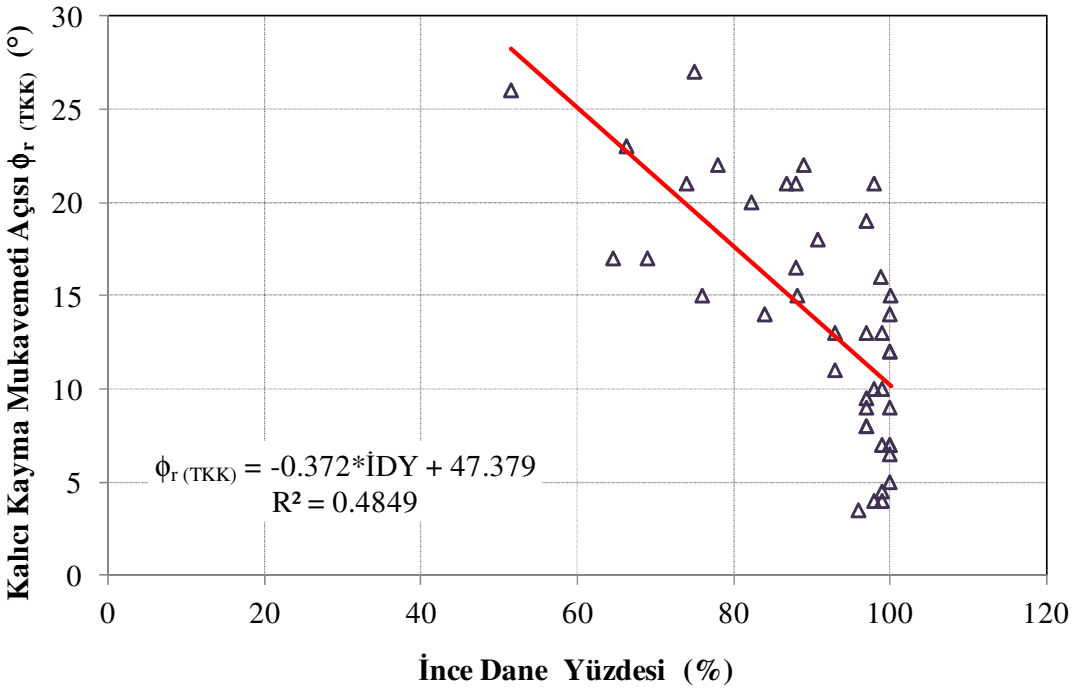
Ayrıca minerolojik açıdan farklı kil mineralleri de hesaba alınmalıdır. Bu nedenle aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler genellikle saçılımı fazla ve çok anlamlı olmayan sonuçlar vermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda ince dane oranı kalıcı kayma mukavemeti dağılımı Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de verilmiştir. Şekil 5.21'de halka kesme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar, Şekil 5.22'de ise tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen deney sonuçları görülmektedir.




**Şekil 5.21 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ince dane yüzdesi ile değişimi.

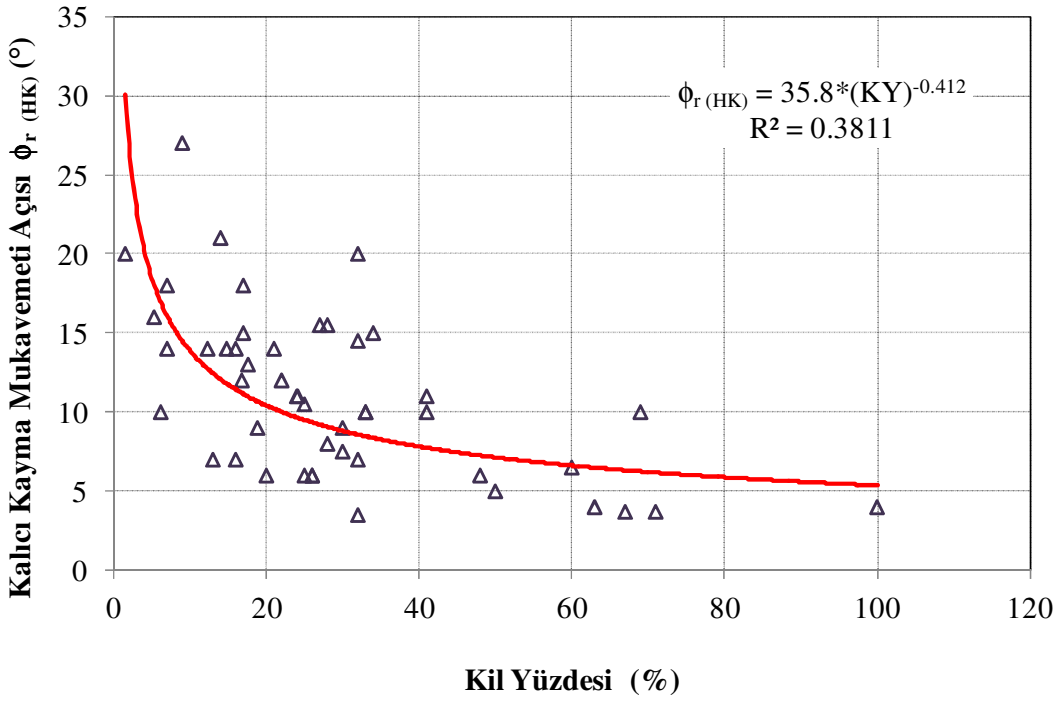
Her iki deney tipi için Ms Excel 2007 ve SPSS v18 yazılımları kullanılarak yapılan istatistiksel analizlerde çeşitli eğilim çizgileri denenmiştir. Bu analizler sonucunda noktaların geniş bir alanda saçılmış olması sebebiyle lineer regresyon en iyi sonucu vermiştir.

Halka kesme deney sonuçlarından elde edilen denkleme göre % 43, tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarından elde edilen denklemde ise % 49 civarında belirleme katsayına sahip lineer eğilim çizgileri elde edilmiştir. Bu değerler her ne kadar çok anlamlı değerler olmasa da genel bir kanaat olarak ince dane oranının artması ile kalıcı mukavemetin düştüğü net bir şekilde görülmektedir.

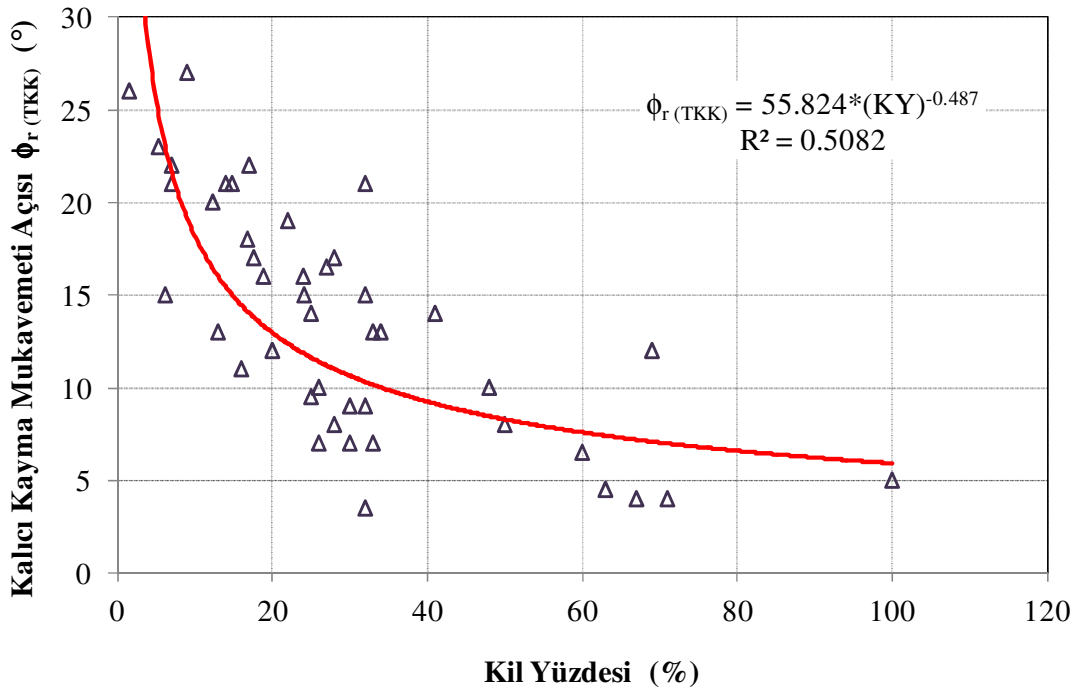



**Şekil 5.22 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının ince dane yüzdesi ile değişimi.

İnce dane oranından farklı olarak kil yüzdesi literatürde kalıcı kayma mukavemetinin ampirik olarak belirlenmesinde kullanılan zemin özelliklerinden birisidir. Daha önce de ifade edildiği gibi kil yüzdesinin kullanımını sınırlayan en önemli unsur numune içeriğindeki kil minerolojisinin etkisinin hesaba katılmamasıdır. İnce dane oranına göre daha iyi bir ilişki olsa da kalıcı kayma mukavemetinin minerolojiden önemli derecede etkilenmesi nedeni ile kil yüzdesi ile kalıcı mukavemet dağılımında saçılım göze çarpmaktadır. Şekil 5.23'te halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı değerlerinin kil yüzdesine göre dağılımı verilmiştir. Yapılan regresyon analizlerinde en iyi belirleme katsayısının her ne kadar % 42 gibi düşük bir değer olsa da üstel fonksiyonda elde edildiği görülmüştür. Ancak kullanım kolaylığı açısından yakın korelasyon katsayısına sahip üslü ifade tercih edilirse %38 gibi bir belirleme katsayısı elde edilmiştir. Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları ile kil yüzdesi arasındaki dağılıma bakıldığında halka kesme deneyine göre daha iyi bir saçılımla karşılaşılmaktadır (Şekil5.24). Bu durumda en iyi belirleme katsayısı logaritmik denklemle olmak üzere % 58 olarak belirlenmiştir. Ancak korelasyon katsayısı anlamında düşük bir fark bulunan ve belirleme katsayısı $R^2$= %51 olan üslü ifade Şekil 5.24'te sunulmuştur.



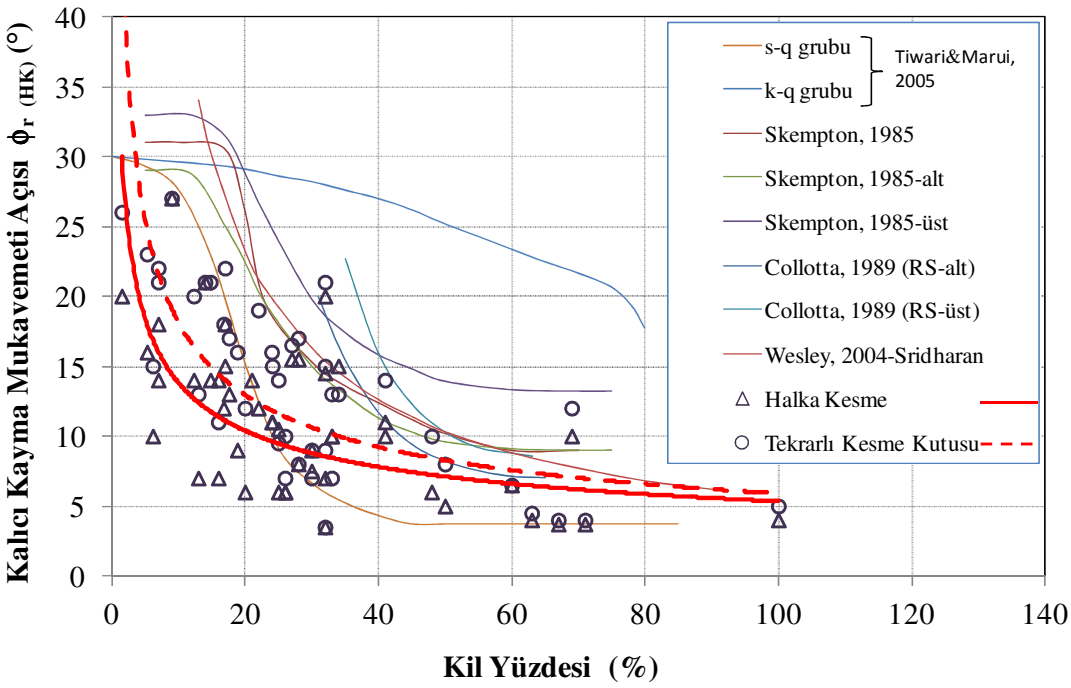

**Şekil 5.23 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi.




**Şekil 5.24 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının kil yüzdesi ile değişimi.

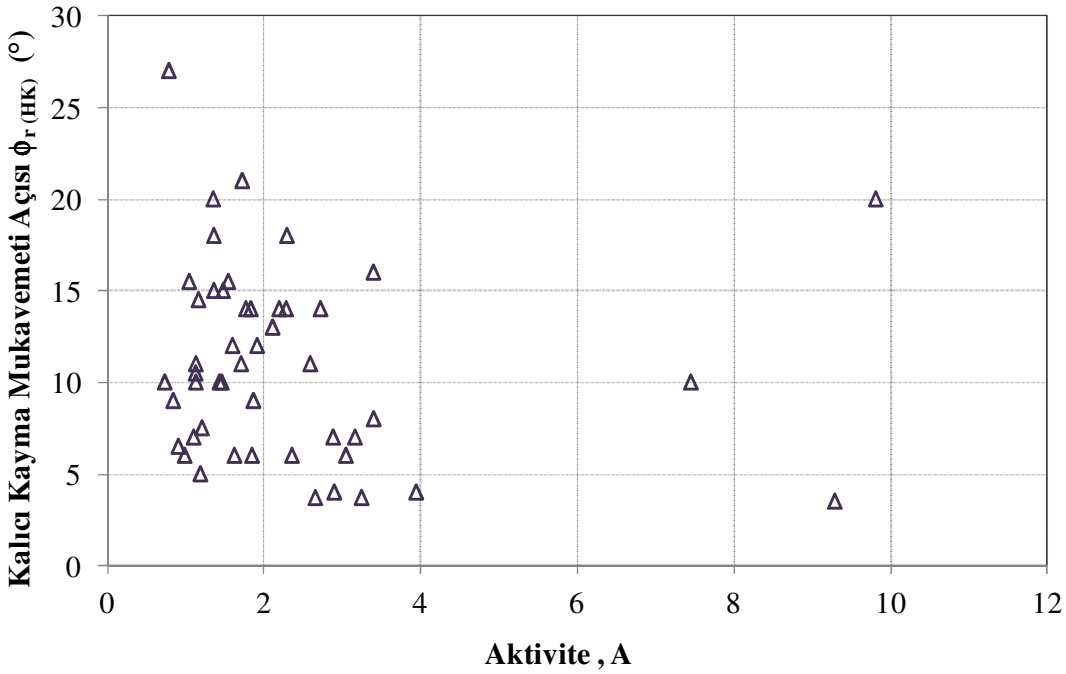
Yapılan analizlerde kil yüzdesi yüzdelik olarak kullanılmıştır. Literatürde verilen kil yüzdesi kalıcı kayma mukavemeti ilişkileri incelendiğinde birbirine göre çok farklı formlarda ve geniş bir saçılım gözlenmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan

deney sonuçları literatürde verilen korelasyonlarla karşılaştırıldığında Şekil 5.24'te verilen durum elde edilmiştir. Şekil 5.24'te de görüldüğü gibi literatürde verilen önceki korelasyonlarda geniş bir saçılım göstermektedir. Genel bir trend olarak kil yüzdesinin artması ile birlikte kalıcı kayma mukavemetinin düştüğü söylenebilirse de minerolojik farklılıklar nedeni ile net bir ifadeye ulaşmak çok mümkün gözükmemektedir. Şekilde kesikli çizgi ile gösterilen eğri tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen, düz çizgi ile gösterilen eğri ise halka kesme deneyi sonucunda elde edilen eğilim çizgilerini göstermektedir.



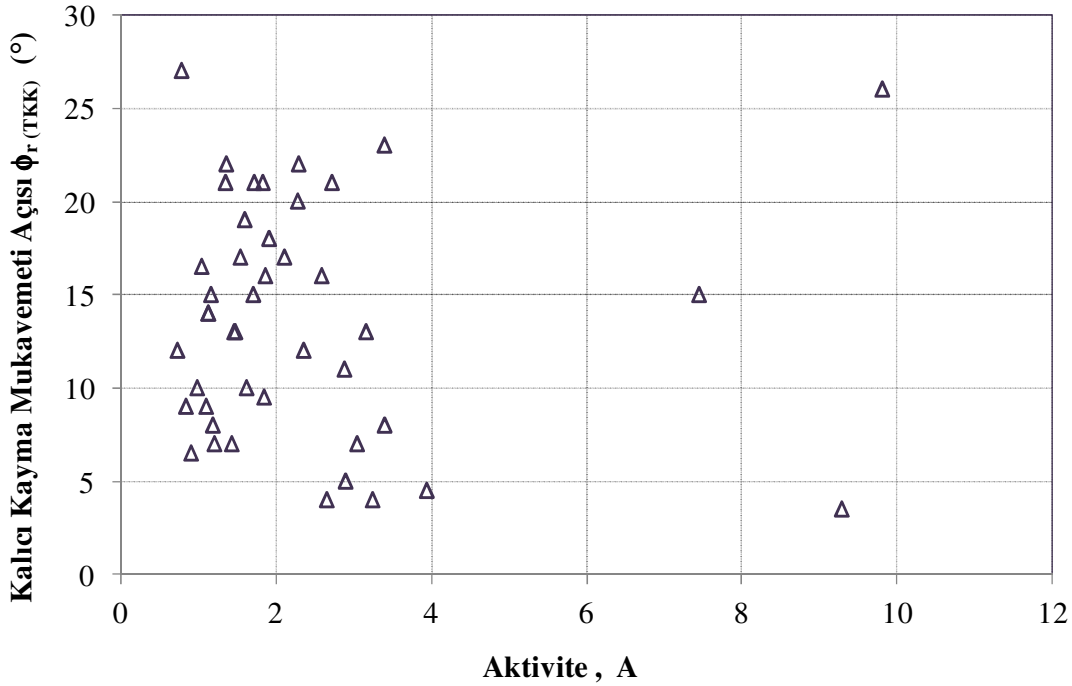

**Şekil 5.25 :** Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı kil yüzdesi ilişkisinin önceki korelasyonlarla karşılaştırılması.

Tanımından ötürü kil içeriğinin minerolojisi hakkında fikir verebilecek dolayısı ile kalıcı kayma mukavemetinin ilişkilendirilebileceği düşünülen aktivitenin kalıcı mukavemet ile doğrudan anlamlı ilişkisi literatürde verilmemiştir. Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi bu durumun kil yüzdesinin belirleme yönteminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerin sonucunda numunelerin aktivite değerleri ile kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında da anlamlı bir ilişki elde edilememiştir. Aktivite ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkileri halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyleri için sırasıyla Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de verilmiştir.




**Şekil 5.26 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ile değişimi.

Şekil 5.26'da halka kesme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar, Şekil 5.27'de ise tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen deney sonuçları görülmektedir

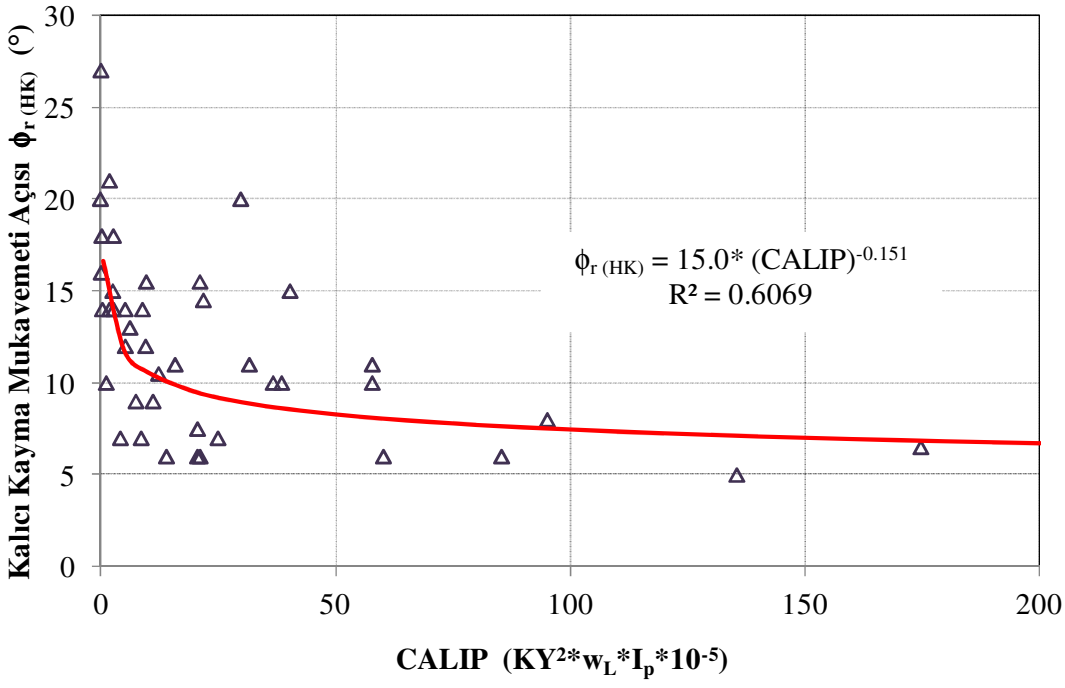



**Şekil 5.27 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının aktivite ile değişimi.

Her iki deney tipi için yapılan analizlerde çeşitli fonksiyonlarla ilişki aranmıştır. Kullanılan bütün fonksiyon tipleri için anlamlı bir belirleme katsayısına sahip olan eğilim çizgisi elde edilememiştir. Yapılan değerlendirilme sonucunda kil yüzdesi, ince dane oranı ve özellikle aktivitenin kalıcı kayma mukavemetinin tahmini olarak belirlenmesinde doğrudan ve tekil olarak kullanılmasının çok sağlıklı sonuçlar vermeyeceği düşünülmektedir.

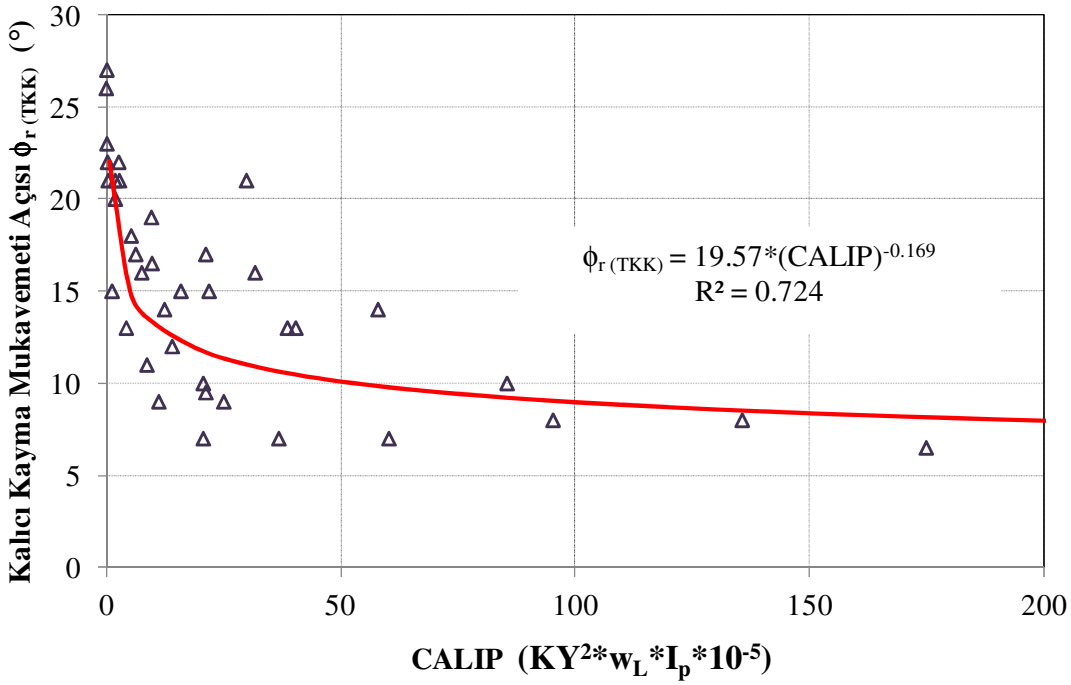
## 5.5 Diğer Zemin Özellikleri İle Kalıcı Kayma Mukavemeti Arasındaki İlişki

Geoteknik mühendisliği literatüründe yukarıdaki temel zemin parametrelerinin yanında diğer zemin parametreleri ve yeni tariflenen parametreler ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan bir tanesi kil yüzdesi, likit limit ve plastisite indisi parametrelerini birlikte içeren ve Collotta ve diğ. (1989)'de CALIP olarak tanımlanan parametredir. Bu parametre yazarlar tarafından $CALIP = KY^2 \times w_L \times I_p \times 10^{-5}$ şeklinde tanımlanmıştır. Bağıntıda kil yüdesi, likit limit ve plastisite indisi değerleri yüzde cinsinden hesaba girmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarından elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları ile CALIP olarak tariflenen parametre arasındaki dağılımlar halka kesme deneyi için Şekil 5.28'de verilmiştir.



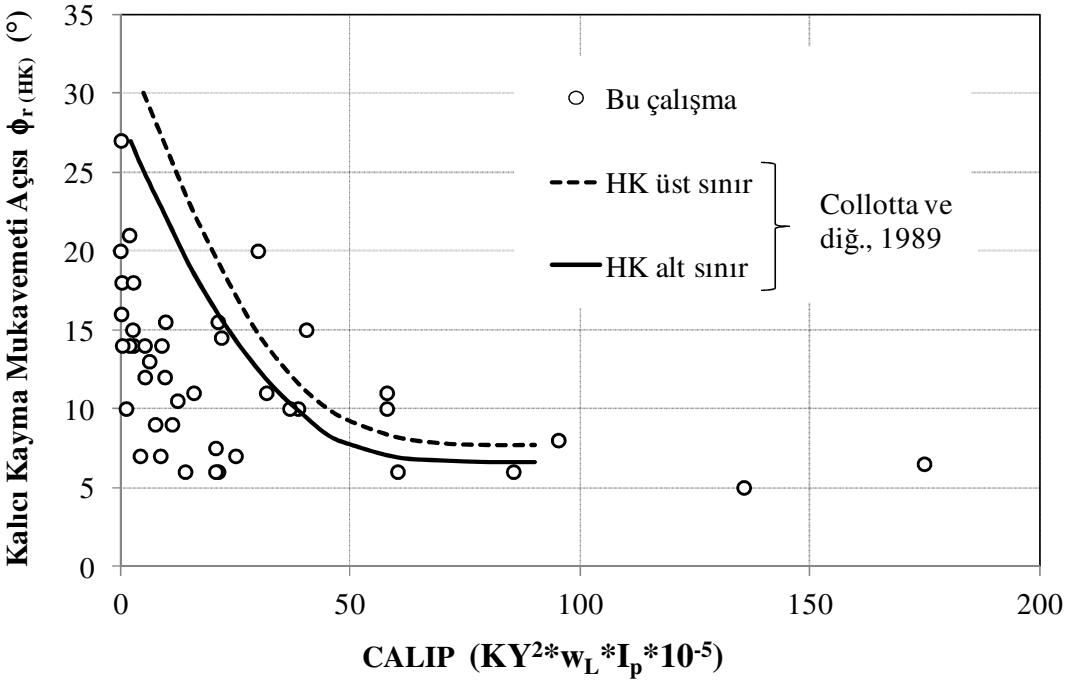

**Şekil 5.28 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile CALIP ilişkisi.

Şekil 5.29'da ise tekrarlı kesme kutusu deney sonuçlarına göre elde edilen dağılım verilmiştir.



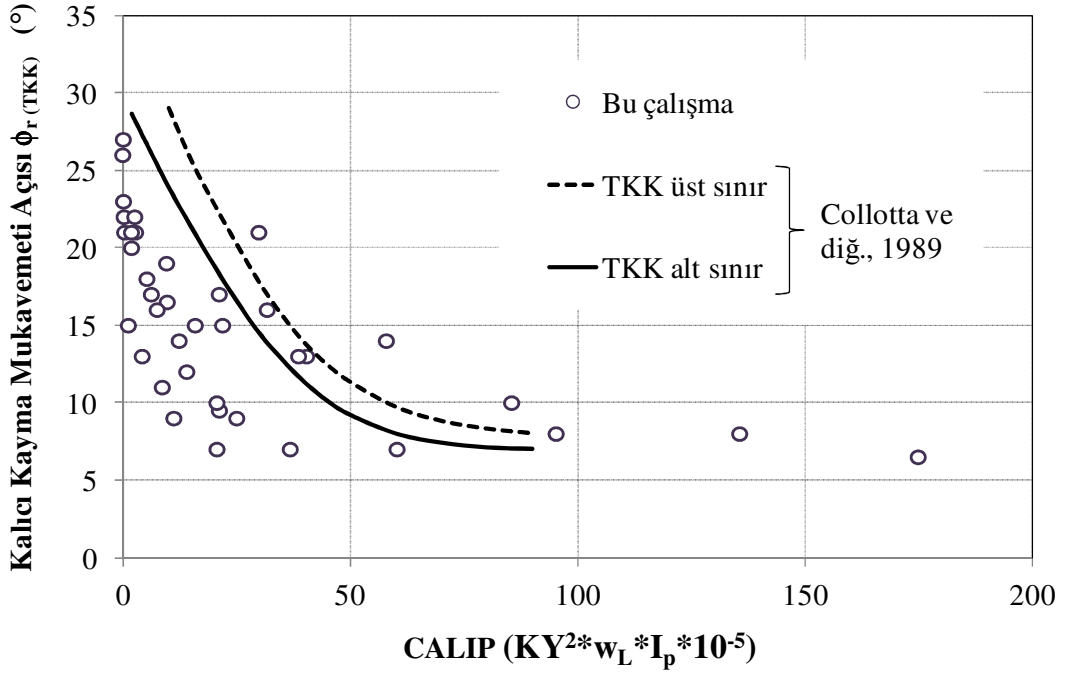

**Şekil 5.29 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısı ile CALIP ilişkisi.

Elde edilen belirleme katsayılarına bakıldığında halka kesme deneyi için % 61, tekrarlı kesme kutusu için ise % 72 gibi değerler elde edilmiştir. Halka kesme deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları ayrıca Collotta ve diğ. (1989)'de verilen eğrilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de verildiği gibi hem halka kesme deneyi için hemde tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları Collotta ve diğ. (1989)'nin verdiği aralıklarla uyum göstermemektedir. Bu uyumsuzluğun sebebinin minerolojik farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Collotta ve diğ. (1989) tarafından verilen aralıkların oldukça altında değerler görülmektedir. Bu uyumsuzluğa rağmen sadece genel eğilimin şekil olarak benzediğinden söz edilebilir. CALIP değerinin 30'dan düşük değerlerinde kalıcı kayma mukavemeti açısının CALIP'in artışıyla azaldığı, bu değerden sonra ise sabitleştiği söylenebilir. Aynı şekilde tekrarlı kesme kutusu deney sonuçları da benzer sonuçlar vermiştir.




**Şekil 5.30 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının Collotta ve diğ., 1989 ile karşılaştırılması.

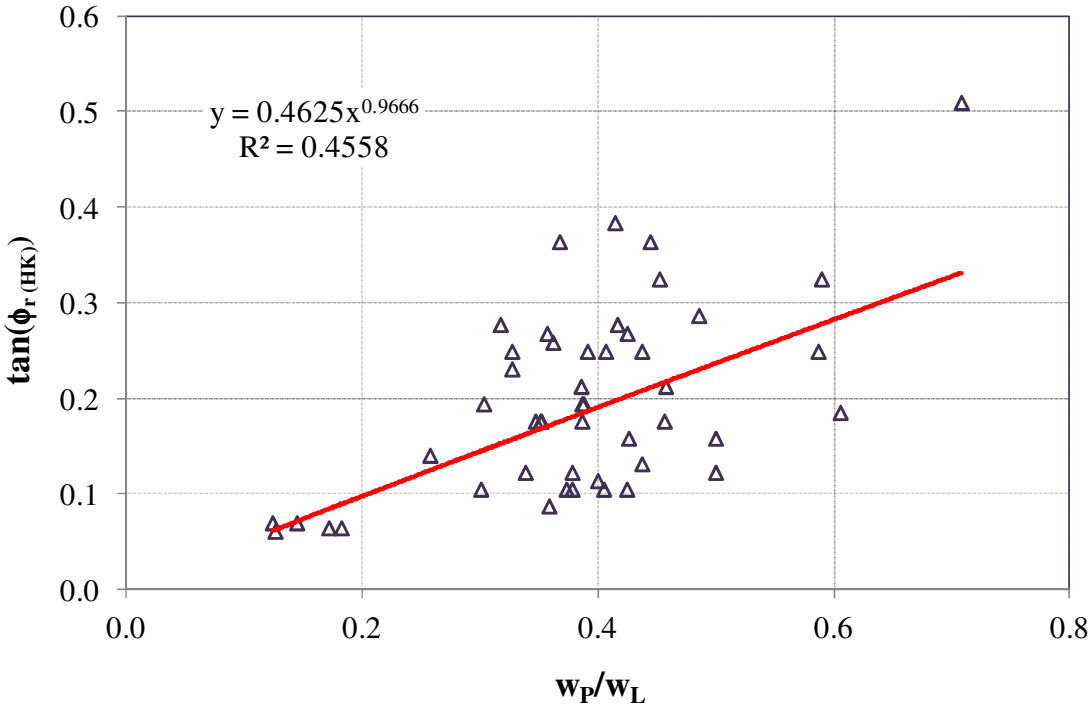
Collotta ve diğ. (1989) tarafından verilen CALIP parametresine bağlı kalıcı kayma mukavemeti korelasyonunun kullanılması çalışmanın yapıldığı bölgede geçerli olsa da bütün zeminler için geçerli olmadığı görülmektedir.




**Şekil 5.31 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları Collotta ve diğ., 1989 ile karşılaştırılması.

Yazarlar tarafından verilen bantın kalıcı kayma mukavemeti açısı için yüksek değerler vermeinin bir sebebide yazarlar tarafından kullanılan numunelerdeki kum içeriği olabilir. Her ne kadar bu kum içerikleri çok yüksek olmasa da sonuca etkisinin beklenenden fazla olduğu söylenebilir.

De ve Furdas (1973) tarafından sunulan çalışmada ise plastik limitin likit limite oranı ile kalıcı kayma mukavemeti açısının tanjantı arasında bir ilişki tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmaya ait veriler incelendiğinde geniş bir alanda saçılımın fazla olduğu görülmektedir. Yazarların bu dağılıma uygun olarak geçirdiği korelasyon eğrisine göre plastik limit/likit limit oranının artışıyla birlikte kalıcı kayma mukavemeti açısının tanjantının arttığı söylenebilir. Aynı gösterim bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarına uygulanırsa halka kesme deneyi için Şekil 5.32 ve tekrarlı kesme kutusu deneyi için Şekil 5.33'te verilen grafikler elde edilmiştir. Halka kesme deneyi sonuçlarının kullanıldığı ve Şekil 5.32'de verilmiş olan grafikte veriler için en yüksek belirleme katsayısına sahip eğri üslü fonksiyon yardımıyla elde edilmiştir




**Şekil 5.32 :** Halka kesme deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit/likit limit oranı ile değişimi.

Bu denklem

$$tan\ \phi_{r\ (HK)} = 0.46\left(\frac{w_p}{w_L}\right)^{0.9666} \quad \textbf{(5.17)}$$

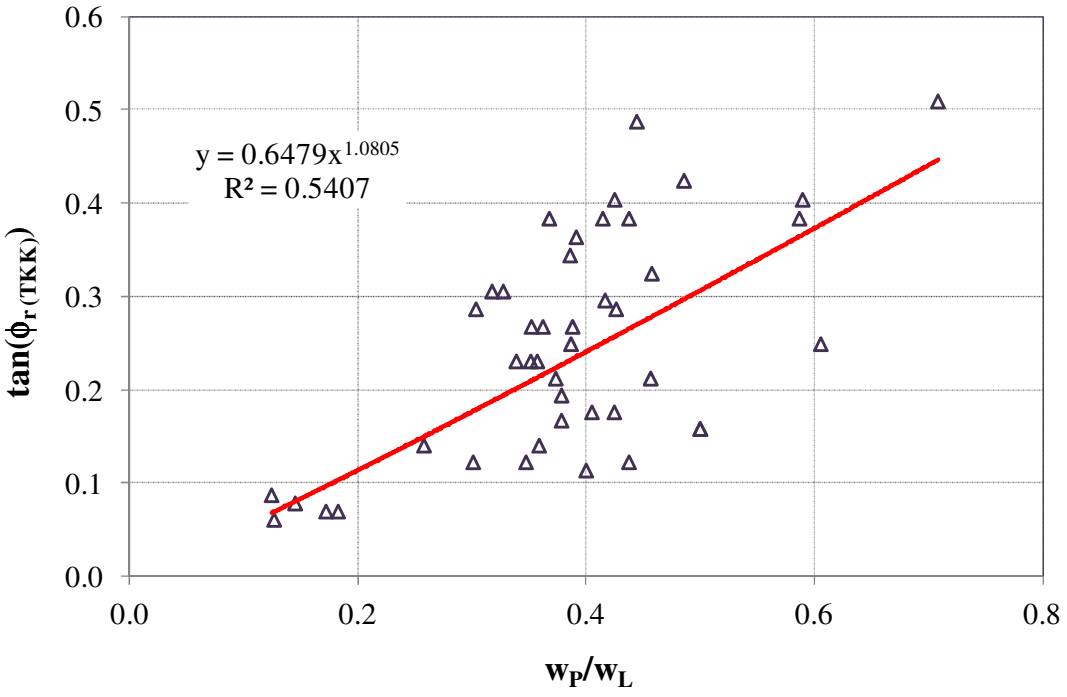
olarak ifade edilirse çok yüksek bir değer olmasa da diğerleri içinde en yüksek değer olan R=% 68 gibi bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Eğri bir trend olarak plastik limit/likit limit oranının artışıyla kalıcı kayma mukavemeti açısının arttığına gösterge olmaktadır.

Aynı durum tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarında da görülmektedir. Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları halka kesme kutusu deney sonuçlarına göre daha yüksek olan % 54 gibi bir belirleme katsayısına sahiptir. Bu grafikte de en iyi belirleme katsayısına sahip eğri üslü fonksiyon olarak elde edilmiştir. Eğrinin şekli ve artış yönü halka kesme deneyinden elde edilen eğriye benzerlik göstermektedir.

Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen sonuçlara göre;

$$tan\ \phi_r = 0.65\left(\frac{w_p}{w_L}\right)^{1.0805} \quad \textbf{(5.18)}$$

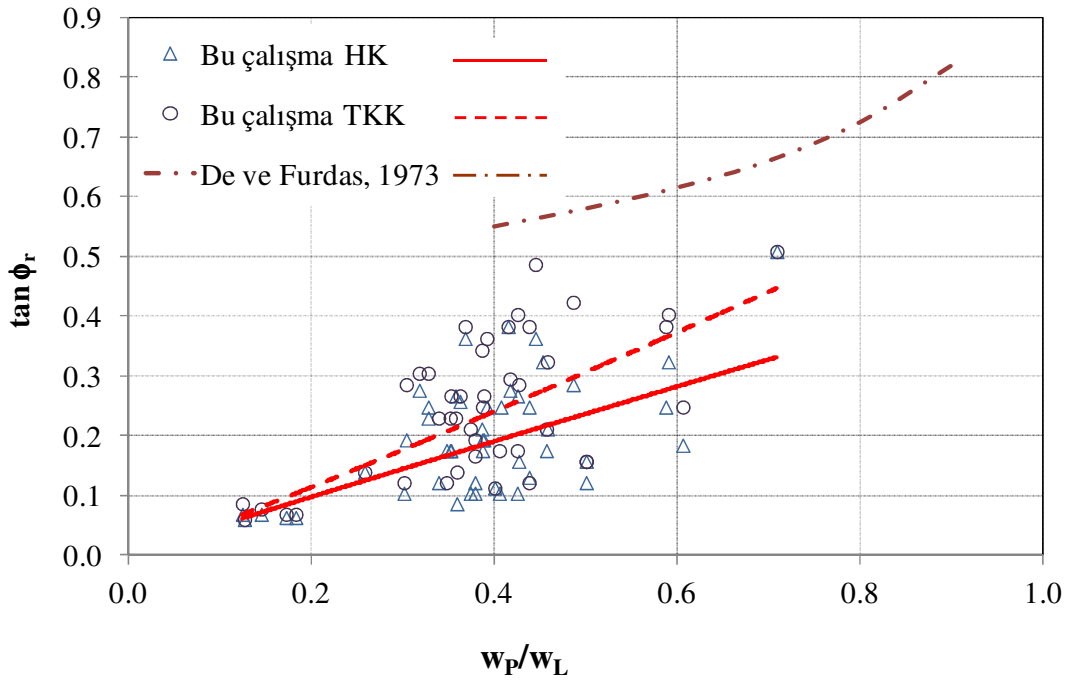
şeklinde bir denklem elde edilmektedir.




**Şekil 5.33 :** Tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit/likit limit oranına ile değişimi.

Plastik limit/likit limit oaranının kalıcı kayma mukavemet ilişkisinin verildiği De ve Furdas (1973) adlı yayında verilen korelasyon eğrisi ile bu çalışma kapsamında yapılan deneyler karşılaştırıldığında bir uyumsuzluk gözlenmektedir.

Şekil 5.34'te verilen düz çizgi halka kesme deneylerinden, kesikli çizgi ise tekrarlı kesme kutusu deneylerinden elde edilmiştir. Kesikli çizgili ve noktalı eğri ise De ve Furdas (1973) tarafından verilen eğriyi göstermektedir. Bunu uyumsuzluğun ana nedeninin iki çalışmada kullanılan numunelerin kıvam limitlerinin farklı olması gösterilebilir. De ve Furdas (1973) tarafından verilen grafik incelendiğinde o çalışmaya ait numunelerin $w_P/w_L$ oranının 0.4 ile 0.9 arasında değiştiği görülmektedir.




**Şekil 5.34 :** Halka kesme ve tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açılarının plastik limit/likit limit oranına göre değişiminin De ve Furdas (1973) ile karşılaştırılması.

Plastik limitin alabildiği değerler göz önüne alındığında kullanılan numunelerin likit limitlerinin yüksek olmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısı ile çalışmada kullanılan zemin numunelerinin genellikle düşük plastisiteli silt ve killerden oluştuğu söylenilebilir.Bu çalışmada ise kullanılan zemin numuneleri çoğunlukla yüksek plastisiteli killer olduğu için iki çalışma sonuçlarındaki uyumsuzluk açıklanabilir. Ancak elde edilen değerler açısından da kalıcı kayma mukavemeti açıları arasında bir fark olduğu da

aşikardır. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi açısından literatürde verilen korelasyonların kulllanımında dikkatli olunması gerektiğini açıkça gösteren bu durum çalışma kapsamında kullanılan numunelerin özelliklerinin geneli ne kadar temsil ettiğinin çok iyi irdelenmesi gerektiğini göstermektedir.

### 5.6 Aşırı Konsolidasyon Oranının Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi

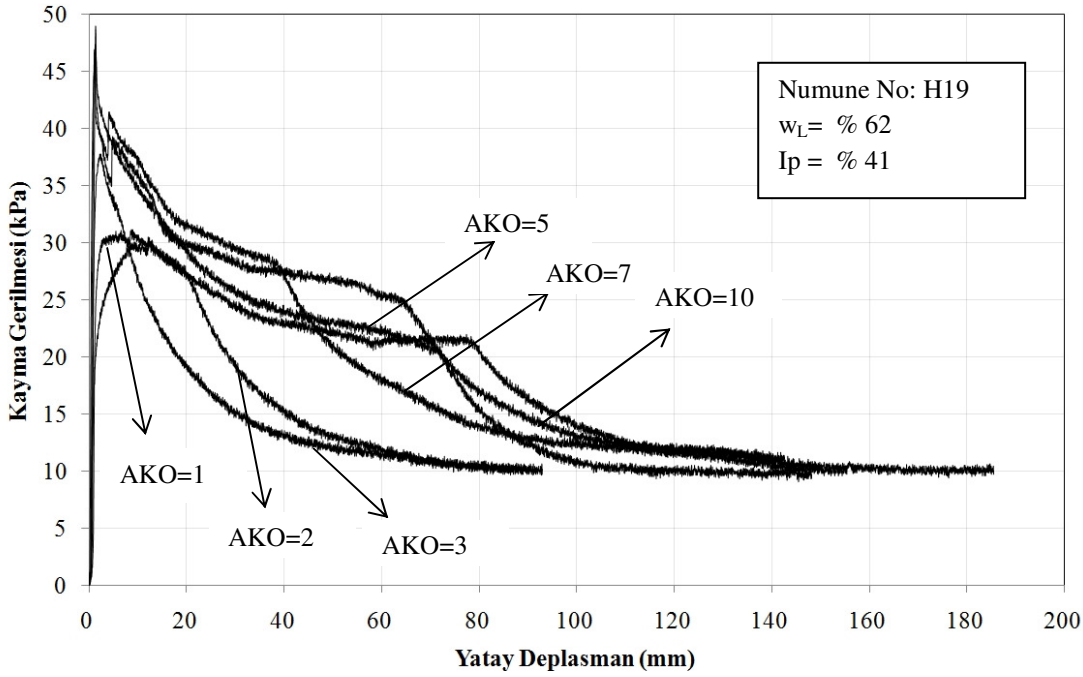
Zeminlerin gerilme tarihçelerinin kayma mukavemetini etkilediği bilinmektedir. Buna karşın kalıcı kayma mukavemeti üzerine yapılan literatürdeki bazı çalışmalarda aşırı konsolidasyon oranının değişiminin kalıcı kayma mukavemete etkisinin olmayacağı savunulmaktadır (Skempton, 1985; Suzuki, 2007). Buna neden olarak kesme yüzeyindeki dane yöneliminin de sağlandığı büyük deformasyonlar sonrasında kesme yüzeyinde zemin-zemin arayüzünde kayma mukavemetinin kohezyon teriminin sıfır veya sıfıra çok yakın bir değer olması dolayısı ile mukavemetin sadece sürtünme bileşeni tarafından sağlanmasını göstermektedir. Çok sıkı kumlarda veya çok sert killerde bu büyük deformasyonlar sonrasında oluşan nihai durumda hareket öncesi durumun mukavemet parametrelerinde değişiklik yaratmayacağı düşünülmektedir. Literatürde gerilme geçmişinin kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemeye yönelik olarak yapılan çalışmalar çok sınırlı kalmıştır. Bu çalışma kapsamında gerilme geçmişinin kalıcı mukavemet üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı aşırı konsolidasyon oranlarında hazırlanan farklı plastisite özelliklerine sahip kil numuneleri üzerinde halka kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile aşırı konsolidasyonun kalıcı kayma mukavemeti ve pik mukavemet üzerindeki etkisi dolayısı ile pik mukavemet-kalıcı mukavemet farkının aşırı konsolidasyon ile değişimi incelenmiştir. Çalışmada numunelerde elde edilmesi planlanan aşırı konsolidasyon oranlarının (AKO) deney sisteminin kapasitesi de dikkate alınarak 1, 2, 3, 5, 7 ve 10 olacak şekilde konsolide edildikten sonra belirlenen düşey gerilme altında kesilmesi planlanmıştır. Kullanılan halka kesme deney düzeneği maksimum 550 kPa düşey gerilmeyi uygulayabilecek kapasitede olduğundan, düşey gerilme kapasitesi ve erişilmesi düşünülen aşırı konsolidasyon oranları da göz önünde tutularak halka kesme deneylerinin kesme işlemleri 50 kPa düşey gerilme altında yapılmış ve hedeflenen aşırı konsolidasyon oranlarının yakalanmıştır. Homojenlik ve standardizasyon amacıyla numunelerin hazırlık sürecinde öncelikle konsolidometrelerde hazırlanmış daha sonra halka kesme

deney düzeneğinde konsolidasyonun devam ettirilmiştir. Konsolidometrelerde numune hazırlığının normal şartlarda ilk olarak 50 kPa düşey gerilme altında yapılması planlanmıştı. Böylelikle 50 kPa altında konsolide edilmiş olan numunenin 50 kPa düşey gerilme altında kesilmesi ile aşırı konsolidasyon oranı 1 olan normal konsolide bir numune üzerinde deney gerşekleştirilmesi planlanmıştı. Ancak 50 kPa altında hazırlanan bir numunenin işlenebilirliği, saklanabilirliği ve homojenliğinin çok sağlıklı olmadığı görüldüğünde daha sonraki numune hazırlıklarında konsolidometrelerde daha yüksek basınçlarda numunenin hazırlanması gerektiği anlaşılmıştır. Yapılan denemeler sonrasında 70 kPa – 80 kPa düşey gerilme seviyesinde hazırlanan numunelerin uygun olduğu görülmüştür. Bu durumda halka kesme deney aletinde 50 kPa düşey gerilme altında konsolide edilerek kesme işlemi yapılan numunelerde aslında ön konsolidasyon basıncının 70 kPa olması sebebiyle aşırı konsolidasyon oranı 1'den büyük olarak elde edilmiştir. AKO'nın diğer değerlerinde herhangi bir sorun yaratmayan bu dezavantaj nedeni ile hesaplamalarda AKO'nın 1 olduğu durumlar analiz dışında bırakılmıştır.

Aşırı konsolidasyonun kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek üzere yapılacak halka kesme deneyleri sırasında kesme hızının etkisini dahil etmemek amacıyla bu çalışma kapsamında kesme hızının etkisini belirlemek amacıyla yapılan deney sonuçları değerlendirilerek deneyler sabit bir kesme hızında yapılmıştır. Aşırı konsolidasyon sonrası kalıcı mukavemete erişilmesi için gerekli deformasyon seviyelerinin de artacağı düşünüldüğünde deneylerin çok yavaş kesme hızlarında yapılmasının süre olarak çok zaman alacağı açıktır. Mümkün olduğunca çok sayıda farklı numune üzerinde deneylerin yürütülmesi amaçlandığından daha önce bu çalışma kapsamında yapılan hıza bağımlı deney sonuçları ve literatürde verilmiş önceki araştırmalar da göz önünde buşundurularak halka kesme deneylerinde davranışın önemli miktarda etkilenmediği optimum kesme hızı olan 0.1 mm/dak. kesme hızının kullanılmasına karar verilmiştir.

Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 10 farklı numune üzerinde halka kesme deneyleri yapılmıştır. Likit limitleri % 24 ile % 113 arasında değişen numuneler üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında hazırlanan numuneler 50 kPa gerilme altında kesilerek yatay deplasmana bağlı olarak kayma gerilmesi değişimleri elde edilmiştir. Şekil 5.35'te yapılan bu deneylerin sonuçlarına örnek olması amacıyla H19

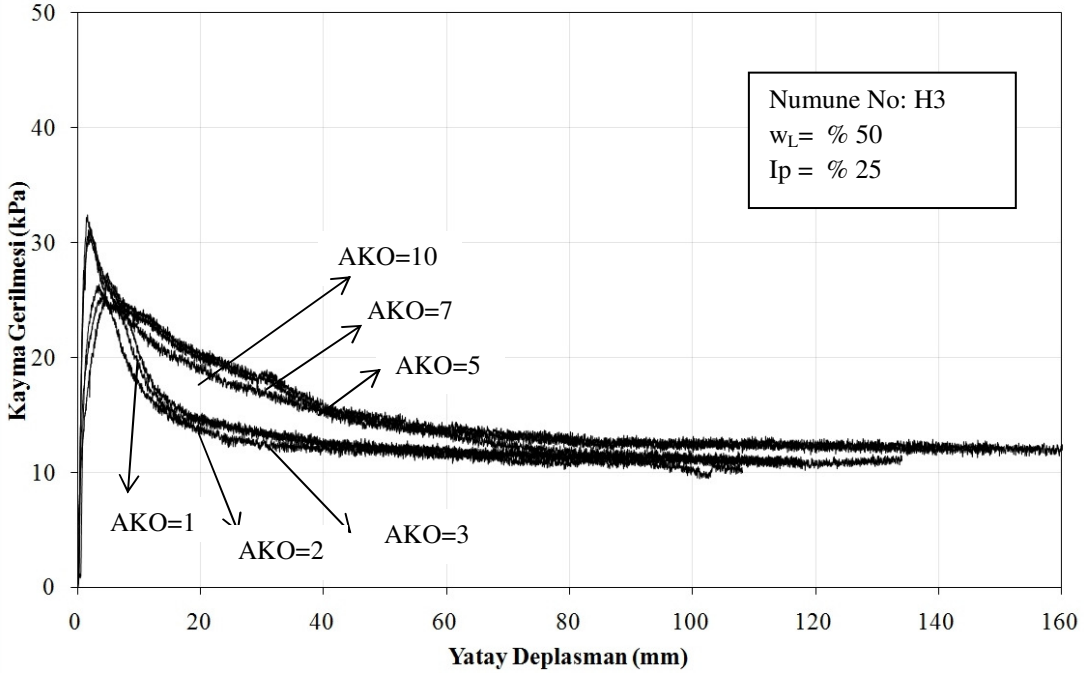
numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyleri kayma gerilmesi-yatay deplasman grafikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere aşırı konsolidasyon oranı artttığında pik mukavemet oranı artmakla beraber kalıcı kayma gerilmesi değeri değişmemektedir. Aşırı konsolidasyon oranının değişimi sadece kalıcı mukavemete erişmek için gerekli deformasyon miktarını değiştirmektedir.



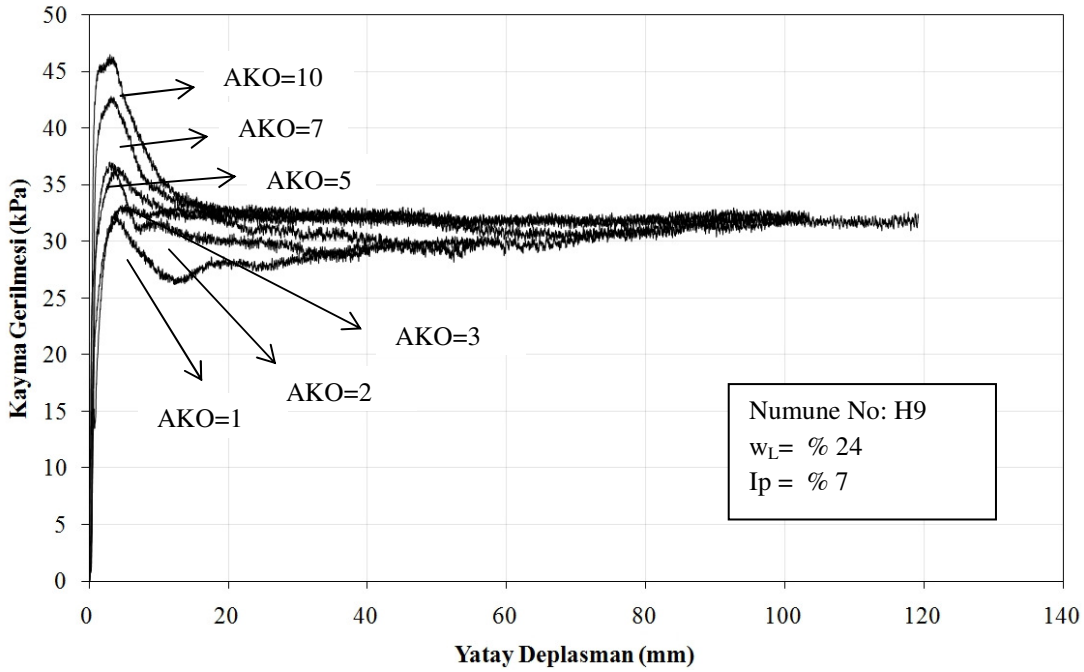

**Şekil 5.35 :** H 19 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.

Kalıcı kayma gerilmesinde bir değişim gözlenmemesine karşılık aşırı konsolidasyon oranının artışıyla pik mukavemetin arttığı açık olarak gözlenmektedir. Bu davranış diğer yüksek plastisteye sahip numunelerde de görülmekle beraber, plastisitenin azalması ile birlikte kalıcı mukavemete erişmek için gerekli deformasyon miktarlarının ve pik mukavemet ile kalıcı mukavemet arasındaki farkın azaldığı belirlenmiştir. Şekil 5.36'da plastisitesi H19 numunesine göre göreceli olarak daha düşük olan H3 numunesinin gerilme – şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere numunenin kalıcı mukavemete erişmesi için gereken deformasyonlar H19 numunesine göre önemli oranda düşmüştür. Ayrıca pik mukavemet ile kalıcı mukavemet arasındaki fark daha dar bir bantta değişmektedir. Şekil 5.37'de ise bu çalışmada kullanılan numuneler arasında en düşük plastisiteye sahip olan H9 nolu numuneye ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.

Görüldüğü üzere numunenin kalıcı mukavemete erişmesi gereken deformasyonlar yukarıda verilmiş olan diğer numunelere göre dikkate değer bir oranda azalmaştır. Ayrıca bu numune için kalıcı mukavemet ile pik mukavemet arasındaki fark diğer numunelere göre daha dar bir aralıkta değişmektedir.

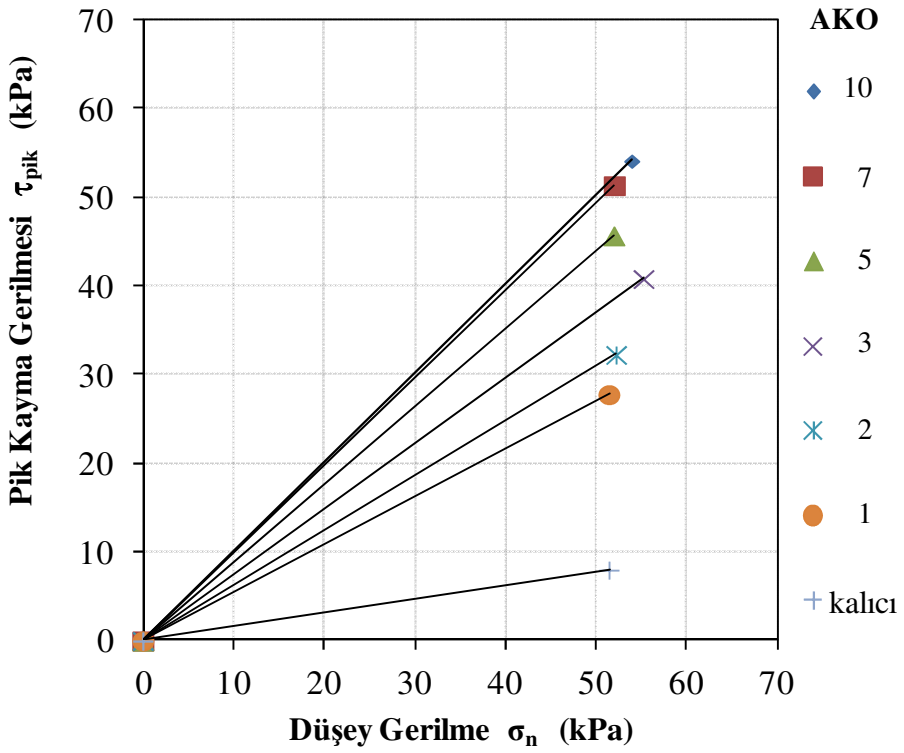



**Şekil 5.36 :** H3 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.



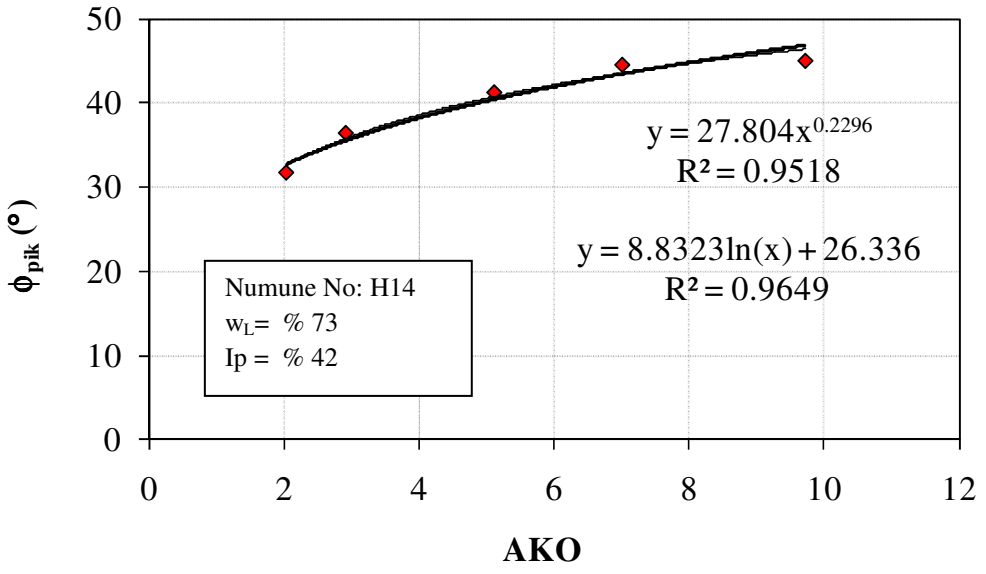

**Şekil 5.37 :** H9 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.

Yapılan deneyler mukavemet anlamında değerlendirilirken iki farklı yol izlenmiştir. Bunlardan birisinde kesme işlemi sırasındaki düşey gerilmeye bağlı olarak kayma mukavemeti açısının aşırı konsolidasyon oranı ile ilişkisi elde edilmeye çalışılırken, diğerinde ise pik kayma mukavemetinin kalıcı kayma mukavemetine oranı değişken olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.38'de H14 adlı numunenin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında elde edilen pik kayma mukavemeti zarfları ile kalıcı kayma mukavemeti zarfı verilmiştir. Numunelerin kayma mukavemeti açıları hesaplanırken kohezyon teriminin sıfır olduğu kabülü ile mukavemet zarfı eğimlerinden kayma mukavemeti açıları belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere aşırı kosoliasyon oranları arttıkça pik kayma mukavemet açıları artmaktadır. Grafikte deney sırasında oluşan çevre sürtünmesi bileşenin hesaba katılması ile hesaplanan net düşey gerilmeler gösterildiğinden düşey gerilmeler 50 kPa'dan biraz farklı değerler almıştır. Numuneler aşırı konsolide olduğundan dolayı boşaltma sonrasında numune bir miktar şiştiğinden oluşan çevre sürtünmesi değerleri negatif olmaktadır, bu durum ise düşey gerilmeye artış olarak yansımaktadır.




**Şekil 5.38 :** H14 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen mukavemet zarfları.

Bütün numuneler için farklı aşırı konsolidasyon oranına karşılık olarak belirlenen pik kayma mukavemeti açılarının değişimi çizilerek aşırı konsolidasyon oranının pik mukavemetle ilişkisi elde edilmiştir. Şekil 5.39'da H14 numunesi için sözü edilen ilişki görülmektedir. Deney sonuçlarına lineer, logaritmik, üslü ve ikinci derece denklem formundaki eğilim çizgileri uygulanmıştır.



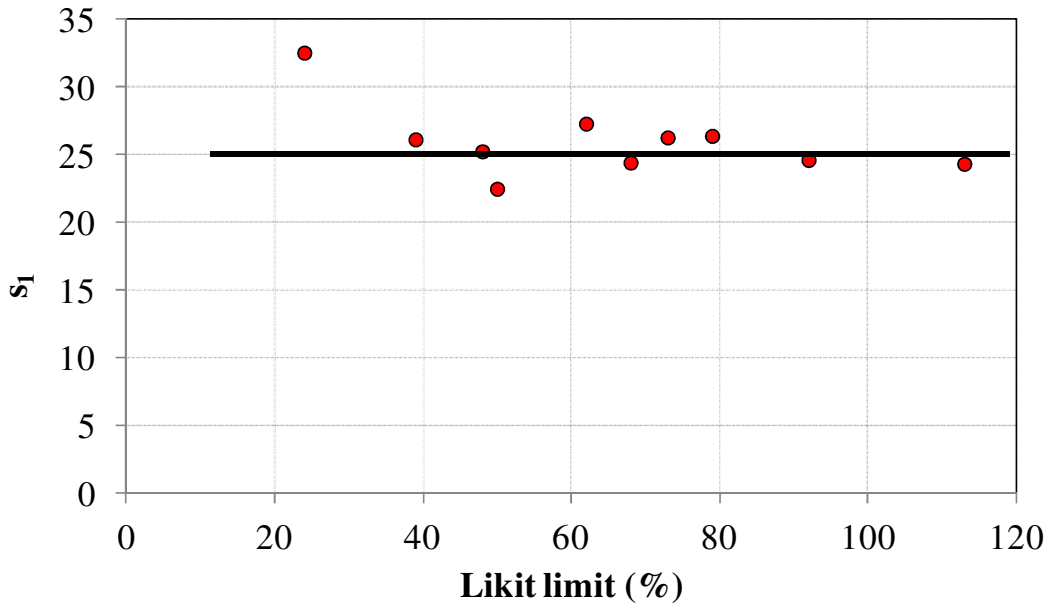

**Şekil 5.39 :** H14 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen kayma mukavemeti açıları.

Yapılan analizler sonucunda kayma mukavemeti açısı ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisini H14 numunesi için belirleme katsayısı yaklaşık 0.97 olan logaritmik eğilim çizgisi elde edilmiştir. Logaritmik ifade diğer numunelerde de aynı oranda başarılı sonuçlar vermiştir. Diğer numunelerdeki belirleme katsayılarına bakıldığında hepsinin $R^2$=% 95'in üstünde olduğu görülmüştür.

Elde edilen eğilim çizgisi

$$\phi_{pik} = r_1 \times ln(AKO) + s_1 \qquad \textbf{(5.19)}$$

olarak ifade edildiği takdirde her numune için bağıntının katsayısı olan $r_1$ ve sabiti olan $s_1$ değerleri belirlenmiştir. Dikkati çeken bir nokta "$s_1$" değerinin bir numune hariç bütün numuneler için 25 değeri civarında değişmesidir. Elde edilen $s_1$ değerlerinin ortalaması alındığında (H9 numunesi hariç) 25.3 gibi bir değer ortaya çıkmaktadır. "$s_1$" katsayısının likit limite göre değişimi Şekil 5.40'da verilmiştir.



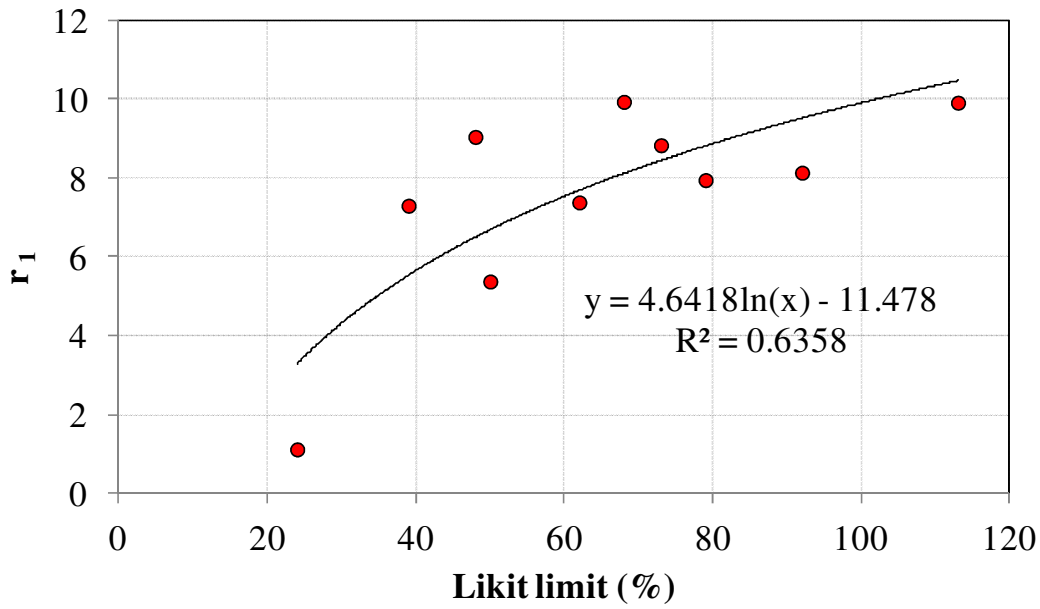

**Şekil 5.40 :** Pik kayma mukavemeti açısının tahmini için tanımlanan $s_1$ sabitinin likit limite bağlı değişimi.

Aynı analiz üslü ifade kullanılarak yapıldığında pik kayma mukavemeti açıları aşırı konsolidasyon oranlarına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$\phi_{pik} = k_1 \times AKO^{t_1} \qquad \textbf{(5.20)}$$

Örneğin H14 numunesi için Şekil 5.39'da görüldüğü gibi yukarıdaki denklemin katsayıları olan $k_1$ katsatısı 27.8, $t_1$ üssü ise 0.223'dir.

Pik mukavemet ile aşırı konsolidasyon oranı ilişkisi için en iyi sonucu veren denklemler burada sunulmuştur. Ortalama olarak hesaplanan $s_1$'in 25.3 olarak kabul edilmesi durumunda $r_1$ katsayılarının değişimi bilindiği takdirde farklı aşırı konsolidasyon oranları için pik kayma mukavemeti açısı elde edilebilecektir. $r_1$katsayılarının farklı zemin özelliklerine göre ilişkilendirilmesi ile genel bir ifade ortaya çıkarılacaktır. Örneğin bütün numunelere ait $r_1$ katsayılarının likit limite bağlı değişimi Şekil 5.41'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere likit limit ile $r_1$ katsayısı arasında bir anlamlı bir ilişki kurabilmek amacıyla yapılan sayısal analizler sonucunda en yüksek belirleme katsayısını veren logaritmik eğilim çizgisi seçilmiştir.




**Şekil 5.41 :** $r_1$ katsayısının likit limite bağlı değişimi.

Elde edilen bu bağıntı ile aşırı konoslidasyon oranı pik mukavemet bağıntısı birleştirildiğinde kayma mukavemeti açısının likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak;

$$\phi_{pik} = [(4.6418 \times \ln(w_L) - 11.478) \times ln(AKO)] + 25.3 \quad \textbf{(5.21)}$$

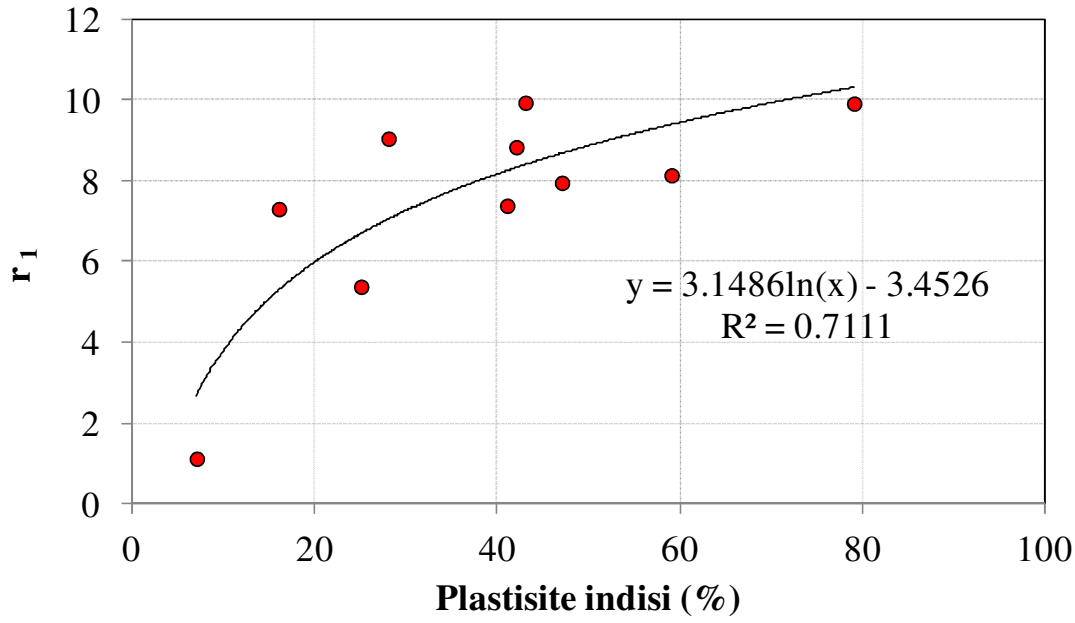
olarak ifade edilebileceği belirlenmiştir. Bağıntıda likit limit değeri yüzde değer olarak denkleme girmektedir. Bu bağıntı likit limiti % 24 ile % 113 değerleri arasında bulunan ve aşırı konsolidasyon oranı 1 ile 10 arasında değişen numunelerin halka kesme deneyi sonucunda elde edilmiştir.

Bu ifadede değişkenlerden birisi olan likit limit yerine plastisite indisi değişken olarak kullanıldığı takdirde $r_1$ katsayısının plastisite indisine göre değişimi Şekil 5.42'te görüldüğü gibi bir grafik elde edilmiştir.

Plastik limite bağlı olarak aşırı konsolidasayon oranı ile pik mukavemet ilişkisi birleştirildiğinde ise genel ifade;

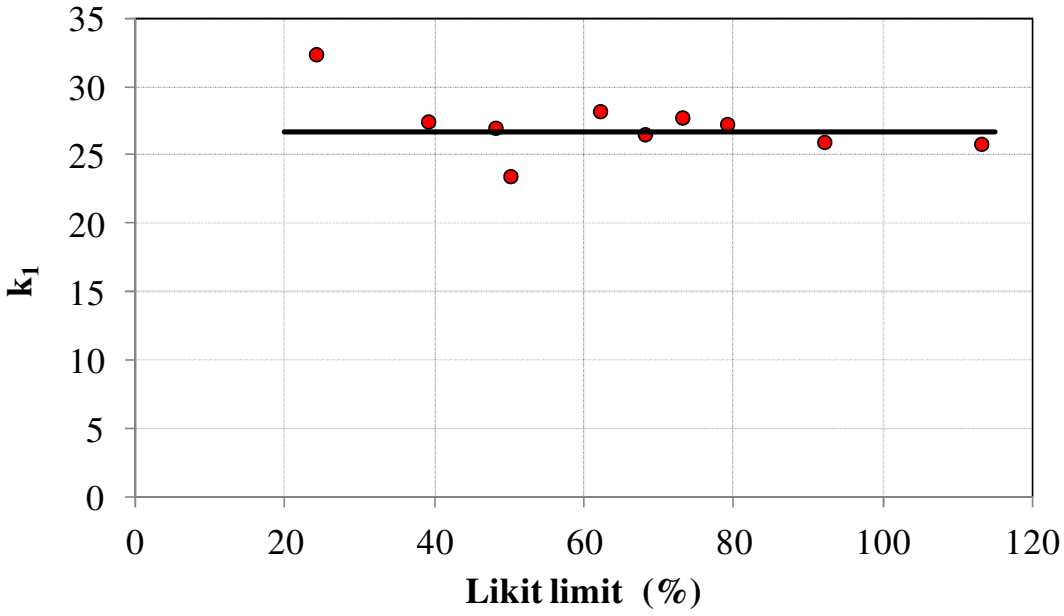
$$\phi_{pik} = \left[\left(3.1486 \times \ln\left(I_p\right) - 3.4526\right) \times ln(AKO)\right] + 25.3 \quad \textbf{(5.22)}$$

olarak elde edilmiştir.




**Şekil 5.42 :** $r_1$ katsayısının plastisite indisine bağlı değişimi.

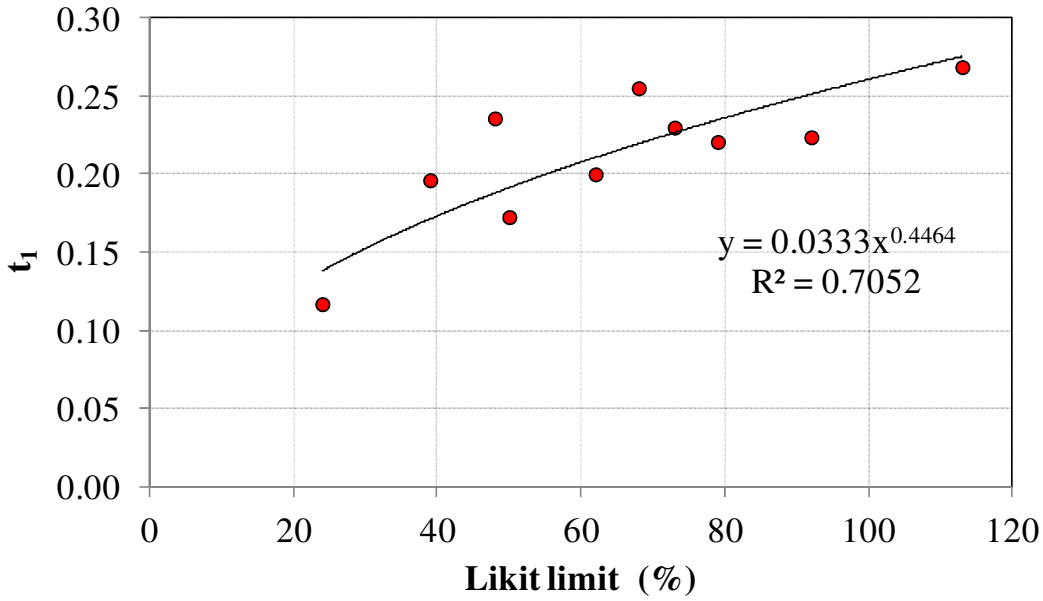
Daha kolay ve kullanışlı olaması amacıyla aşırı konsolidasyon oranı pik kayma mukavemeti ilişkisi üslü ifade olarak aşağıdaki gibi kabul edildiği takdirde denklemin katsayısı $k_1$ ve üssü $t_1$ değerlerinin likit limit ve plastisite indisine bağlı değişimi Şekil 5.43, Şekil 5.44, ve Şekil 5.45'de verilmiştir.




**Şekil 5.43 :** $k_1$ katsayısının likit limite bağlı değişimi.

$$\phi_{pik} = k_1 \times AKO^{t_1} \quad \textbf{(5.23)}$$

$k_1$ katsayısının likit limite ve plastisite indisine bağlı değişimi incelendiğinde bir numune dışında birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. $k_1$ katsayısının ortalaması alındığında (H9 numunesi hariç) 26.7 gibi bir değer elde edilmiştir.




**Şekil 5.44 :** $t_1$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi.

$k_1$ için 26.7, $t_1$ için ise likit limite ve plastisite indisine bağlı ilişkiler kullanılarak pik mukavemet için aşırı konsolidasyon oranı ve likit limite bağlı olarak aşağıdaki gibi bir bağıntı elde edilmiştir.

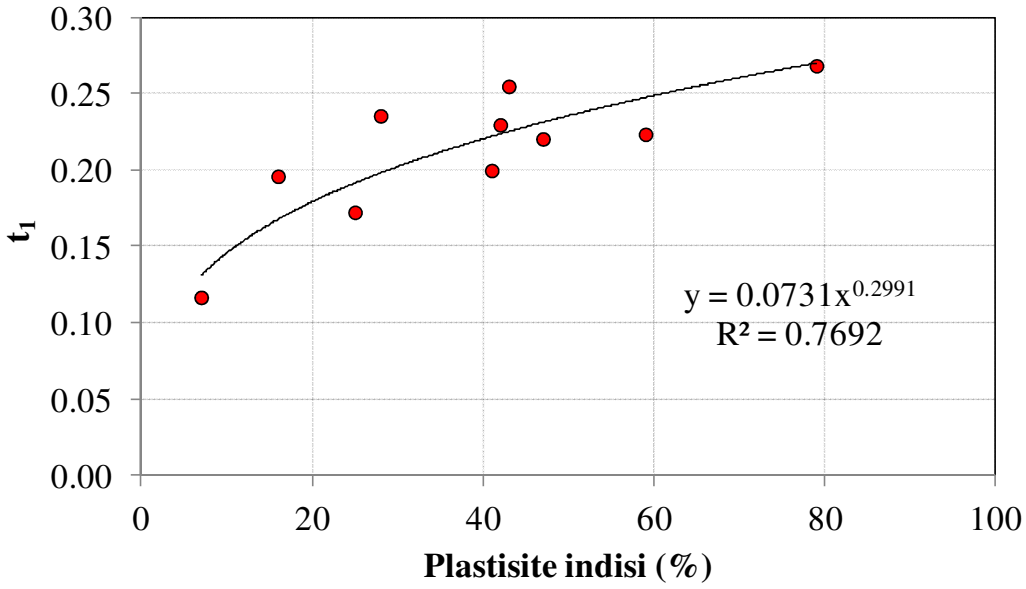
$$\phi_{pik} = 26.7 \times AKO^{(\frac{w_L^{0.4464}}{30})} \quad \textbf{(5.24)}$$

Aynı denklem plastisite indisine bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\phi_{pik} = 26.7 \times AKO^{(0.0731 * I_p^{0.3})} \quad \textbf{(5.25)}$$

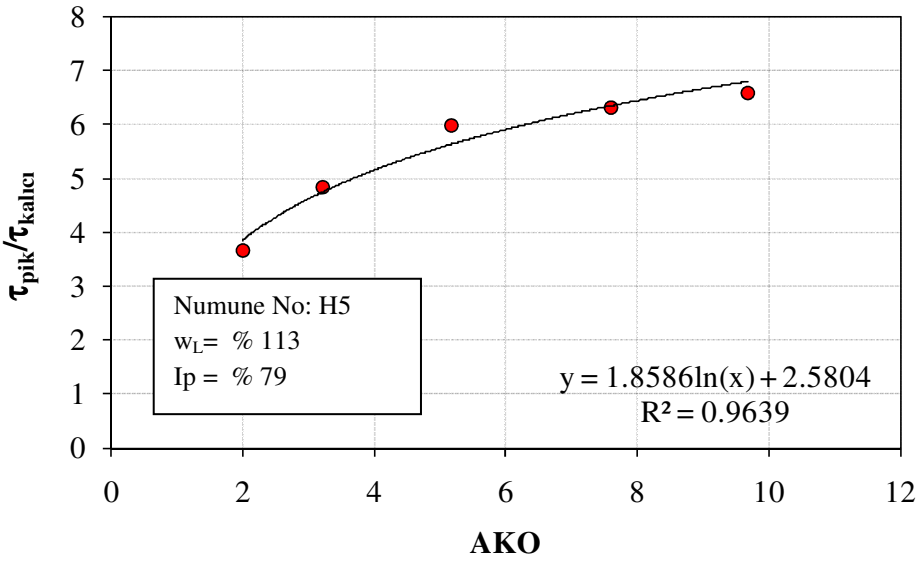
Yukarıda yapılan değerlendirmelerde aşırı konsolidasyon oranı ile kayma mukaveti açıları için elde edilen ilişkiler kayma mukavemetinin sadece sürtünme bileşeninden meydana geldiği ve kohezyonun 0 kabul edilmesi durumu için geçerlidir. Mukavemet zarfı parametreleri yerine kayma gerilmelerinin kullanılması ile daha gerçekçi bir sonuca varılacaktır. Bu amaçla kayma mukavemeti açısı yerine pik

kayma mukavemetinin kalıcı kayma mukavemetine oranı olarak ifade edilen $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranının aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi incelenmiştir.




**Şekil 5.45 :** $t_1$ değerlerinin plastisite indisine bağlı değişimi.

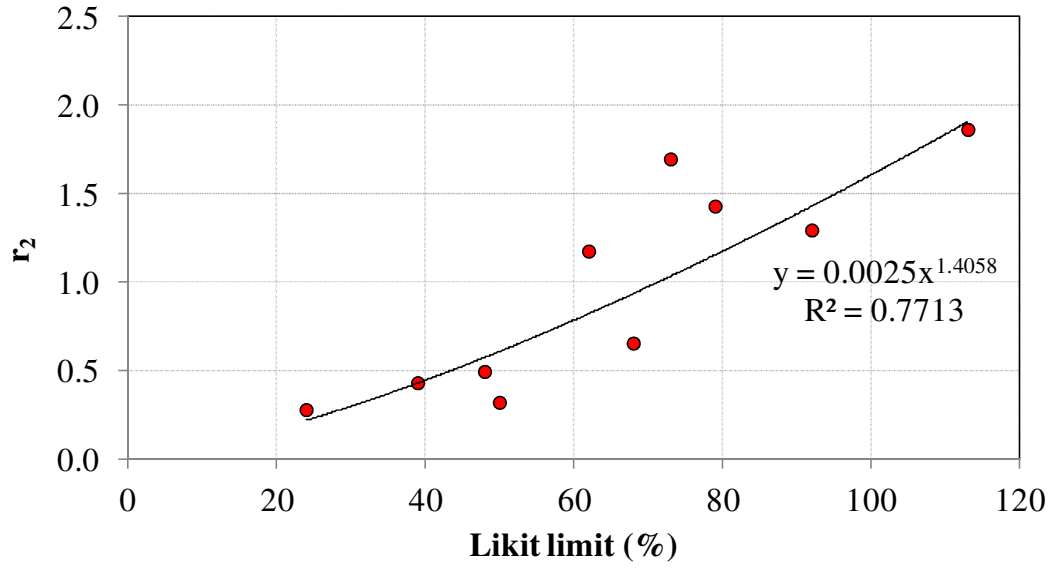
H5 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçlarına göre elde edilen $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranının aşırı konsolidasyon oranına göre değişimi Şekil 5.46'da verilmiştir. Şekil 5.46'da görüldüğü gibi veriler üzerinde yapılan istatistiki analizler sonucunda verilere en uygun eğilim çizgisinin $R^2$=0.96 belirleme katsayısına sahip logaritmik denklem olduğu belirlenmiştir.




**Şekil 5.46 :** H5 numunesi üzerinde farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranları.

$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = r_2 \times ln(AKO) + s_2 \quad \textbf{(5.26)}$$

Bu kapsamda yapılan deneylerin tümü değerlendirildiğinde logaritmik denklemin katsayısı $r_2$ nin likit limite bağlı değişimi Şekil 5.47'de verilmiştir.




**Şekil 5.47 :** $r_2$ katsayısının likit limite bağlı değişimi.

Şekilde görüldüğü üzere $r_2$ katsayısı ile likit limit arasında elde edilen en iyi belirleme katsayısını veren ilişki üslü fonksiyon kullanılarak elde edilmiştir. Logaritmik fonksiyonun diğer bileşeni olan sabit değerin $s_2$ ise likit limite bağlı değişimi Şekil 5.48'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere verilere en uygun eğilim çizgisi üslü ifade ile belirlenmiştir. Bu değerlere göre pik mukavemetin kalıcı mukavemete oranı için likit limite bağlı olarak;

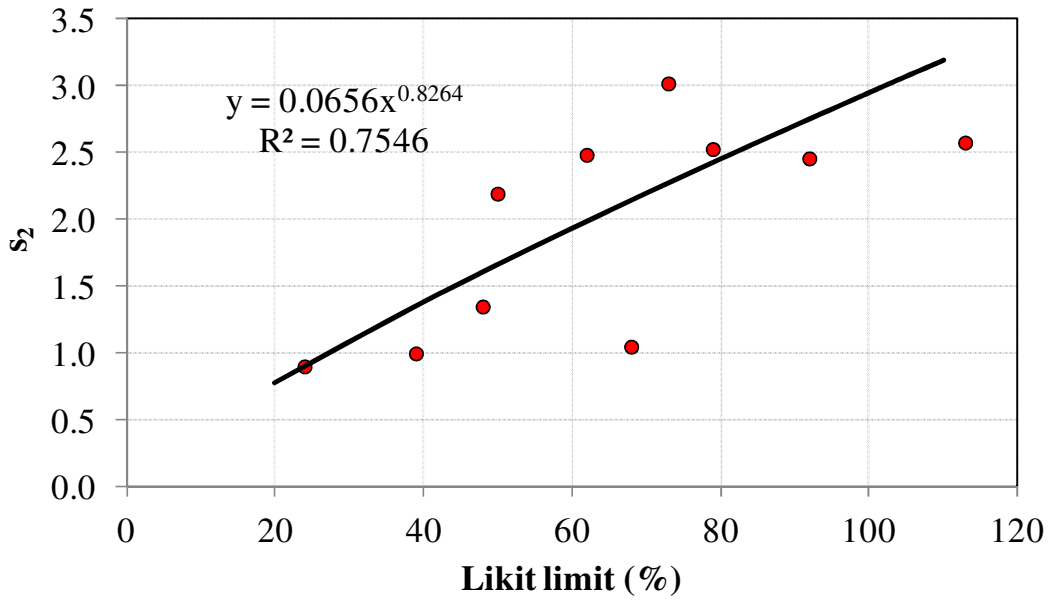
$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = \left[\left(\frac{w_L^{1.4058}}{400}\right) \times ln(AKO)\right] + (0.0656 \times w_L^{0.8264}) \quad \textbf{(5.27)}$$

şeklinde bir fonksiyona ulaşılmıştır.

$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı için aşırı konsolidasyon oranına bağlı olmak koşulu ile

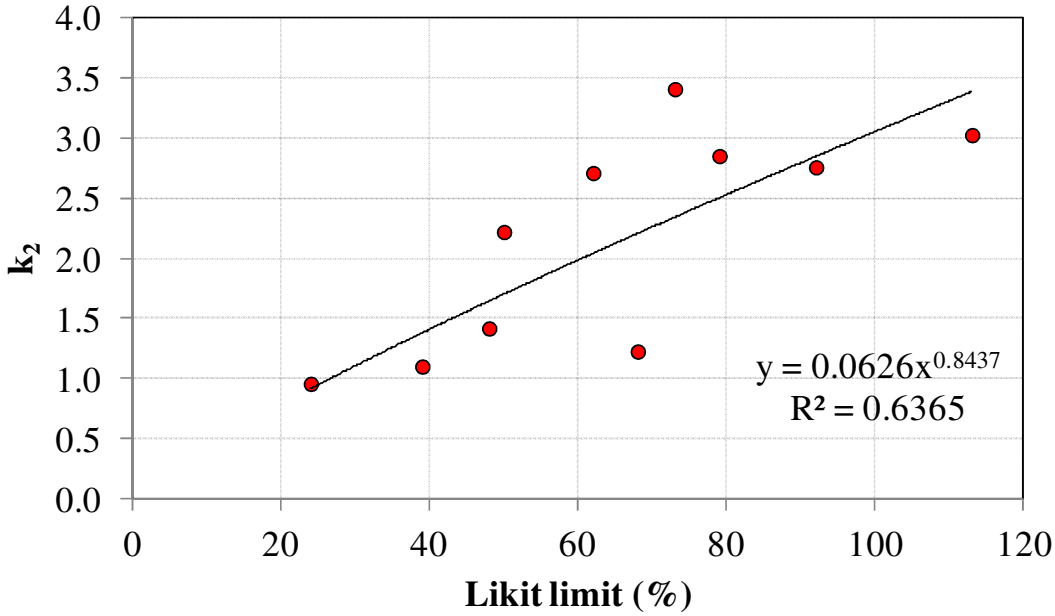
$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = k_2 \times AKO^{t_2} \quad \textbf{(5.28)}$$

şeklinde üslü bir fonksiyon tanımlaması yapıldığı takdirde $k_2$ ve $t_2$ katsayılarının likit limite bağlı değişimleri ve bu değişimler için belirlenmiş olan eğilim çizgileri Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'de verilmiştir.

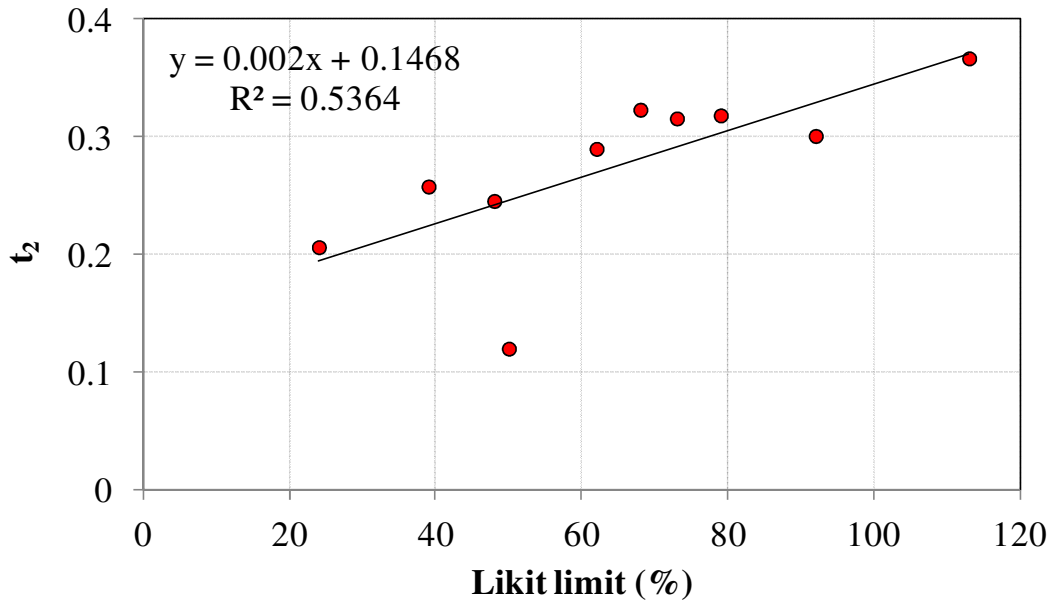



**Şekil 5.48 :** $s_2$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi.

$k_2$ katsayısı için üslü bir ifade tanımlanmıştır. Şekil 5.50'de $t_2$ katsayısının likit limite göre dağılımı ve belirlenen eğilim çizgisi sunulmuştur. $t_2$ katsayısının verildiği Şekil 5.50'de H3 numunesine ait verinin genel trendin dışında kaldığı görülmektedir. Bu aşamada H3 numunesi dışındaki diğer numunnelere ait verilerin oluşturduğu dağılım ve bu dağılıma göre elde edilen eğilim çizgisi Şekil 5.51'de verilmiştir.




**Şekil 5.49 :** $k_2$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi.

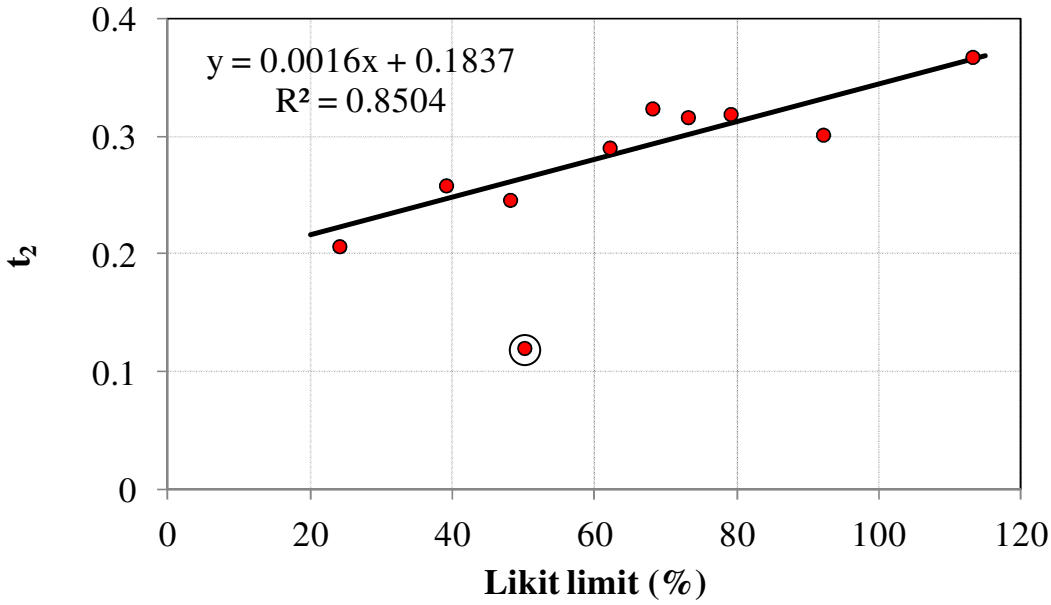



**Şekil 5.50 :** $t_2$ değerlerinin likit limite bağlı değişimi.

Likit limite bağlı olmak koşulu ile aşırı konsolidasyon oranı ile $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı arasındaki ilişkiyi tanımlamak üzere

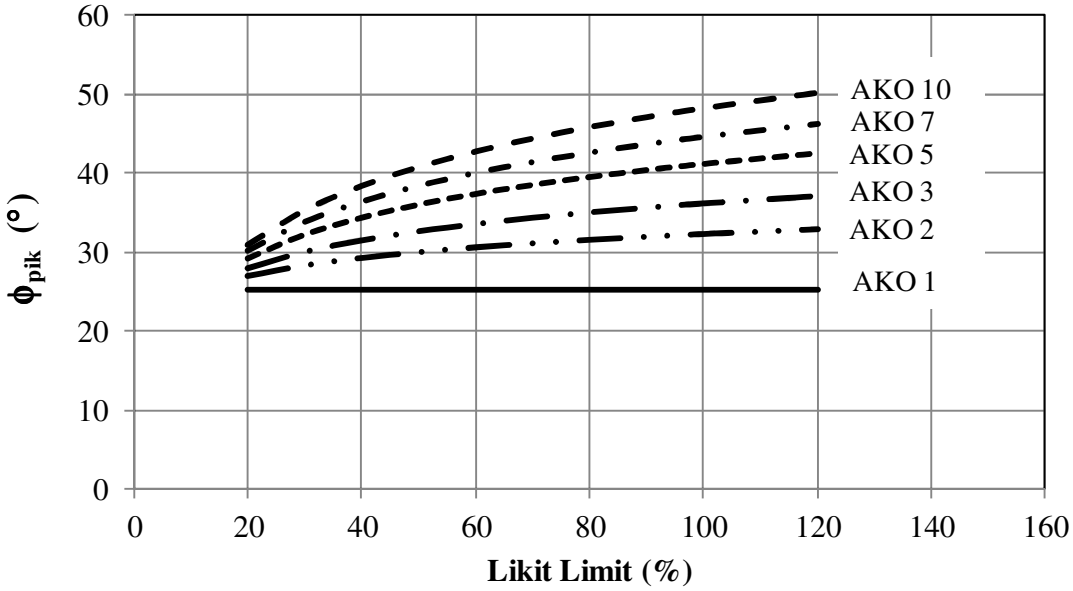
$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = (0.0626 \times w_L^{0.8437}) \times AKO^{(0.0016 \times w_L + 0.1837)} \quad \textbf{(5.29)}$$

şeklinde bir fonksiyon türetilmiştir.

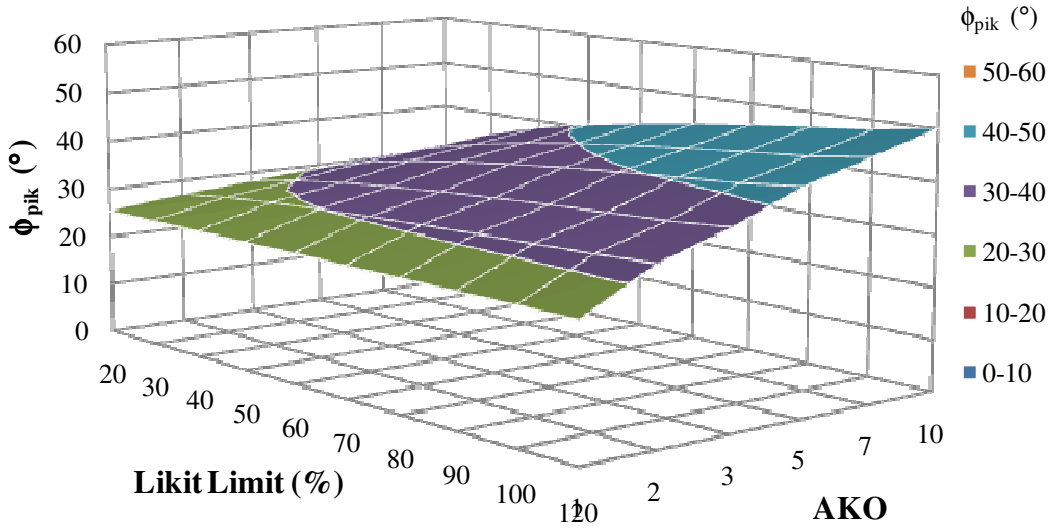



**Şekil 5.51 :** "t ($\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$)" değerlerinin likit limite bağlı değişimi.

Yapılan deney sonuçlarına göre kil yüzdesi, plastik limit ve ince dane oranı gibi zemin özelliklerine bağlı olarak aşırı konsolidasyon oranı ile kayma mukavemeti arasındaki ilişkiler incelenmiş, ancak elde edilen sonuçlar kalıcı kayma mukavemeti ile bu zemin özellikleri ilişkilerinde olduğu gibi dağınık yerleşimlere sahip olduğundan bu çalışma kapsamında yer verilmemiştir. Aşırı konsolidasyon oranına bağlı olmak üzere likit limit ile $\phi_{pik}$ değerlerinin değişimleri iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey grafiği olarak sırasıyla Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'te verimiştir.

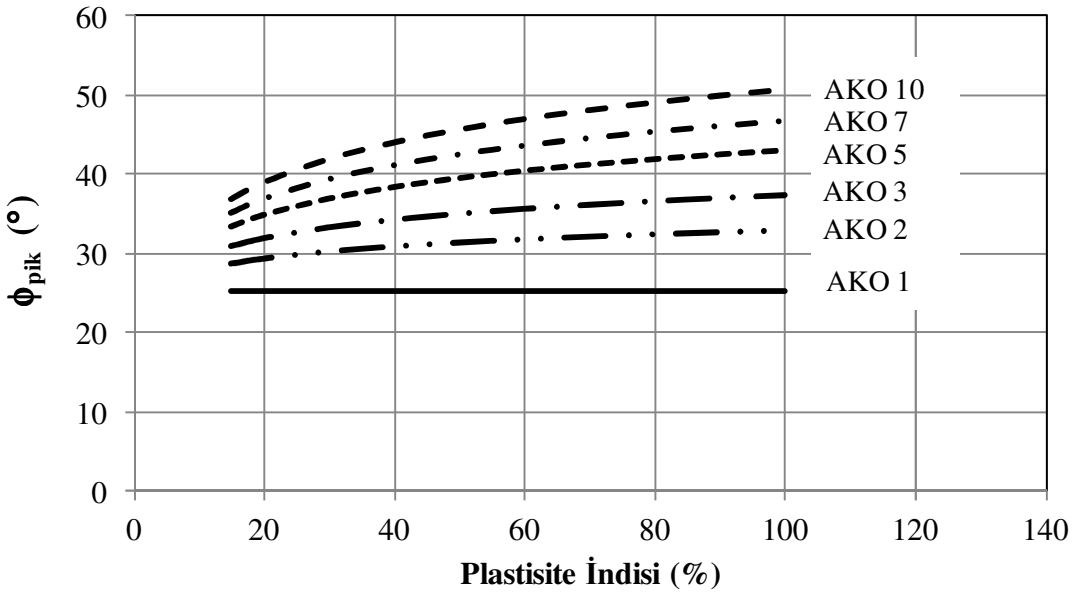



**Şekil 5.52 :** $\phi_{pik}$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

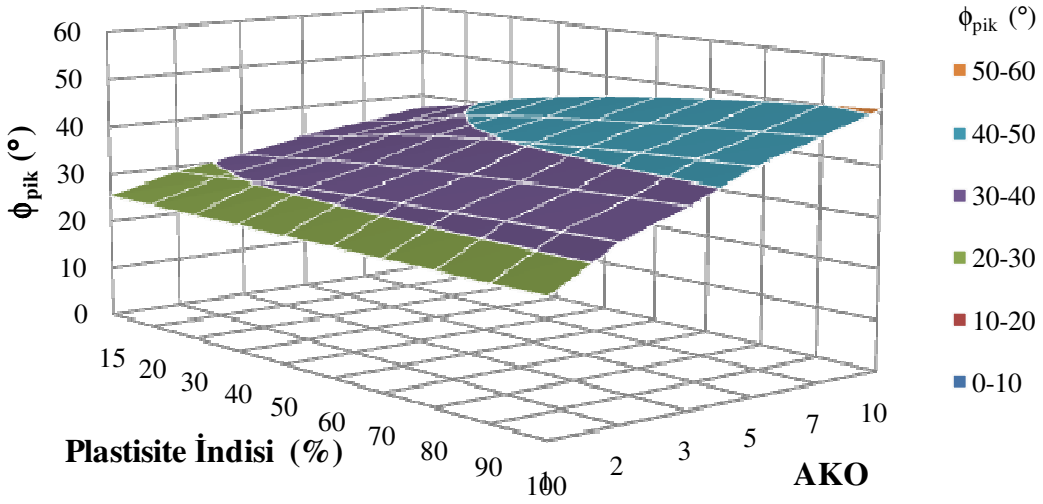



**Şekil 5.53 :** $\phi_{pik}$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

Grafiklerde bu çalışmada yeralan numunelere ait veri aralıkları sınır değerler olarak seçilmiştir. Aşırı konsolidasyon oranına bağlı olmak üzere plastisite indisi ile $\phi_{pik}$ değerlerinin değişimleri iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey grafiği olarak sırasıyla Şekil 5.54 ve Şekil 5.55'te verimiştir.

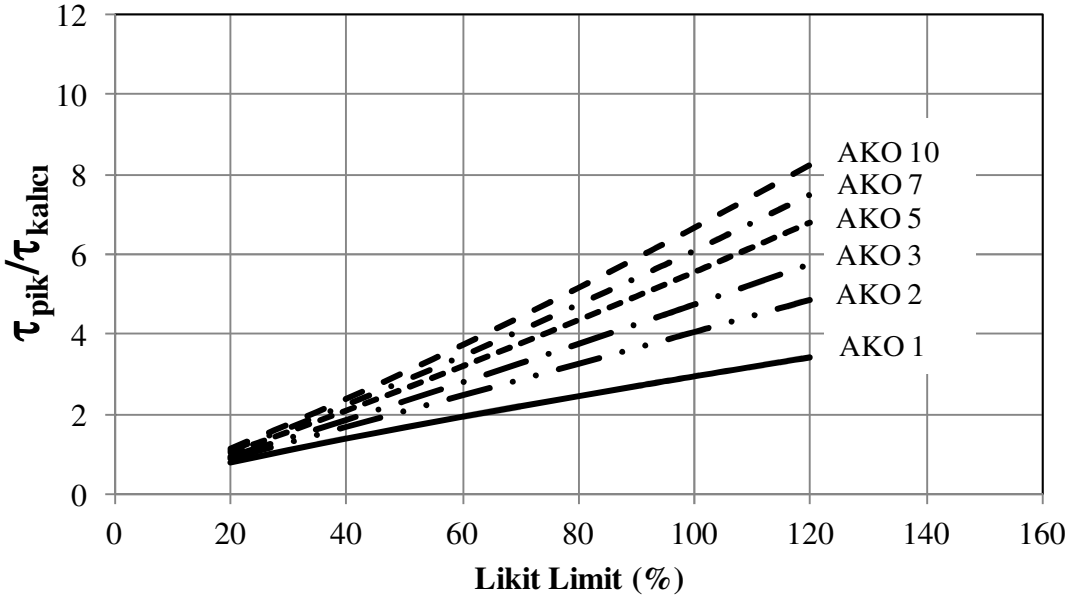



**Şekil 5.54 :** $\phi_{pik}$ değerlerinin plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

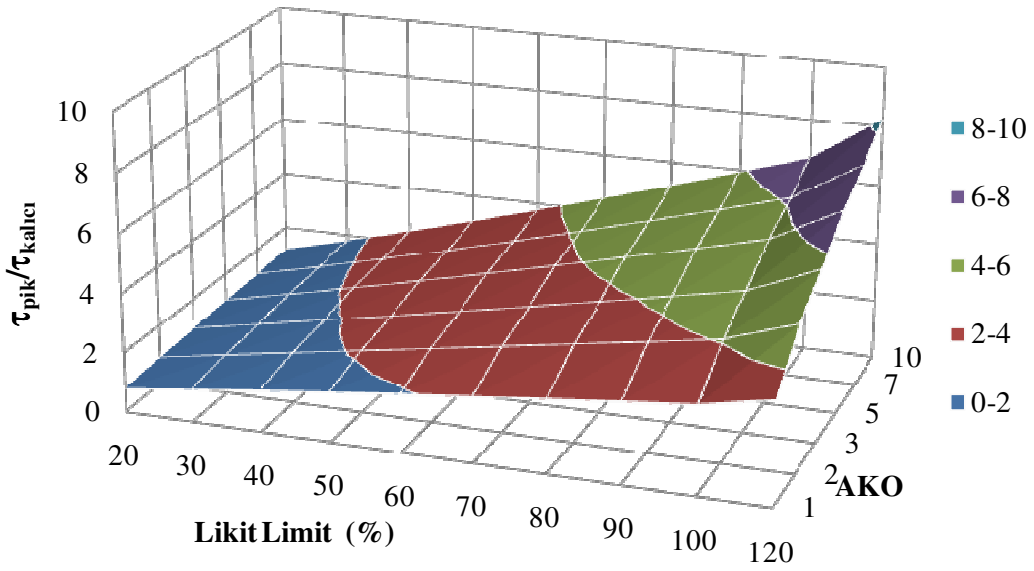



**Şekil 5.55 :** $\phi_{pik}$ değerlerinin plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

Likit limit ile $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı arasında aşırı konsolidasyon oranına bağlı olmak üzere türetilen logaritmik fonksiyonun iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey grafiği olarak sırasıyla Şekil 5.56 ve Şekil 5.57'de verilmiştir.

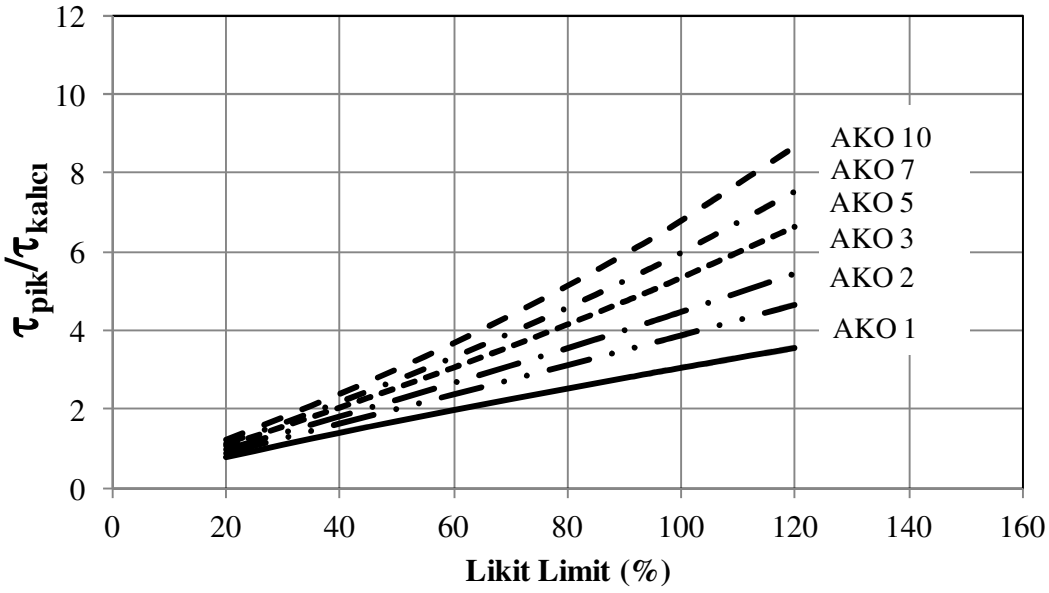



**Şekil 5.56 :** $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ değerlerinin logaritmik denklem kullanılarak likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

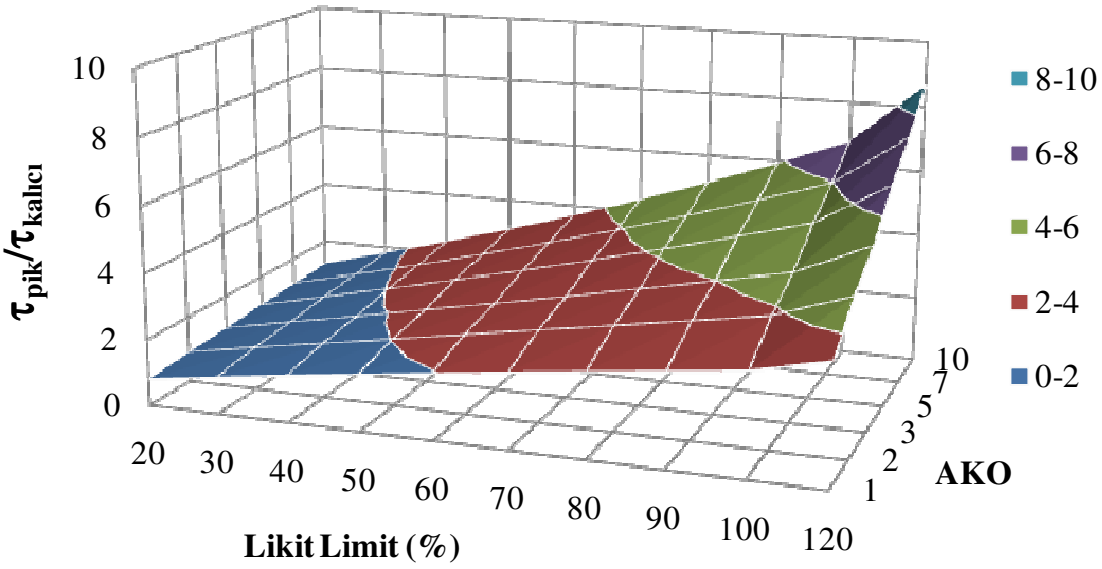



**Şekil 5.57 :** $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişiminin logaritmik denklem kullanılarak elde edilen yüzey grafiği.

Likit limit ile $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı arasında aşırı konsolidasyon oranına bağlı olmak üzere türetilen üslü fonksiyonun iki boyutlu ve üç boyutlu yüzey grafiği olarak sırasıyla Şekil 5.58 ve Şekil 5.59'da verilmiştir.




**Şekil 5.58 :** $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ değerlerinin üslü denklem kullanılarak likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

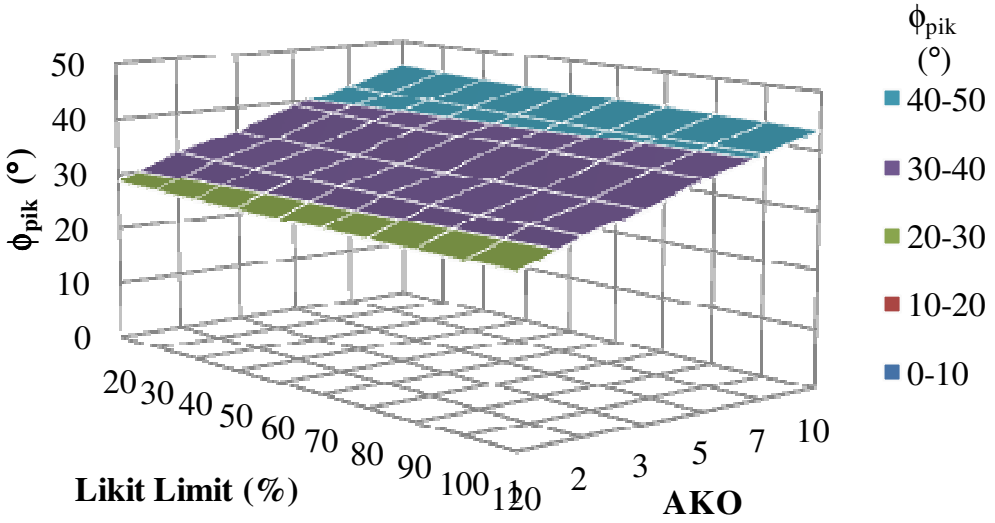



**Şekil 5.59 :** $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ değerlerinin likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişiminin üslü denklem kullanılarak elde edilen yüzey grafiği.

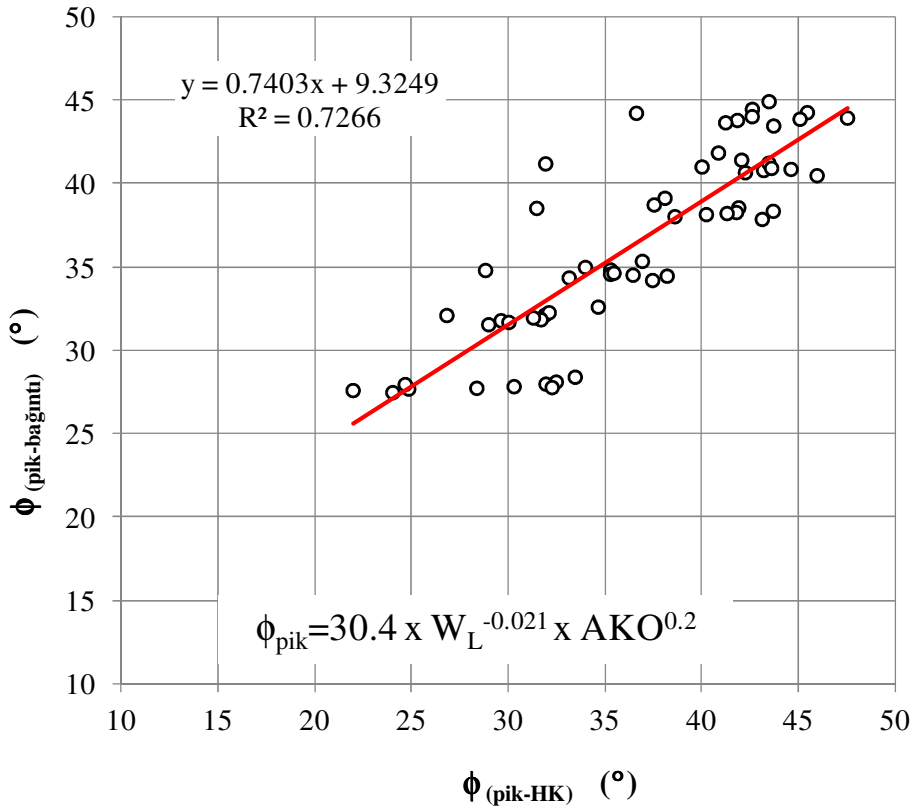
Aşırı konoslidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti ve pik kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapılan deney sonuçları yukarıda verilen analizler dışında ikili regresyon şeklinde üslü ifadeler kullanılarak ta değerlendirilmiştir. Bu kapsamda likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olmak koşulu ile pik kayma mukavemeti açısının değişimi için

$$\phi_{pik} = 30.4 \times W_L^{-0.021} \times AKO^{(0.2)} \qquad \textbf{(5.30)}$$

şeklinde bir korelasyon elde edilmiştir. Bu bağıntının yüzey grafiği Şekil 5.60'ta verilmiştir. Bağıntı kullanılarak elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile deney sonuçlarından elde edilen pik kayma mukavemeti açıları karşılaştırıldığında ise Şekil 5.61'de verilen grafik ortaya çıkmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi iki değer arasında lineer regresyon sonucunda belirleme katsayısı $R^2$=0.73 gibi bir değer almaktadır. Bu değer önce elde edilen likit limit, AKO ve pik kayama mukavemeti açısı arasında elde edilen belirleme katsayısına ($R^2$=0.64) göre daha iyi bir belirleme katsayısına sahip olmakla birlikte daha kısa ve kolay kullanılabilir olması bir diğer avantajıdır.




**Şekil 5.60 :** Pik kayma mukavemeti açılarının ($\phi_{pik}$) ikili regresyona göre likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

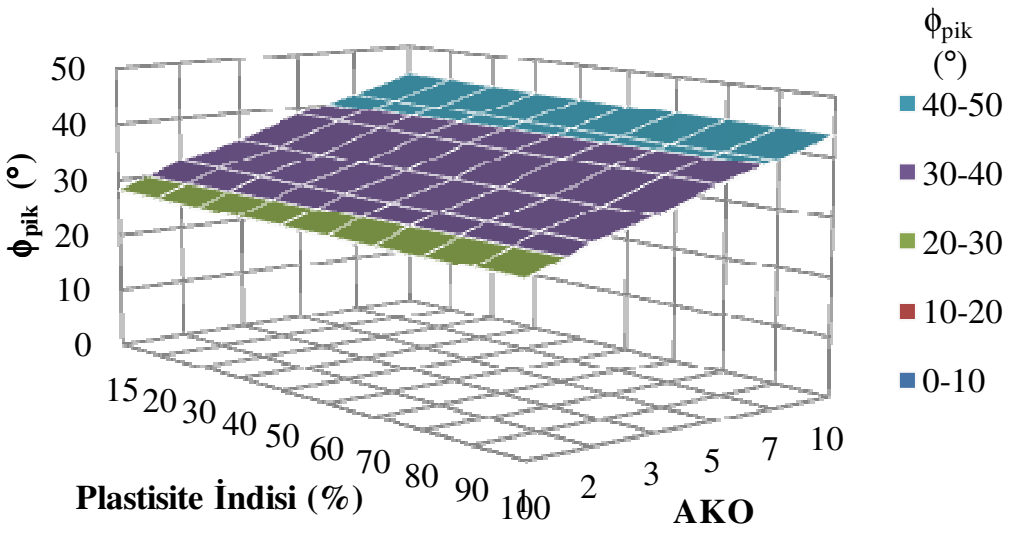



**Şekil 5.61 :** Deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile geliştirilen likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen pik kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması.

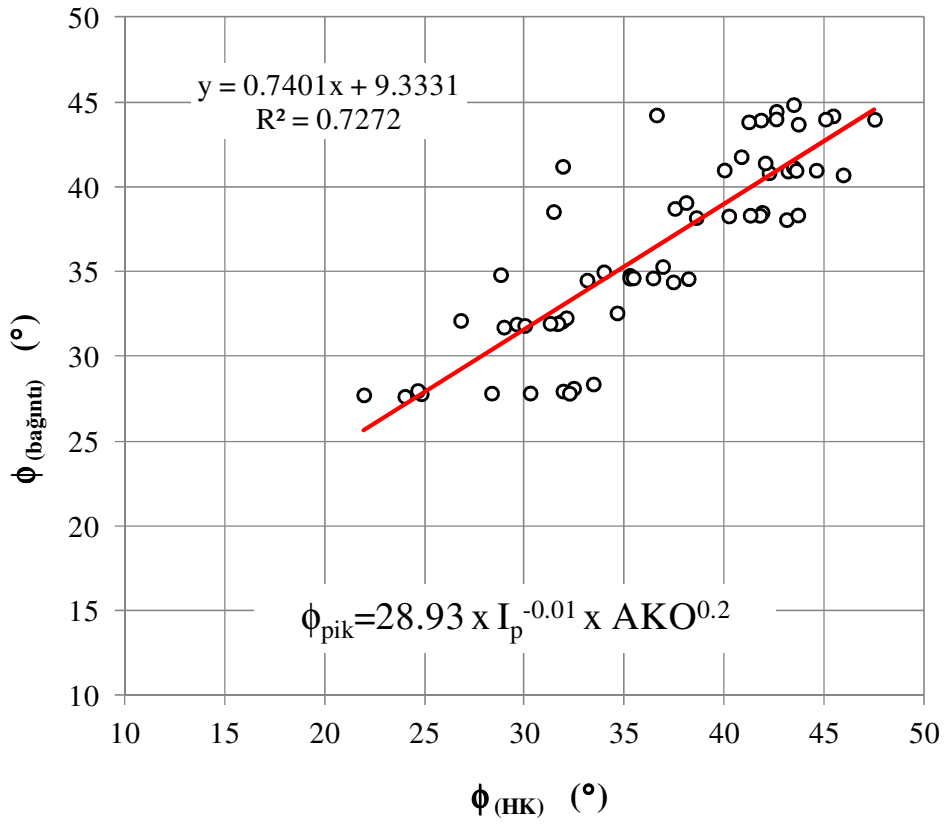
Üslü ifade kullanılarak bu defa plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon arasında ikili regresyon analizi yapıldığı takdirde aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir. Likit limit kullanılarak bağıntıya benzer bir denklem olmakla birlikte katsayılarda değişiklikler bulunmaktadır.

$$\phi_{pik} = 28.93 \times I_P^{-0.01} \times AKO^{0.2} \qquad \textbf{(5.31)}$$

Bu denklemin belirleme katsayısı ise yaklaşık % 73 olarak elde edilmiştir. Plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı geliştirilen diğer denklemin belirleme katsayısı ise % 64 olduğundan bu bağıntı daha iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 5.62'de bağıntının yüzey grafiği Şekil 5.63'te ise deney sonucundan elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile karşılaştırılması verilmiştir. İkili regresyon kullanılarak üslü ifade ile plastik limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak pik kayma mukavemeti açısı bağıntısı aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



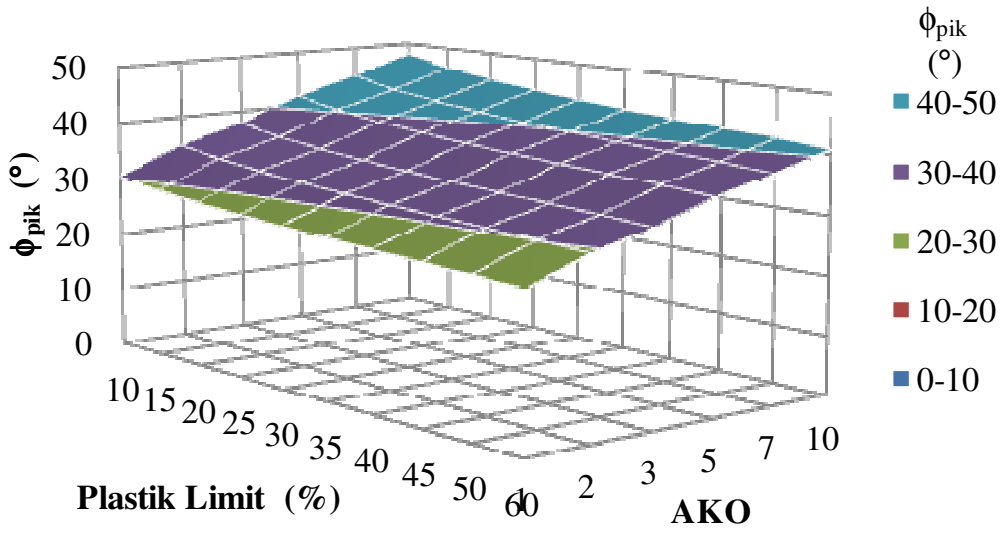

**Şekil 5.62 :** Pik kayma mukavemeti açılarının ($\phi_{pik}$) ikili regresyona göre plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.




**Şekil 5.63 :** Deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile geliştirilen plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen pik kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması.

$$\phi_{pik} = 37.22 \times W_P^{-0.089} \times AKO^{0.2} \quad \textbf{(5.32)}$$

Bu bağıntıda $R^2$= % 73 olarak belirlenmiştir. Plastik limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak pik kayma gerilmesinin yüzey grafiği Şekil 5.64'te, bağıntıdan elde edilen değerlerin deney verileri ile kıyaslanması ise Şekil 5.65'te verilmiştir.

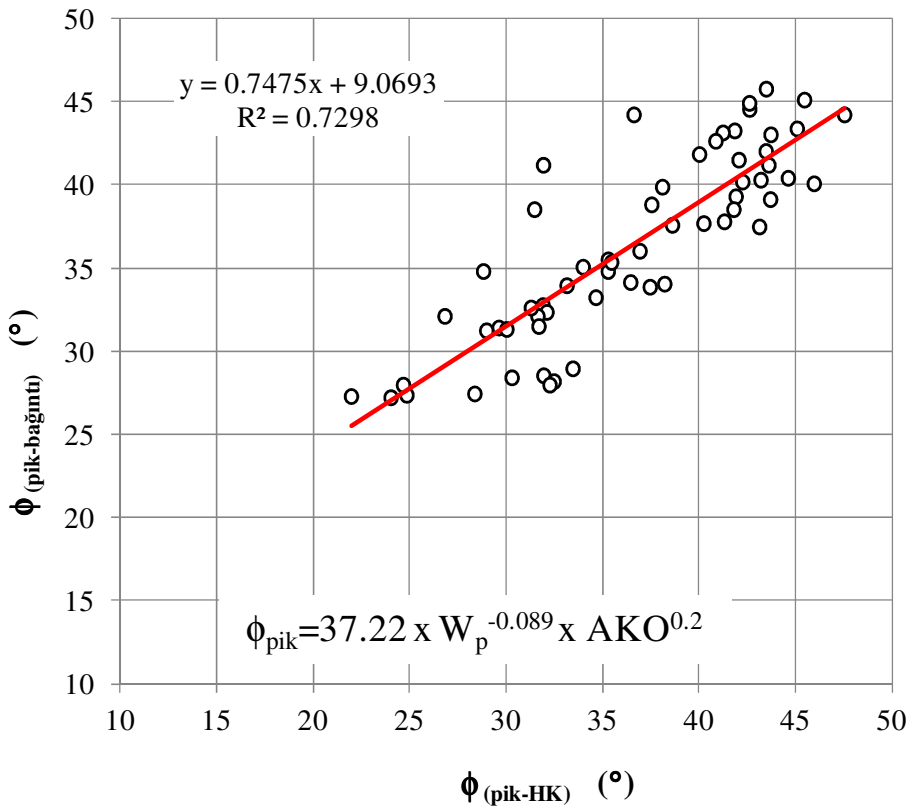



**Şekil 5.64 :** Pik kayma mukavemeti açılarının ($\phi_{pik}$) ikili regresyona göre plastik limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.

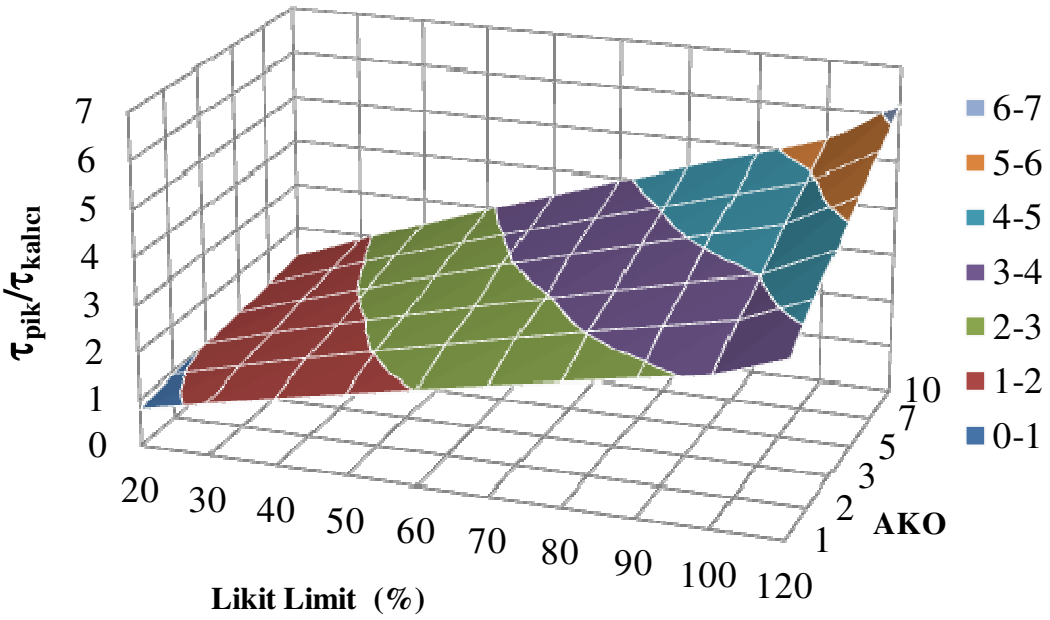
Pik kayma mukavemeti açısının yanında pik kayma gerilmelerinin kalıcı kayma gerilmelerine oranı şeklinde tanımlanan büyüklüğün aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimide bu çalışma kapsamında incelenmiş ve kıvam limitlerine bağlı çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Aynı kapsamda ikili regresyon ve üslü ifade kullanılarak söz konusu bağıntılara göre daha kullanışlı denklemler elde edilmiştir. Kayma gerilmelerinin oranı için likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak

$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.06 \times w_L^{0.855} \times AKO^{0.233} \quad \textbf{(5.33)}$$

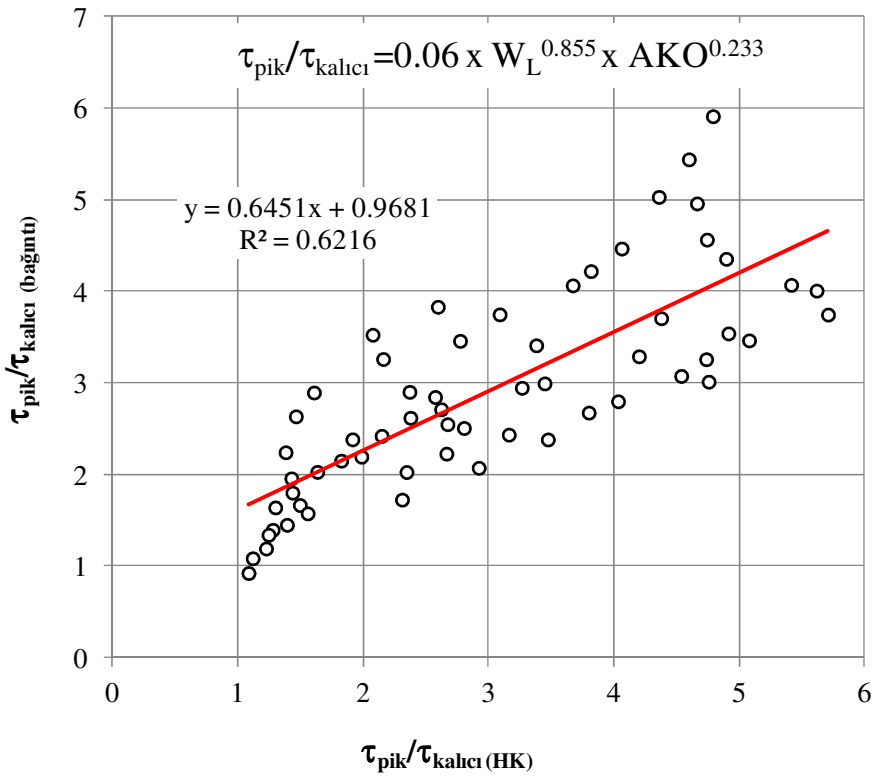
bağıntısı geliştirilmiştir. Bu bağıntı için $R^2$= % 62 olup bağıntının yüzey grafiği Şekil 5.66'da, deney sonuçları ile karşılaştırması ise Şekil 5.67'de verilmiştir. Bu kapsamda daha önce verilen bağıntıların belirleme katsayılarına yakın bir değere sahip olsa da daha kısa ve kullnışlı bir ifade olması nedeniyle tercih edilebilir.




**Şekil 5.65 :** Deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açıları ile geliştirilen plastik limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen pik kayma mukavemeti açılarının karşılaştırılması.




**Şekil 5.66 :** Kayma gerilmelerinin oranın ($\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$) ikili regresyona göre likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.




**Şekil 5.67 :** Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi oranları ile geliştirilen likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen kayma gerilmesi oranlarının karşılaştırılması.

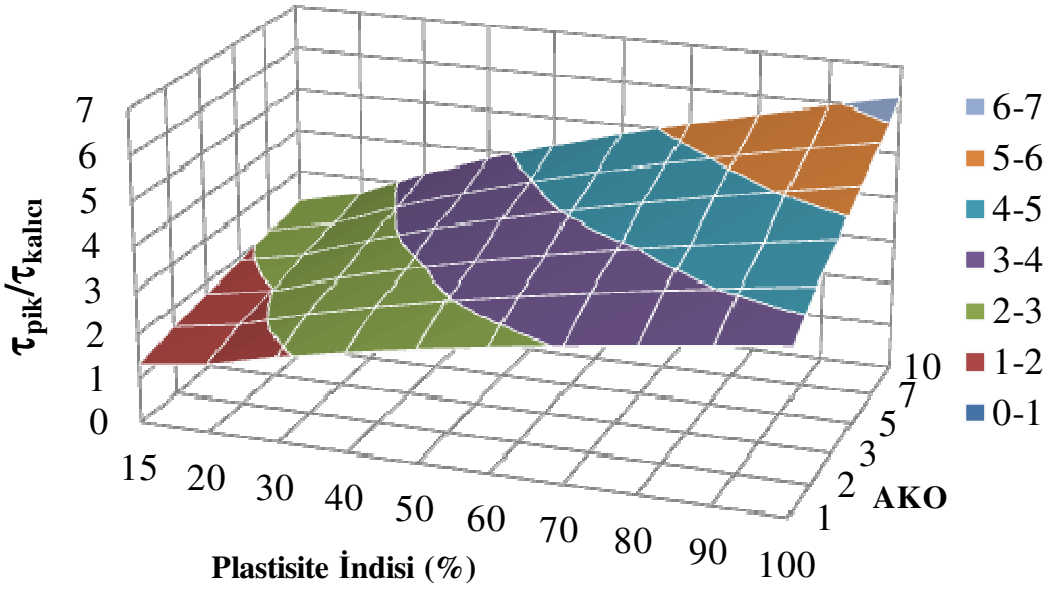
Aynı şekilde kayma gerilmelerinin oranının plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi için üslü ifade olmak üzere ikili regresyon ile aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.3 \times I_p^{0.54} \times AKO^{0.233} \qquad \textbf{(5.34)}$$

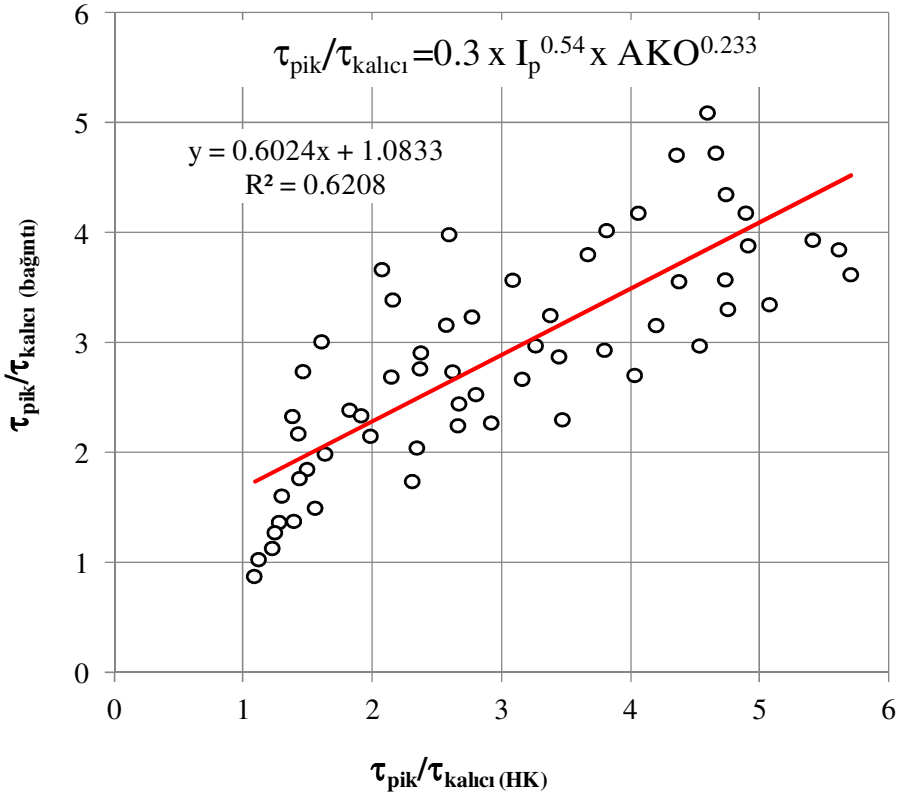
Bu bağıntı için $R^2$= % 62 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.68'de geliştirilen bağıntının yüzey grafiği verilmiştir. Şekil 5.69'da ise yapılan deney sonuçlarından elde edilen değerlerle bağıntıdan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

On farklı numune üzerinde yapılan deney sonuçları ile elde edilen bağıntıların karşılaştırılması amacıyla farklı aşırı konsolide oranlarında hazırlanan numunelere ait pik kayma mukavemeti açılarının sırasıyla likit limit ve plastisite indisi ile değişimleri Şekil 5.70 ve Şekil 5.71'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde 1'den büyük aşırı konsolidasyon oranlarında bir uyum görülürken, aşırı konsolidasyon oranının 1 değeri için uyumsuzluk söz konusudur. Bunun nedeni aşırı konsolidasyon oranı bir olan numunelerde numune hazırlık prosedürü nedeni ile uygulamada aşırı

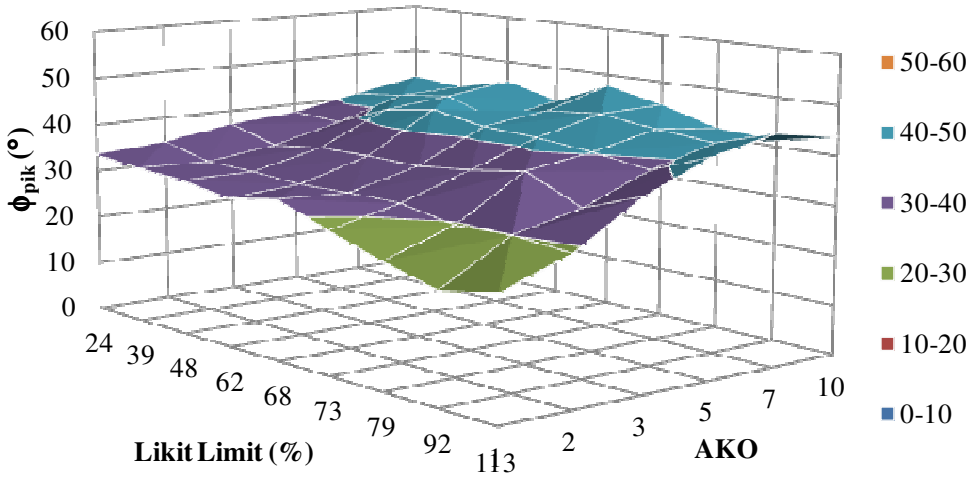
konsolidasyon oranının birden büyük bir değer alması, bu sebeple elde edilen mukavemetlerin beklenenden yüksek çıkmasıdır.



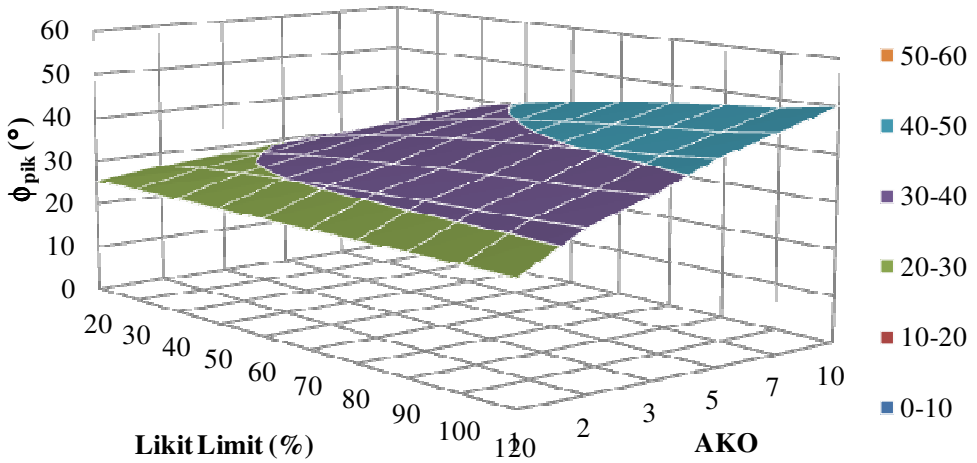

**Şekil 5.68 :** Kayma gerilmelerinin oranın ($\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$) ikili regresyona göre plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı değişimi.



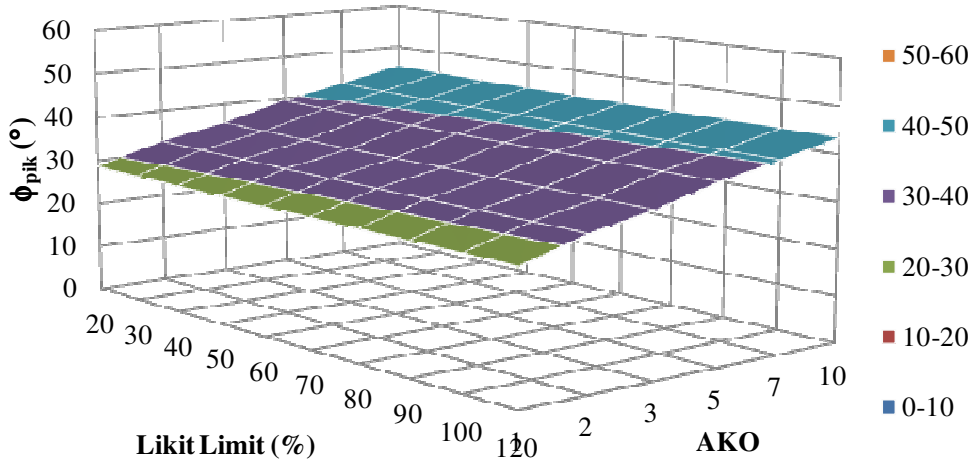

**Şekil 5.69 :** Deney sonucunda elde edilen kayma gerilmesi oranları ile geliştirilen plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıdan elde edilen kayma gerilmesi oranlarının karşılaştırılması.




*Halka kesme deney verileri*

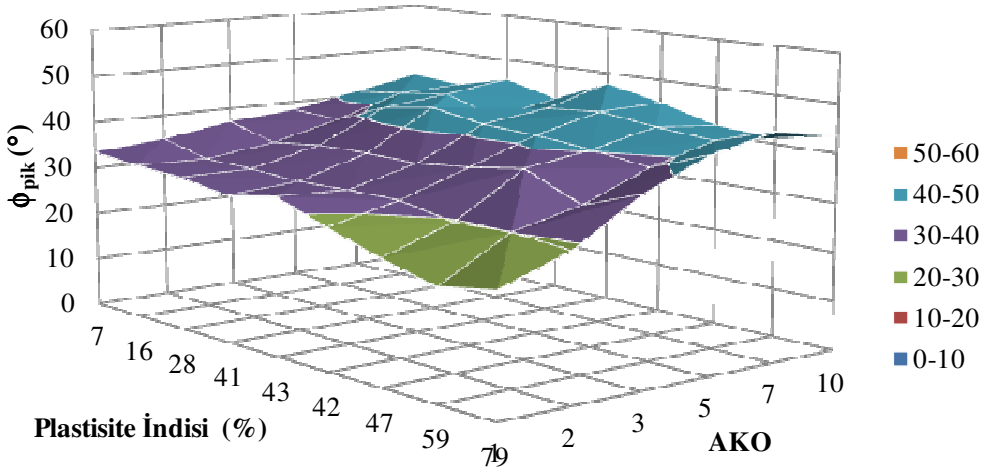



$$\phi_{pik} = [(4.6418 \times \ln(w_L) - 11.478) \times ln(AKO)] + 25.3$$

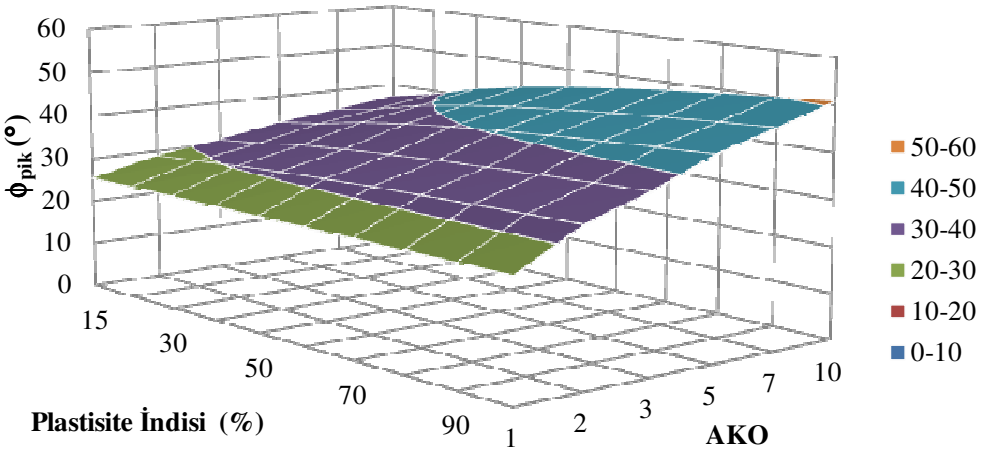



$$\phi_{pik} = 30.4 \times W_L^{-0.021} \times AKO^{(0.2)}$$

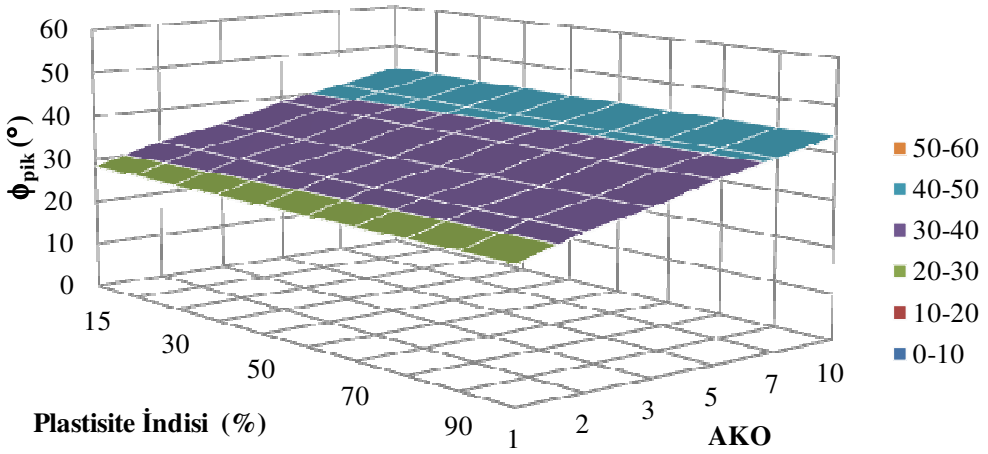
**Şekil 5.70 :** $\phi_{pik}$ için likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntıların deney verileri ile karşılaştırılması.




*Halka kesme deney verileri*




$$\phi_{pik} = \left[\left(3.1486 \times \ln\left(I_p\right) - 3.4526\right) \times ln(AKO)\right] + 25.3$$




$$\phi_{pik} = 28.93 \times I_P^{-0.01} \times AKO^{0.2}$$

**Şekil 5.71 :** $\phi_{pik}$ için plastisite indisi ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar ile deney verilerinin karşılaştırması.

Aynı karşılaştırma kayma gerilmelerinin oranı $(\tau_{pik}/\tau_{kalıcı})$ içinde yapımış ve sonuçlar Şekil 5.72 ve Şekil 5.73'te verilmiştir. Şekil 5.72'de türetilen logaritmik ifade ile gerçek değerler $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranının likit limite bağlı olarak aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi açısından karşılaştırılırken, Şekil 5.73'te aynı karşılaştırma türetilmiş olan üslü ifade ile yapılmıştır.

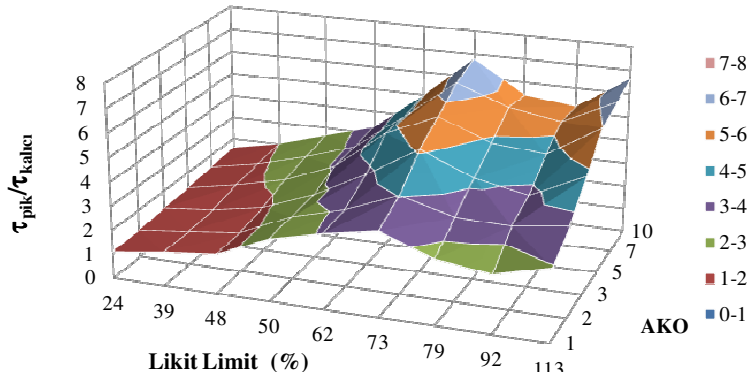
Şekil 5.70 ve Şekil 5.71'de genel trende göre aykırılık gösteren H3 numunesi grafik dışında tutulmuştur. Aynı şekilde Şekil 5.72 ve Şekil 5.73'de ise H8 numunesi diğer numune sonuçlarına göre gösterdiği farklılıklar nedeni ile grafik dışında tutulmuştur.

Çizelge 5.4'te aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak pik kayma mukavemeti açısı $(\phi_{pik})$ için geliştirilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları özetlenmiştir. Çizelge 5.5'te ise kayma gerilmelerinin oranı $(\tau_{pik}/\tau_{kalıcı})$ için aşırı konsolidasyon oranına bağlı elde edilen denklemler ve korelasyon katsayıları özetlenmiştir. Kullanım kolaylığı ve korelasyon katsayıları göz önüne alındığında üslü ifade şeklinde geliştirilen denklemlerin daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

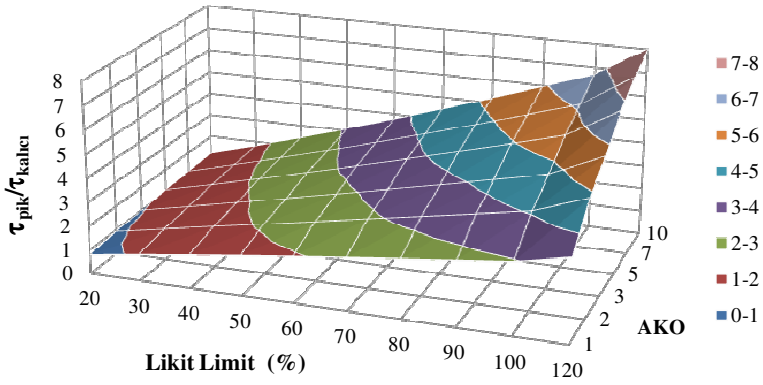
$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı üzerine yapılan değerlendirmeler doğal olarak 50 kPa düşey gerilme altında yapılan halka kesme deney sonuçlarına bağımlıdır, dolayısı ile düşey gerilme seviyesine bağlı hesaplamalardır. Düşey gerilme seviyesinin etkisi olup olmadığını tespit etmek amacıyla H8 numunesi üzerinde aşırı konsolidasyon oranların 1, 3 ve 5 değerleri için 100 kPa düşey gerilme altında halka kesme deneyleri de yapılmıştır.

**Çizelge 5.4 :** Pik kayma mukavemeti açısı $(\phi_{pik})$ için önerilen aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar.

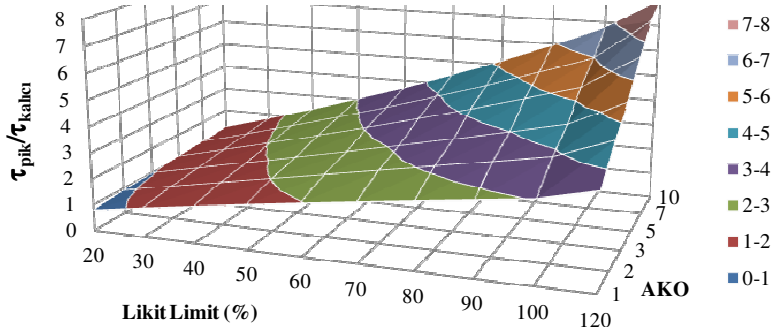
| Değişkenler | Bağıntı | Korelasyon katsayısı (R) |
|---|---|---|
| Likit Limit - AKO | $\phi_{pik} = [(4.6418 \times \ln(w_L) - 11.478) \times ln(AKO)] + 25.3$ | 0.803 |
| | $\phi_{pik} = 30.4 \times W_L^{-0.021} \times AKO^{(0.2)}$ | 0.852 |
| | $\phi_{pik} = 26.7 \times AKO^{(\frac{w_L^{0.4464}}{30})}$ | 0.830 |
| Plastisite İndisi - AKO | $\phi_{pik} = \left[\left(3.1486 \times \ln(I_p) - 3.4526\right) \times ln(AKO)\right] + 25.3$ | 0.797 |
| | $\phi_{pik} = 28.93 \times I_P^{-0.01} \times AKO^{0.2}$ | 0.853 |
| | $\phi_{pik} = 26.7 \times AKO^{(0.0731 * I_p^{0.3})}$ | 0.834 |
| Plastik Limit - AKO | $\phi_{pik} = 37.22 \times W_P^{-0.089} \times AKO^{0.2}$ | 0.854 |



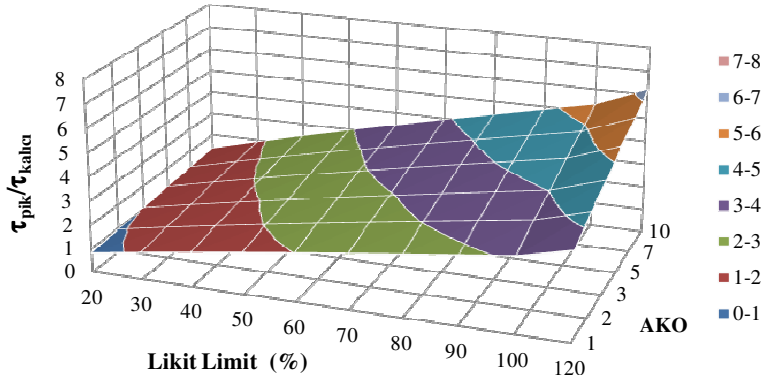

*Halka kesme deney verileri*




$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = \left[\left(w_L^{1.4058}/400\right) \times ln(AKO)\right] + (0.0656 \times w_L^{0.8264})$$




$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = (0.0626 \times w_L^{0.8437}) \times AKO^{(0.0016 \times w_L + 0.1837)}$$



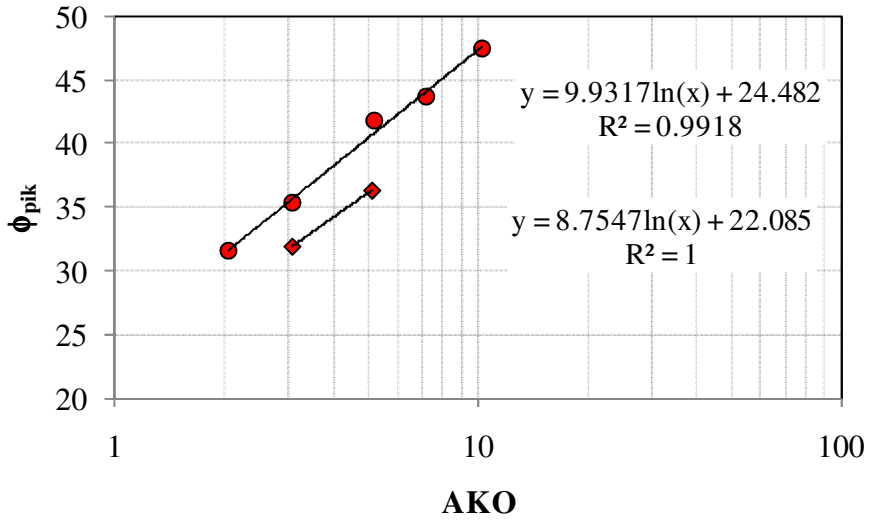

$$\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.06 \times w_L^{0.855} \times AKO^{0.233}$$

**Şekil 5.72 :** $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı için likit limit ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar ile deney verilerinin karşılaştırması.

**Çizelge 5.5 :** Kayma gerilmelerinin oranı $(\tau_{pik}/\tau_{kalıcı})$ için önerilen aşırı konsolidasyon oranına bağlı bağıntılar.

| Değişkenler | Bağıntı | Korelasyon katsayısı (R) |
|---|---|---|
| Likit Limit - AKO | $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = \left[\left(w_L^{1.4058}/400\right) \times ln(AKO)\right] + (0.0656 \times w_L^{0.8264})$ | 0.775 |
| | $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.06 \times w_L^{0.855} \times AKO^{0.233}$ | 0.788 |
| | $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = (0.0626 \times w_L^{0.8437}) \times AKO^{(0.0016 \times w_L + 0.1837)}$ | 0.789 |
| Plastisite İndisi - AKO | $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.3 \times I_p^{0.54} \times AKO^{0.233}$ | 0.788 |

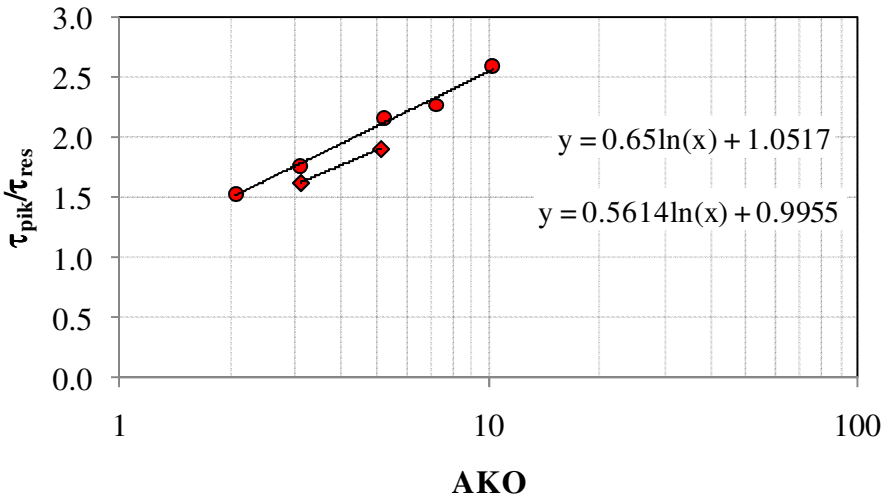
Şekil 5.73'te bu deney sonucunda elde edilen pik kayma mukavemeti açısı ile aşırı konsolidasyon oranı değişimleri verilmiştir.




**Şekil 5.73 :** H8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen kayma mukavemeti açıları.

Şekil 5.73'te görüldüğü gibi 50 kPa düşey altında yapılan deney sonuçları ile 100 kPa düşey gerilme altında yapılan deney sonuçlarının logaritmik eksendeki eğimleri birbirine çok yakın değerler almıştır. Denklemin sabit sayısında ise küçük bir fark bulunmaktadır. Her iki düşey gerilme seviyesi için aşırı konsolidasyon oranının "1" değeri için elde edilen deney verileri homojenlik açısından analiz dışında bırakılmıştır.

Bu noktada karşılaşılan sınırlayıcı durum deney aletinde erişilen maksimum düşey gerilme seviyesi nedeni ile 100 kPa düşey gerilme altında yapılabilen deney sayısı nedeni ile az veri olmasıdır. Aynı benzerlik $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı}$ oranı içinde geçerli olup, kayma mukavemetleri oranının aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi Şekil 5.74'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere denklemin katsayıları arasında ciddi oranda bir yakınlık sözkonusudur. Her iki denklem de aşırı konsolidasyon oranının "1" değeri için normal konsolide killer için beklendiği gibi pik mukavemet ile kalıcı mukavemet eşit olmaktadır.




**Şekil 5.74 :** H8 numunesinin farklı aşırı konsolidasyon oranları için elde edilen kayma mukavemeti oranları.

# 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zeminlerde bir düşey gerilme altında deformasyonun artışıyla büyük şekil değiştirmeler sonrasında değişmeden sabit kalan en düşük kayma gerilmesi değerine kalıcı kayma mukavemeti adı verilmektedir. Aşırı konsolide fisürlü killerden oluşan şevlerin stabilite hesaplarında ve bu tür zeminlerde yapılacak mühendislik yapılarının tasarımında kalıcı kayma mukavemeti parametreleri büyük önem kazanmaktadır. Kalıcı kayma mukavemetine mineralojik yapı, dane şekli, efektif normal gerilme seviyesi ve kesme hızı gibi faktörler etki etmektedir. Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesinde ülkemizde yaygın olarak kesme kutusu deney yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, numune bir düzlem üzerinde drenajlı olarak kesilmekte ve kalıcı kayma gerilmesine ulaşıncaya kadar deney tekrarlanmaktadır. Bu nedenle kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan bu yöntem Tekrarlı Kesme Kutusu olarak bilinmektedir. Kullanım kolaylığı ve deney düzeneğinin yaygın olarak bulunması gibi üstünlükleri olan tekrarlı kesme kutusu deneyinin sınırlayıcı yanları bulunmaktadır. Deney sırasında deformasyona bağlı olarak kesme yüzeyinin kesit alanının sabit olmaması ve tekrarlar nedeniyle numunenin geri çekilmesi esnasında oluşan kayma yüzeyinin yapısının bozulması bu sınırlayıcı yanların başında gelmektedir. Göçmeye ulaşmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının belirsiz olması, zemin numunesi hangi hızla kesilirse kesilsin drenaj şartlarının tam olarak belirlenememesi, boşluk suyu basınçlarının ölçülememesi, numune sınırlarında oldukça fazla gerilme yığılmalarının oluşması nedeniyle kırılma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması ve kesme işlemi sırasında zorlanan kayma yüzeyinin zeminin en zayıf kayma yüzeyi olmama ihtimali tekrarlı kesme kutusu deneyinin sakıncalı yanları olarak sayılabilir.

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi için kullanılan diğer bir yöntem ise konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyidir (CD). Bu yöntemde silindirik numuneler belirlenen çevre basınçlarında drenajlı olarak kesilmekte ve kalıcı kayma mukavemeti parametreleri belirlenmektedir. Boşluk suyu basıncı oluşmayacak şekilde çok yavaş hızda yapılan drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde, en büyük

kayma gerilmesine ulaşıldıktan sonra numuneye uygulanabilir şekil değiştirmeler sınırlı kalmaktadır. Bu deney yönteminin en zayıf yönlerinden biri olan sınırlı şekil değiştirme miktarı nedeniyle kalıcı kayma gerilmesinin oluşması için gerekli yerdeğiştirme yapılmaması yanıltıcı parametrelerin elde edilmesine sebep olabilmektedir. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri sırasında konsolidasyon aşaması, deney öncesi numunede gerekli doygunluk seviyesinin sağlanması ve yavaş kesme hızları nedeniyle kesme işleminin uzun olması bu deney yöntemi için gerekli sürenin artmasına sebep olmaktadır. Ancak bir üstün yan olarak drenaj kontrol edilebilmekte ve boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir.

Kalıcı kayma mukavemetinin belirlemede bir diğer yöntem ise bu çalışma kapsamında yapılan laboratuvar deneylerine temel teşkil edene halka kesme deneyidir. Bu yöntemde halka şeklindeki numune düşeyde ortasından geçen bir düzlem üzerinde sürekli olarak açısal yerdeğiştirme ile kesilmekte ve kalıcı kayma gerilmelerine ulaşılmaktadır. Deney yöntemleri içinde üstünlükleri nedeni ile halka kesme deneyi en iyi sonucu veren deney sistemi olarak görülmektedir. Bu üstünlükler numuneye uygulanabilir yerdeğiştirmenin sınırsız olması, numunenin kesit alanının sabit olması, dolayısı ile üniform düşey gerilme dağılımının sağlanması ve şev stabilitesi problemlerinde kayma yüzeylerinde oluşan rotasyonal kaymanın daha iyi modellenmesi olarak sayılabilir. Deney düzeneğinin yaygın olmaması, genellikle örselenmiş numune kullanımı ve boşluk suyu basınçlarının ölçülememesi ise sınırlayıcı yanları olarak görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında ince daneli zeminlerin kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin farklı deney yöntemleri ile belirlenmesi, kalıcı kayma mukavemetine etki eden faktörlerin incelenmesi ve deney yönteminin kalıcı kayma mukavemetine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda hazırlanmış numuneler üzerinde halka kesme, tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerine aşırı konsolidasyon oranının, kesme hızının, kıvam limitlerinin, ince dane yüzdesinin, kil yüzdesinin ve aktivitenin etkisi incelenmiş ve pratik amaçlar doğrultusunda kullanılabilecek bağıntılar geliştirilmiştir.

Kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini halka kesme deneyi ile belirleyebilmek için İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarında bulunan sistemin kesme hızı 1000 kat

düşürülerek standartlara uygun deney yapılabilir duruma getirilmiştir. Ayrıca deney düzeneğine elektronik veri toplama ünitesi ve yazılımı ilave edilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler, bu çalışma kapsamında imal edilmiş olan ölü yük veya hava basıncı ile çalışabilen konsolidometrelerde ve Rowe hücresi yardımı ile hazırlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında killi zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin belirlenmesi ve kalıcı kayma mukavemetine etkiyen parametrelerin incelenmesi amacıyla 50 adet hazırlanmış numune üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile killi zeminlerin farklı deney yöntemleri ile kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi ve kalıcı kayma mukavemeti ile çeşitli zemin özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu numunelerin tamamında halka kesme deneyi, 44 tanesinde tekrarlı kesme kutusu deneyi ve 12 tanesinde ise konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bunlara ek olarak 25 numune üzerinde standart kesme kutusu deneyleri de yapılmıştır. Çalışmada kullanılan zemin numunelerinin likit limiti % 24 ile % 340 arasında, plastisite indisi ise % 7 ile % 297 arasında, kil yüzdesi % 5 ile % 100 ve ince dane oranları % 65 ile % 100 arasında değişmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ile çeşitli zemin özellikleri arasında ilişkiler incelenmiştir.

Kalıcı kayma mukavemetine kesme hızının etkisinin belirlenmesi amacıyla öncelikle farklı numuneler üzerinde 0.02 mm/dak, 0.2 mm/dak ve 2 mm/dak olmak üzere farklı kesme hızlarında ve 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa olmak üzere üç farklı düşey gerilme altında halka kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme hızının kalıcı kayma mukavemtine etkisini incelemek yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır,

- Genel olarak kesme hızının artışı ile kalıcı kayma mukavemeti artmaktadır. Ancak bu artış kullanılan kesme hızları için kalıcı kayma mukavemeti açısında maksimum olarak yaklaşık % 5 gibi bir fark yaratmaktadır.
- Kesme hızındaki değişimin kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisi özellikle 1 mm/dak değerinden daha yüksek kesme hızlarında belirgin olmaktadır. 1 mm/dak kesme hızından daha düşük kesme hızlarında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

- Literatürdeki bazı çalışmalarda görüldüğü gibi nadirende olsa bazen kesme hızının artışı kalıcı mukavemetin düşmesine sebep olabilmektedir.
- Kaolin için diğer numunelerden farklı olarak kesme hızının artışıyla kalıcı mukavemetinin de belirgin olarak arttığı gözlenmektedir. Kaolin minerali içeren numunenin davranışı Skempton (1985) ve Suzuki (2001) tarafından verilen yayınlarla da benzerlik göstermektedir.

Çalışma kapsamında numunelerin kalıcı kayma mukavemetleri farklı deney yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu sayede deney yönteminin kalıcı kayma mukavemetine etkisi incelenmiştir.

- Deney yönteminin kalıcı kayma mukavemetine belirgin bir şekilde etkisi olduğu görülmektedir.
- Çalışmada kullanılan deney yöntemlerinden en düşük kalıcı kayma mukavemeti açıları halka kesme deneyi ile elde edilmiştir.
- En yüksek kalıcı kayma mukavemeti açıları ise konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi ile elde edilmiştir. Bu durumun bu deney yönteminde erişilebilen yerdeğiştirme miktarının sınırlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti açıları diğer iki deney yönteminin arasında kalmaktadır.
- Genel bir ifade olarak tekrarlı kesme kutusu deneyi sonucunda, halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerlerinden yaklaşık 2° daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir.
- Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda, tekrarlı kesme kutusu deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerlerinden yaklaşık 5° daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir.
- Aynı şekilde konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucunda, halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma mukavemeti değerlerinden yaklaşık 6.5° daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açıları elde edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sayısının diğer deney yöntemlerinin sayısına göre daha az olması

nedeni ile konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları ile diğer deney yöntemleri kıyaslanırken bu durumun göz önüne alınması daha doğru olacaktır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametrelerinin kıvam limitleri ile değişimleri incelenmiştir. Bu aşamada literatürde sıklıkla karşılaşılan likit limit ve plastisite indisi ilişkilerinin yanında plastik limit ile kalıcı kayma mukavemeti ilişkisi incelenmiştir. Literatürde verilen kıvam limitleri kalıcı kayma mukavemeti ilişkileri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit, plastik limit, plastisite indisi, gibi çeşitli zemin özellikleri arasında yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişkiler belirlenmiştir. Kalıcı kayma mukavemeti açısının mineralojik faktörlere bağlı değişimi incelenerek pratik amaçlar için geliştirilen çeşitli korelasyonlar arasında kalıcı kayma mukavemeti açısı ile likit limit ve plastisite indisi arasındaki ilişkilerin en güvenilir sonuçlar olduğu belirlenmiştir.

- Kıvam limitleri ile kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ilişkileri için temel bir sonuç olarak kıvam limiti değeri arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısı azalmaktadır.
- Likit limitin % 100 değerine kadar kalıcı kayma mukavemeti açısı hızla düşmektedir. Bu değerden sonra düşüş miktarının azaldığı ve asimptotik olarak sabit kaldığı görülmektedir.
- Plastisite indisi ile kalıcı kayma mukavemeti açısı ilişkisi likit limite bağlı değişime oldukça benzer sonuçlar vermektedir. Genel olarak plastisite indisinin artışı kalıcı mukavemetinin düşmesine sebep olmaktadır.
- Kalıcı kayma mukavemeti açısının plastik limit ile değişimi incelendiğinde ise daha farklı bir ilişki gözlenmektedir. Plastik limit arttıkça kalıcı kayma mukavemeti açısı düşmekte ancak herhangi bir asimptotik bir değere yaklaşma meydana gelmemektedir.
- Literatürde verilen birden fazla zemin parametresine bağlı korelasyonlar bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarına uygulanmış ancak uyumlu sonuçlar elde edilmemiştir. Bu farklılığın kullanılan zemin numunelerin minerolojik yapılarının sözü edilen çalışmalarda kullanılan numunelerin minerolojik yapılarından farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yapılan deney sonuçları sonucunda elde edilen kalıcı kayma mukavemeti parametreleri ile kil yüzdesi, ince dane oranı ve aktivite gibi çeşitli zemin parametreleri arasındaki ilişkiler de çalışma kapsamında incelenmiştir.

- Bu bağlamda her ne kadar saçılımı fazla olan bir ilişki de olsa kil yüzdesi ile kalıcı kayma mukavemeti arasında bir bağıntıdan söz edilebilir. Kil yüzdesinin artışının kalıcı kayma mukavetini düşürdüğü söylenebilir. Saçılımın fazla olması ise zemin içeriğindeki kil minerallerinin farklı olmasına dayanmaktadır. Minerolojinin kalıcı kayma mukavemeti üzerinde önemli oranda etkisi olduğu bilindiğinden saçılımın fazla olması normal bir sonuç olarak kabul edilmektedir.
- Kalıcı kayma mukavemetinin ince dane oranı ve aktivite ile ilişkileri için ise yeterli düzeyde anlamlı ilişkiler elde edilememiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen ana konulardan biri ise aşırı konsolidasyon oranı ile kalıcı mukavemet arasındaki ilişkidir. Literatürde verilen birkaç yayında büyük yerdeğiştirmeler sonucunda erişilen kalıcı mukavemet seviyesinde aşırı konsolidasyon oranının etkisi olmayacağı savunulmuş ancak bu konuda yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu nedenle farklı kıvam özelliklerine sahip 10 numune üzerinde 1, 2, 3, 5, 7 ve 10 olmak üzere farklı aşırı konsolidasyon oranlarına sahip zemin numuneleri üzerinde halka kesme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları değerlendirililerek kalıcı mukavemetin, pik mukavemetin ve bu iki mukavemetin birbirine oranı ile aşırı konsolidasyon oranı ile ilişkisi ortaya konmuştur. Buna ek olarak pratik amaçlar doğrultusunda kullanılmak üzere elde edilen sonuçlar değerlendirilerek çeşitli korelasyonlar geliştirilmiş ve sunulmuştur.

- Kalıcı kayma mukavemeti aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak değişmemektedir. Ancak aşırı konsolidasyon oranının artışı kalıcı mukavemete erişmek için gereken yerdeğiştirme miktarlarının artmasına sebep olnaktadır.
- Aşırı konsolidasyon oranının artışı pik mukavemeti doğrudan etkilemektedir. Aşırı konsolşdasyon oranı arttıkça pik mukavemette beklendiği gibi artmaktadır. Yapılan deney sonuçlarına göre aşırı konsolidasyon oranı ile pik mukavemet arasında anlamlı ilişkiler elde edilmiştir.

- Çalışma öncesinde hedeflenen pik mukavemetten kalıcı mukavemete düşüş miktarının veya bu iki mukavemetin birbirine oranının değişimi incelenmiştir. Bu anlamda aşırı konsolidasyon oranının sözü edilen parametrelerle değişimi için kıvam limitlerine bağlı çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir. Geliştirilen korelasyonların yüksek korelasyon katsayılarına sahip olduğu gözlenmiştir.
- Geoteknik uygulamalarda genellikle pik mukavemete göre yapılan tasarımlarda kalıcı kayma mukavemetinin geçerli olduğu durumlarda pik mukavemetten kalıcı mukavemete düşüş miktarının önemi artmaktadır. Zeminin meinerolojisine bağlı olmak koşulu ile bu düşüş beşte bir oranında olabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında kıvam limitlerine, deney yöntemi türü ve aşırı konsolidasyon oranına bağlı olarak önerilen korelasyonlardan kullanımı kolay ve yüksek korelasyon katsayısına sahip olanları Çizelge 6.1'de özetlenmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçların geliştirilmesi ve konu üzerinde yapılması önerilen araştırma önerileri aşağıda sıralanmıştır.

I. Numune sayısının artırılarak kalıcı kayma mukavemeti ile zemin özellikleri arasında verilmiş korelasyonların daha da geliştirilmesi,

II. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney yöntemi kullanılarak kalıcı kayma mukavemetinin belirlenebilmesi için özel deney düzeneği geliştirilerek ve daha çok numune kullanılarak deney tipinin etkisinin araştırılması,

III. Kalıcı kayma mukavemeti ile aşırı konsolidasyon arasındaki ilişkilerin numune sayısının artırılarak geliştirilmesi,

IV. Halka kesme deneyinde yapılan aşırı konsolidasyon oranı deneylerinde kesme sırasında uygulanan düşey gerilmenin değiştirilmesi ile düşey efektif gerilmenin etkisinin incelenmesi,

V. Aşırı konsolidasyon oranının etkilerinin tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney düzenekleri kullanılarak araştırılması.

**Çizelge 6.1 :** Kalıcı ($\phi_r$) ve pik ($\phi_p$) kayma mukavemeti açılarının tahmini için deney yöntemi ve malzeme özelliklerine bağlı önerilen bağıntılar.

| Değişken | Bağıntı | Korelasyon katsayısı (R) |
|---|---|---|
| $w_L$ | $\phi_{r\,(HK)} = 247.62\ {w_L}^{-0.755}$ | 0.85 |
| | $\phi_{r\,(TKK)} = 382.67\ {w_L}^{-0.805}$ | 0.88 |
| $I_p$ | $\phi_{r(HK)} = 83.507\ {I_p}^{-0.568}$ | 0.82 |
| | $\phi_{r\,(TKK)} = 119.34\ {I_p}^{-0.604}$ | 0.86 |
| $w_p$ | $\phi_{r(HK)} = 1399.2\ {w_p}^{-1.534}$ | 0.89 |
| | $\phi_{r\,(TKK)} = 1246.7\ {w_p}^{-1.415}$ | 0.81 |
| Deney Yöntemi | $\phi_{r\,(TKK)} = 1.06 \times \phi_{r\,(HK)} + 2.29$ | 0.90 |
| | $\phi_{r\,(CD)} = 1.02 \times \phi_{r\,(TKK)} + 5.06$ | 0.93 |
| | $\phi_{r\,(CD)} = 1.04 \times \phi_{r\,(HK)} + 6.5$ | 0.74 |
| AKO, $w_L$ | $\phi_{pik} = 30.4 \times W_L^{-0.021} \times AKO^{(0.2)}$ | 0.85 |
| | $\phi_{pik} = 26.7 \times AKO^{(\frac{w_L^{0.4464}}{30})}$ | 0.83 |
| AKO, $I_p$ | $\phi_{pik} = 28.93 \times I_P^{-0.01} \times AKO^{0.2}$ | 0.86 |
| | $\phi_{pik} = 26.7 \times AKO^{(0.0731 * I_p^{0.3})}$ | 0.83 |
| AKO, $w_p$ | $\phi_{pik} = 37.22 \times W_P^{-0.089} \times AKO^{0.2}$ | 0.85 |
| AKO, $w_L$ | $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.06 \times w_L^{0.855} \times AKO^{0.233}$ | 0.79 |
| AKO, $I_p$ | $\tau_{pik}/\tau_{kalıcı} = 0.3 \times I_p^{0.54} \times AKO^{0.233}$ | 0.79 |

HK :Halka Kesme Deneyi, TKK: Tekrarlı Kesme Kutusu Deneyi, CD: Üç Eksenli Basınç Deneyi

Çalışma kapsamında sınırlı sayıda numune üzerinde yapılan deney sonuçlarına dayanarak kalıcı kayma mukavemeti parametrelerini tahmin etmek için önerilmiş olan bağıntıların, deneylerin yerini alması veya bir deney sonucu gibi değerlendirilmesi düşünülmemelidir. Önerilen bu ilişkilerin pratik amaçlar için kıvam limitleri gibi kolayca belirlenebilen zemin özelliklerinden kalıcı kayma mukavemetini tahmin etmekte çok faydalı olacağı düşünülmektedir. Artan deney sayısı ve yeni bulgular ile bu bağıntıların geliştirilmesi mümkün olacaktır.

## KAYNAKLAR


**Ataç, A.E.** (2009). **"**Plastisitenin Kalıcı Kayma Mukavemetine Etkisi", *Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

**ASTM D 3080-98** (2000). " Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions." *American Society for Testing and Materials,* West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

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

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

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

**Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andresen, A., ve Brown, J. D.** (1971). "A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength" *Geotechnique.* Vol. **21**, no. 4, pp. 273-328.

**Bowles, J.E.** (1992). Engineering *Properties of Soils and their Measurement*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 1992.

**Bromhead, E**. (1986). *The stability of slopes*. Glasgow: Surrey University Press.

**BS 1377-7** (1990). Methods of Tests for Civil Engineering Puposes. Shear Strength Tests (Total Stress) . *BritishStandards Institution* (BSI), Gunnersbury, London, UK.

**Budhu, M.** (2010)."*Soil mechanics and Foundations*", John Wiley & Sons, 2006.

**Cancelli, A.** (1977). "Residual shear strength and stability analysis of a landslide in fissured overconsolidated clays." *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol*., Vol. 16, pp. 193-197**.**

**Collotta, T., Cantoni, R., Pavesi, U., Ruberl, U., ve Moretti, P. C.** (1989). "A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils." *Geotechnique*, 39(2), 343–346.

**Coulomb, C. A.** (1776). "Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelquels problemesde statique relatifs", *a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav*., vol. 7, pp. 343–387.

**Das, B.M.** (1997). *Soil Mechanics Laboratory Manual*, Engineering Press, Austin.

**Das, B.M.** (2002). *Principles of Geotechnical Engineering*, Fifth Edition, Brooks/Cole, Thomson Learning, USA.

**Das, M. B.** (2006). *Principles of Geotechnical Engineering*. Thomson, Canada.

**De P.K. ve Furdas B.** (1973). "Discussion of correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of soils"; *Geotechnique* 23(4):601.

**Deere, D.U.** (1974). Yayımlanmamış rapor, Dewoolkar ve Huzjak (2005)'ten alınmıştır.

**Dewoolkar M.M. ve Huzjak, J.R.** (2005). "Drained Residual Shear Strength of Some Claystones from Front Range, Colorado", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 12.

**Di Maio, C. ve Fenelli,G.B.** (1994). "Residual strength of kaolin and bentonite: the influence of their constituent pore fluid". *Géotechnique* XLIV 2 (1994), pp. 217–226.

**Fearon, R.** (1999). "Effect of displacement rate on residual shear strength of soils", http://cvfeller.cv.ic.ac.uk/ruth.htlm.

**Geocomp** (2011). Üç eksenli basınç deney düzeneği ürün broşürü.

**Gibson, R.E.** (1953). "Experimental determination of the true cohesion and angle of internal friction in clays". *Proc. 3rd ICSMFE*, Vol.1, pp.126-130.

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

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

**Holtz, R.D. ve Kovacs, W.D.** (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, Eaglewood Cliffs.

**İyisan, R., Çevikbilen, G., Koltuk, S., Yılmaz, E.** (2006-a). "Sıkıştırılmış Zeminlerde Kalıcı Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi,* Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, Eylül 7-8.

**İyisan, R., Çevikbilen, G., Koltuk, S., Yılmaz, E.** (2006-b). "Measurement of Residual Shear Strength by Ring Shear Test", *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering,* Yıldız Technical University, İstanbul, Türkiye, October 11-13.

**İyisan, R., Çevikbilen. G., Hatipoğlu M., Ürkmez A.R., Ataç A.E.** (2009). "Yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma direnci" 3. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana.

**Jardine, R.J., Chow, F.C., Overy, R., ve Standing, J.** (2005). *ICP design methods for driven piles in sands and clays.* Thomas Telford, London.

**Kalteziotis, N.** (1993). **"**The residual shear strength of some hellenic clayey soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, 11 (1993), 125-145**.**

**Kanji, M. A.** (1974). " The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils." *Geotechnique*, 24(4), 671–674.

**Kanji, M. A., ve Wolle, C. M.** (1977). "Residual Strength - New Testing and Microstructure." *Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation.*

**Kenney, T. C. (**1959). Discussion. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng*., 85(SM3):67–79.

**Kenney, T.C. (**1967). "The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils." *Proc., Geotech. Conf.,* Vol.1, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 123-129.

**Kenney, T. C.** (1977). "Residual Strengths of Mineral Mixtures." *Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, Japan, 155-160.

**Koltuk, S**. (2005). Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Lemos, L. J. L.** (1985). "Shear Behaviour of Pre-Existing Shear Zones Under Fast Loading-Insights on the Landslide Motion", from http://www.unina2.it/flows2003/articoli/lemos.

**Lemos, L., Skempton, A. W., ve Vaughan, P. R.** (1985). "Earthquake Loading of Shear Surfaces in Slopes." *Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, San Francisco, CA, 1955-1958.

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

**Lupini, J.F. (**1980). The residual strength of soils. Unpublished *Ph.D. Thesis*, University of London.

**Lupini, J.F., Skinner, A. E., ve Vaughan, P. R.** (1981): "The drained residual strength of cohesive soils". *Geotechnique.* Vol. 31, no. 2, pp. 181-213.

**Maksimovic, M.** (1989). " On the residual shearing strength of clays". *Geotechnique* 39-2, pp. 347–351.

**Meehan, C. L., Brandon, T. L., ve Duncan, J. M**. (2008). "Measuring Fast Shear Strengths along Slickensided Surfaces in the Bromhead Ring Shear." *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 31(3), 239-242.

**Mesri, G. ve Capeda-Diaz, A.F. (**1986). "Residual Shear Strength Of Clays And Shales". *Geotechnique.* Vol. 36, no. 2, pp. 269-274.

**Mesri, G. ve Shaninen, M.** (2003). "Residual Shear Strength Mobilized In First Time Slope Failures". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* Vol. 129, no. 1, pp. 12-31.

**Mitachi, T., Kuda, T., Okawara, M. ve Ishibashi, M. (**2003). Determination of strength parameters for landslide slope stability analysis by laboratory test and inverse calculation engagement, *Journal of the Japan Landslide Society* 40(2): 105-116.

**Mitchell, J.K. (**1976). *Fundamentals of Soil Behaviour*. John Wiley and Sons Inc., New York.

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

**Olson, R.E**. (1974). "Shearing Strength of Kaolinite, Montmorillonite", *Journal of the Geotechnical Division. A.S.CJB*., Vol. 100, No. GT11, pp. 1215-1229.

**Odell, R. T., I. H. Thornburn, ve L. J . McKenzie. (**1960). "Relationships of Atterberg limits to some other properties of Illinois soils". *Soil Sci. Soc. Am. Proc*. 24:297-300.

**Önalp, A. (**2007). *Geoteknik Bilgisi 1*: Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul.

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

**Parathiras A.N**. (1994). Displacement rate effects on the residual strength of soils. *Ph.D. Thesis*, University of London.

**Parathiras A.N.** (1995). "Displacement rate and shear direction effects on the residual strength of plastic soils". *Proc. 7th Int. Conf. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 67-72.

**Petley, D. J. (**1966). ''The shear strength of soils at large strains.'' *PhD thesis*, London Univ., London.

**Seiken Inc. (**2006). *Ring Shearing Test Apparatus.* Model: DTA-138.

**Skempton, A. W. (**1964). "Long Term Stability of Clay Slopes". *Geotechnique.* Vol. 14, no. 2, pp. 77-102.

**Skempton, A. W. (**1977). ''Slope stability of cuttings in Brown London clay.'' *Proc., 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering* , 3, 261–270.

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

**Sridharan, A., ve Rao, P. R.** (2004). "Discussion: Residual strength of clays and correlation using Atterberg limits" *Geotechnique* 54, No 7, 503-504.

**Stark, T. D., ve Eid, H. T. (**1994). "Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* Vol. **120**, no. 5, pp. 856-871.

**Stark, T. D. ve Contreras, I. A. (**1996). "Constant Volume. Ring Shear Apparatus," *Geotechnical Testing Journal*, GTIODJ, Vol. 19, No. 1, March i996, pp.3-11.

**Stark, T. D., ve Eid, H. T. (**1997). ''Slope stability analyses in stiff fissured clays.'' *J. Geotech. Geoenviron. Eng*., 123 ,4 , 335–343.

**Suzuki, M., Yamamato, T., Tanikawa, K., Fukuda, J., ve Hisanaga, K.** (2001). "Variation in Residual Strength of Clay with Shearing Speed", http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/521/06.pdf.

**Suzuki, M., Tsuzuki, S., ve Yamamato, T.** (2005). "Physical and Chemical Index Properties of Residual Strength of Various Soils", http://donald.lib-e.yamaguchi-u.ac.jp/hokoku/561/01.pdf.

**Suzuki, M., Tsuzuki, S., ve Yamamoto, T. (**2008). "Residual strength characteristics of naturally and artificially cemented clays in reversal direct box shear test", *Soils and Foundations*, 47(6), 1029-1044, 2008.

**Tan, S.A., Chew, S.H., Wong, W.K.** (1998). "Sand-geotextile interface shear strength by torsional ring shear tests", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.16, No.3, 161-174.

**Thiel, R. (**2009). "Cohesion (or adhesion) and friction angle in direct shear tests", *Geosynthetics*, April 2009.

**Tika, T. E., Vaughan, P. R., Lemos, L. J. L.** (1996). "Fast shearing of pre-existing shear zone in soil". *Geotechnique* 46, No. 2, p.97–233.

**Tiwari, B. ve Marui, H.** (2004). "Objective Oriented Multistage Ring Shear Test For Shear Strength Of Landslide Soil". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* Vol. 130, no. 2, pp. 217-222.

**Tiwari, B. ve Marui, H.** (2005). "Comparision of Residual Shear Strengths from Back Analysis and Ring Shear Tests on Undisturbed and Remolded Specimens". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* Vol. 131, no. 9, pp. 1071-1079.

**Tiwari, B. ve Marui, H.** (2005). "A New Method for the Correlation of Residual Shear Strength of the Soil with the Mineralogical Composition". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* Vol. 131, no. 9, pp. 1139-1150.

**Tresca, H.** (1864). Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. C.R. Acad. Sci. Paris, vol. 59, p. 754.

**TS EN 933-9 (**2001). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini- Metilen Mavisi Deneyi, TSE.

**TS 1500** (2000). İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, TSE.

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

**Varnes, DJ. (**1978). "Slope movement types and processes. *In Special report 176: Landslides: Analysis and Control"*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

**Voight, B. (**1973). ''Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils.'' *Geotechnique*, 23, 265–267.

**Wedage, A.M.P., Morgenstern, N.R. ve 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. (**2003). "Residual Strength of Clays and Correlations using Atterberg Limits". *Geotechnique.* Vol. **53**, no. 7, pp. 669-672.

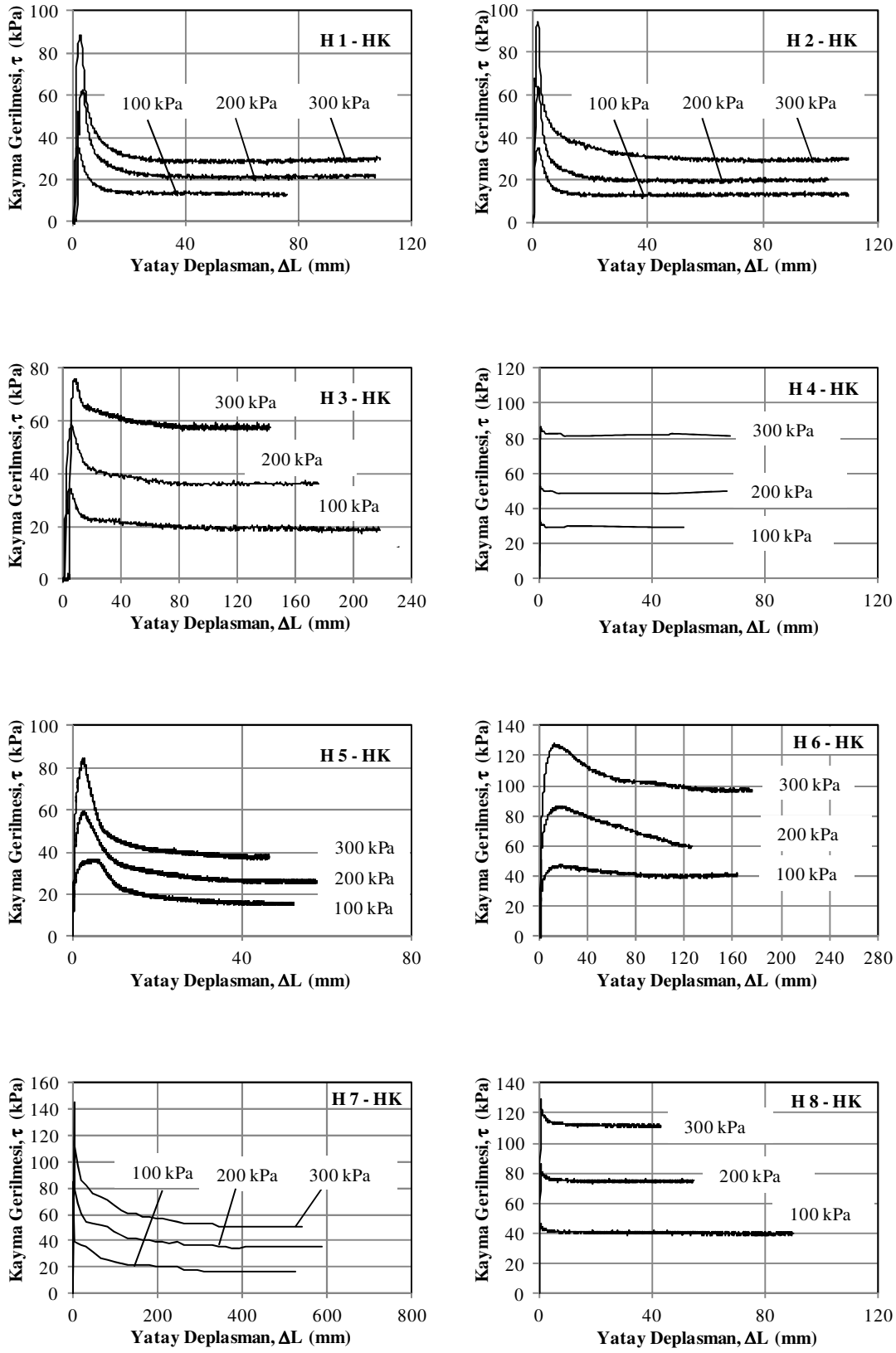
**Wykeham Farrance (**2007). Halka kesme deney düzeneği ürün broşürü.

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

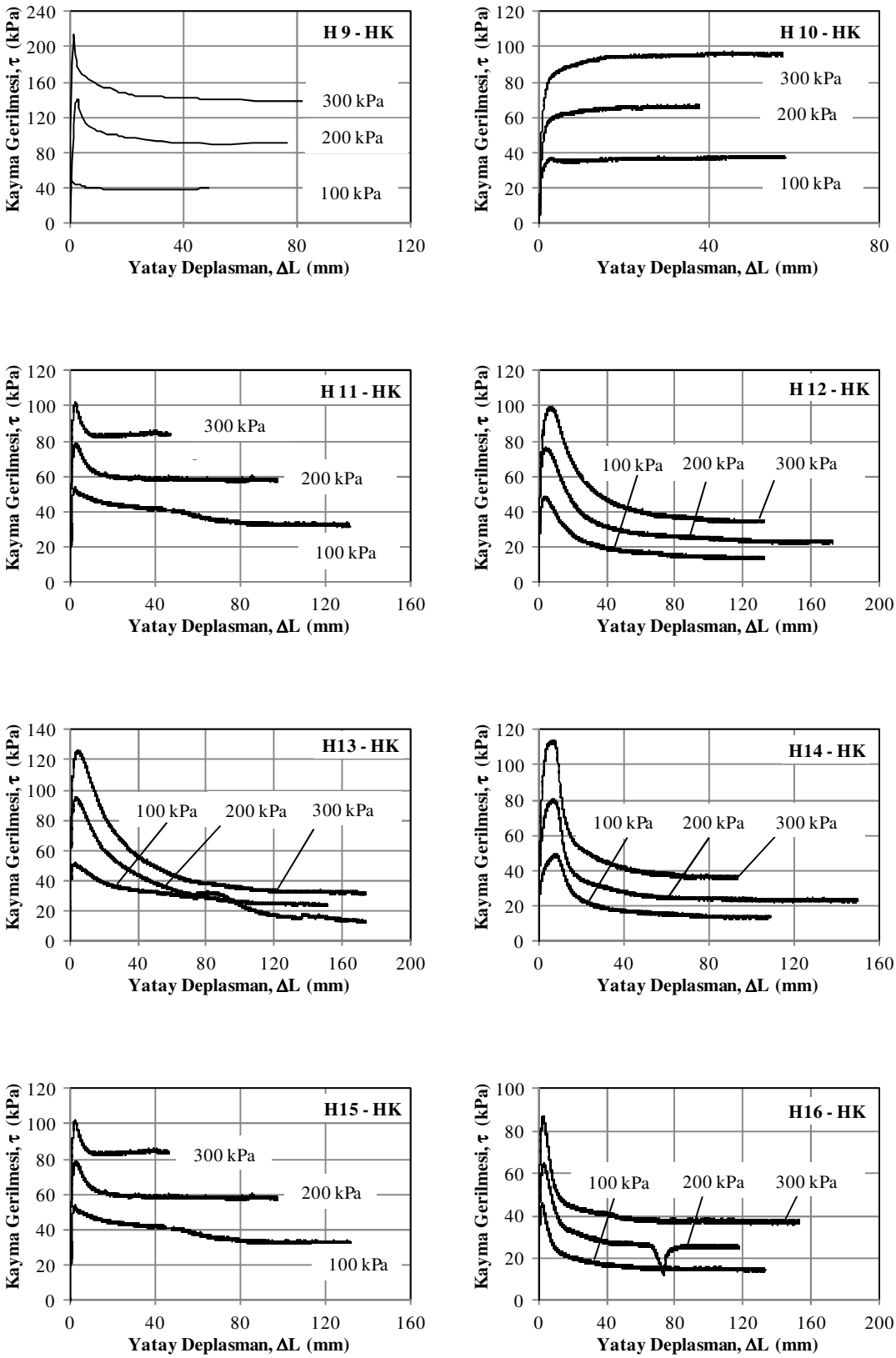
**EKLER**

**EK A :** Halka kesme deneyleri sonuçları
**EK B :** Tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonuçları
**EK C :** Üç eksenli basınç deneyleri sonuçları
**EK D :** Kesme kutusu deneyleri sonuçları
**EK E :** Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapılan halka kesme deneylerinin sonuçları
**EK F :** Halka kesme deneyi kurulumu
**EK G :** Numunelerin tümünü içeren Casagrande plastisite kartı

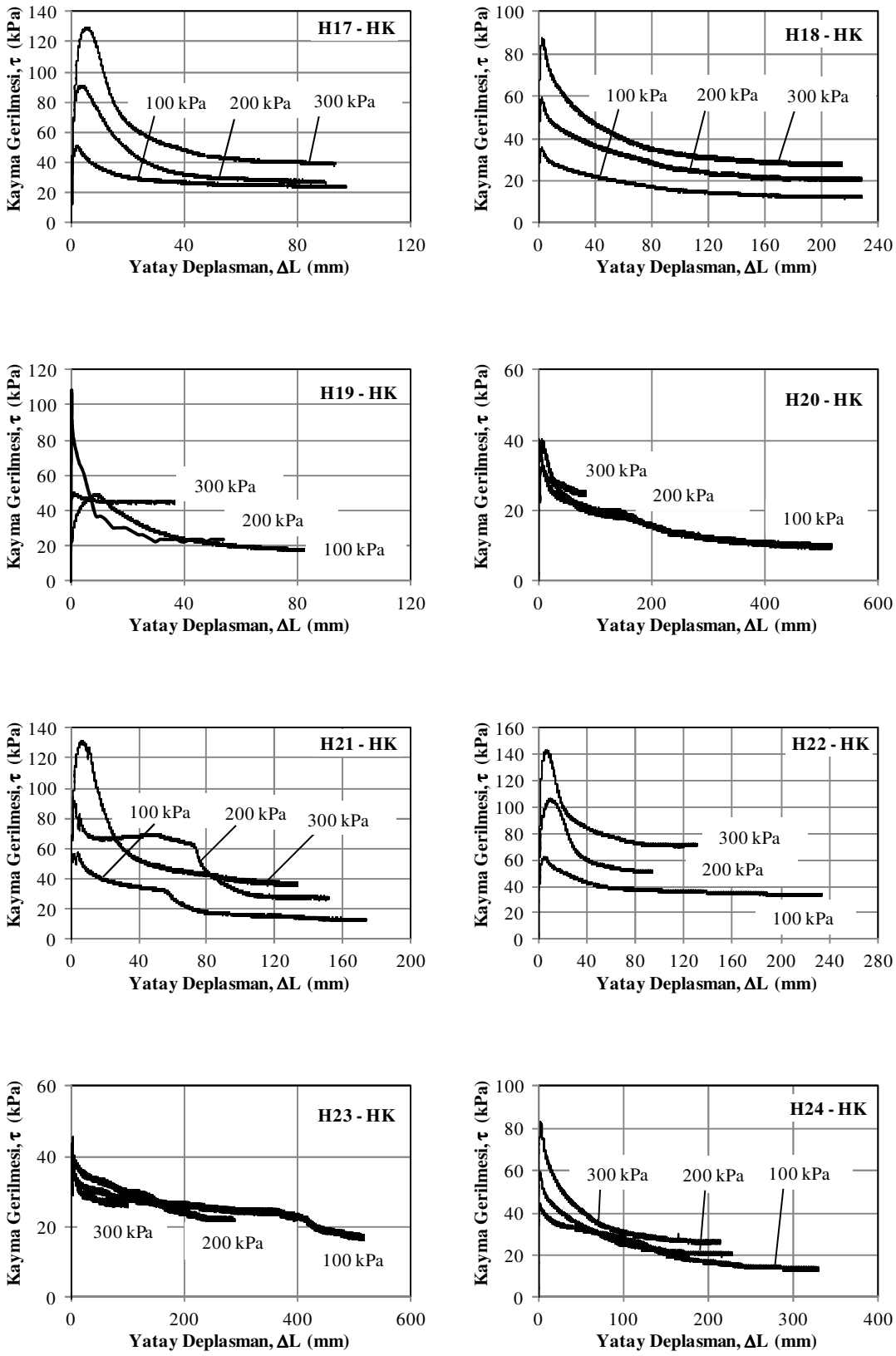
**EK A :** Halka kesme deneyleri sonuçları



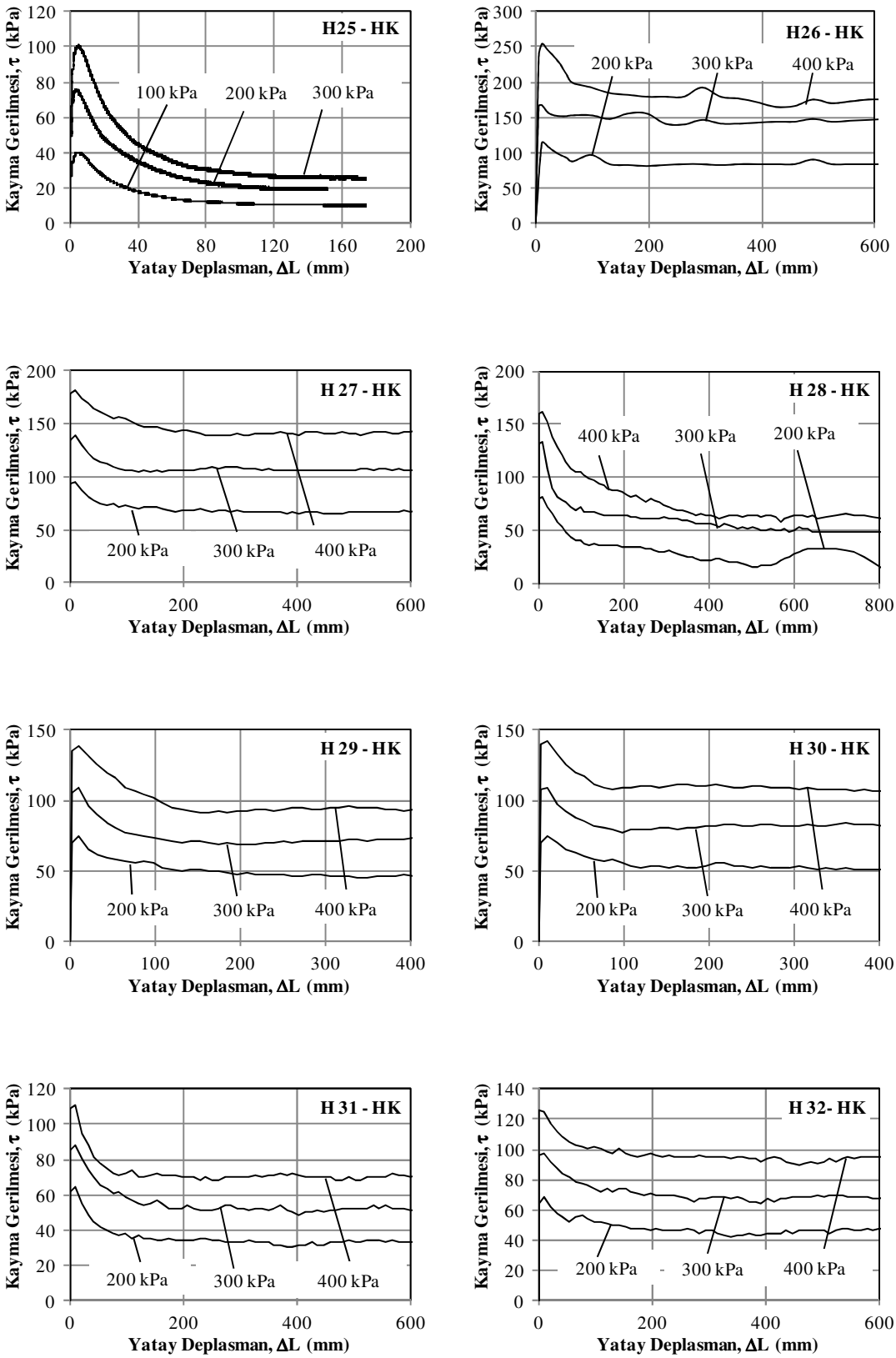

**Şekil A.1 :** H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.



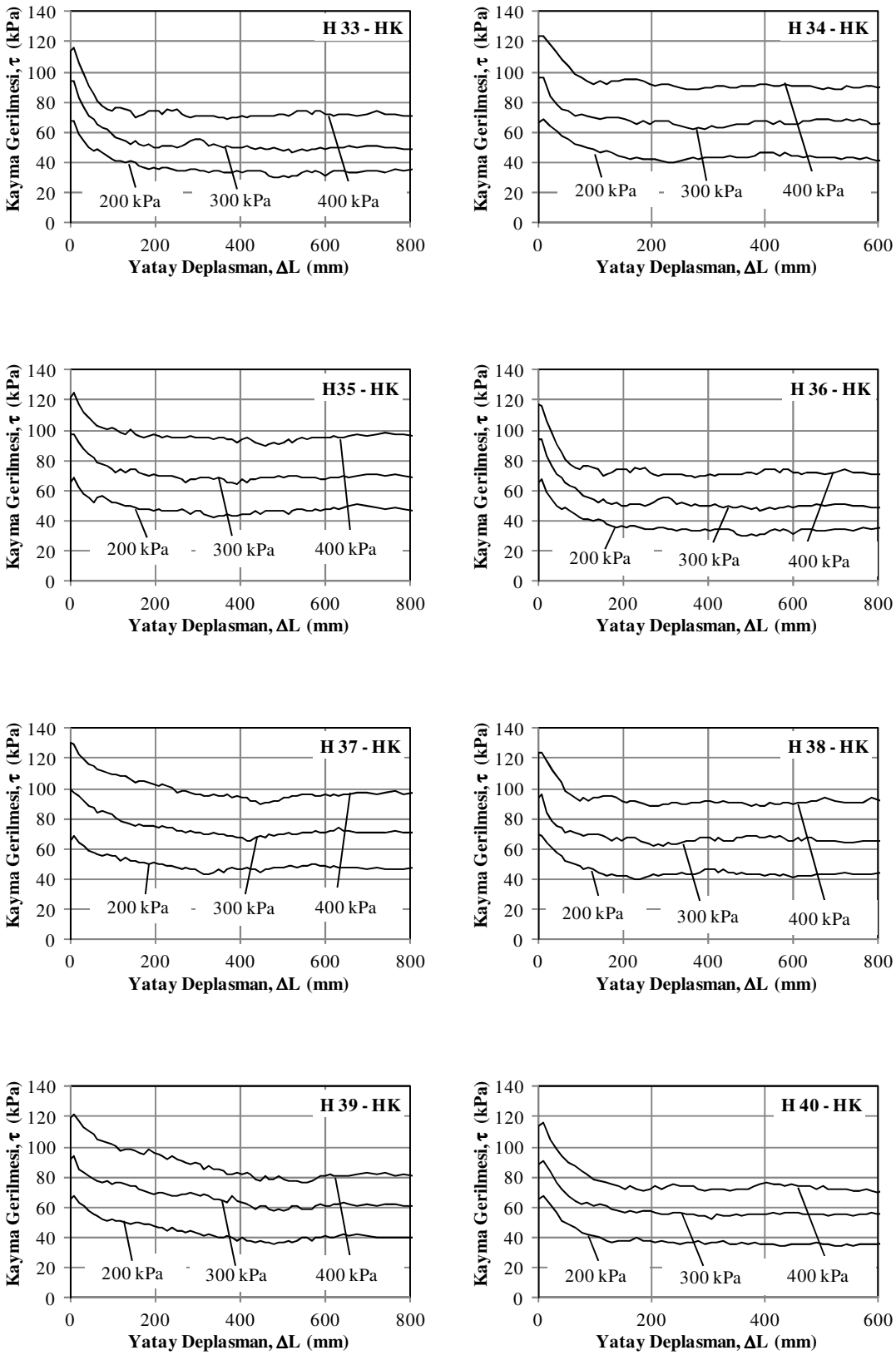

**Şekil A.2 :** H9, H10, H11, H12, H13, H14, H15, H16 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.



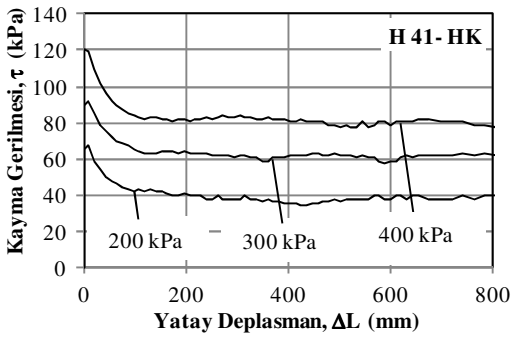

**Şekil A.3 :** H17, H18, H19, H20, H21, H22, H23, H24 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.

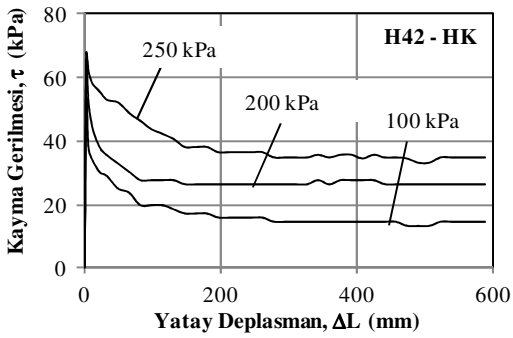


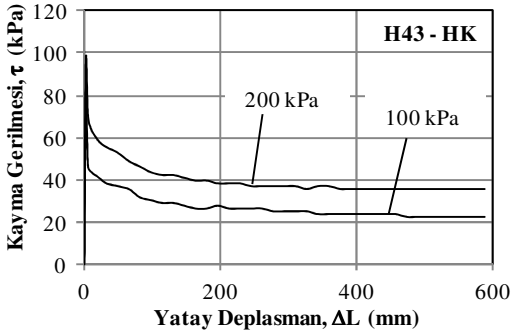

**Şekil A.4 :** H25, H26, H27, H28, H29, H30, H31, H32 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.

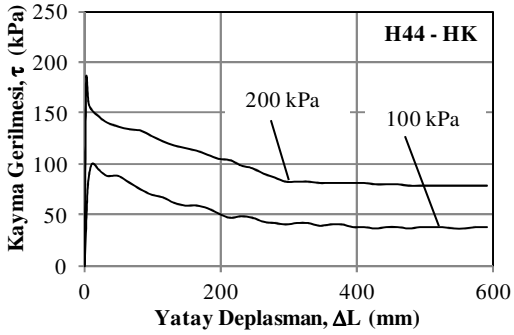


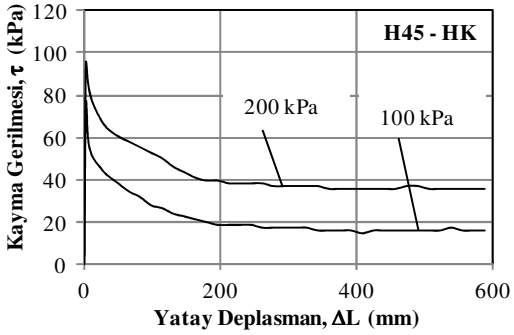

**Şekil A.5 :** H33, H34, H35, H36, H37, H38, H39, H40 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.

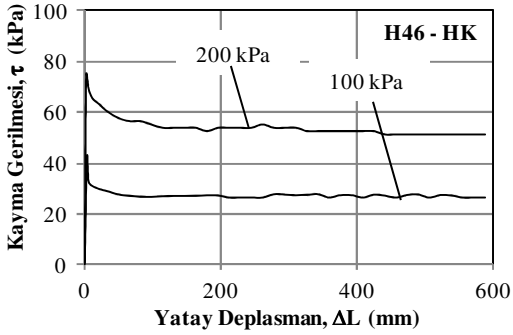


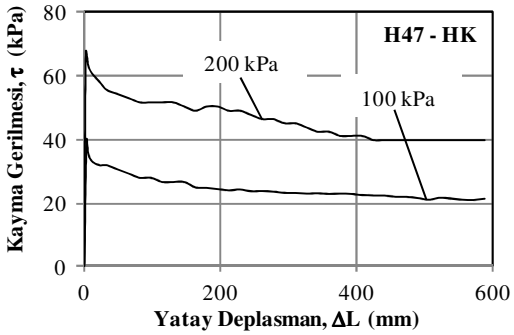



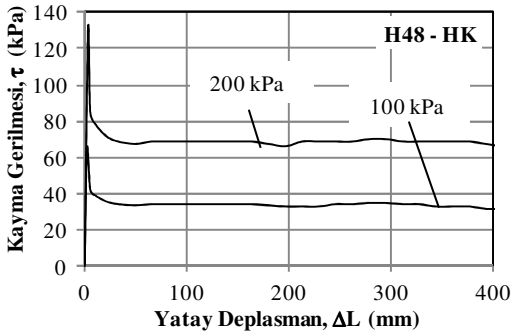



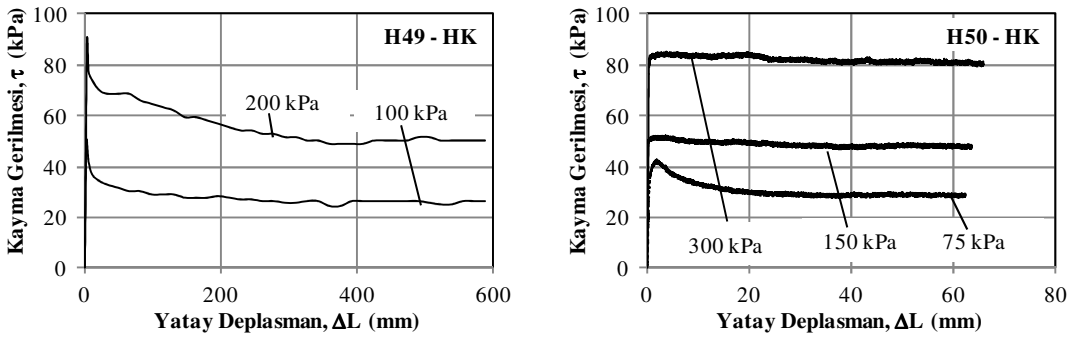



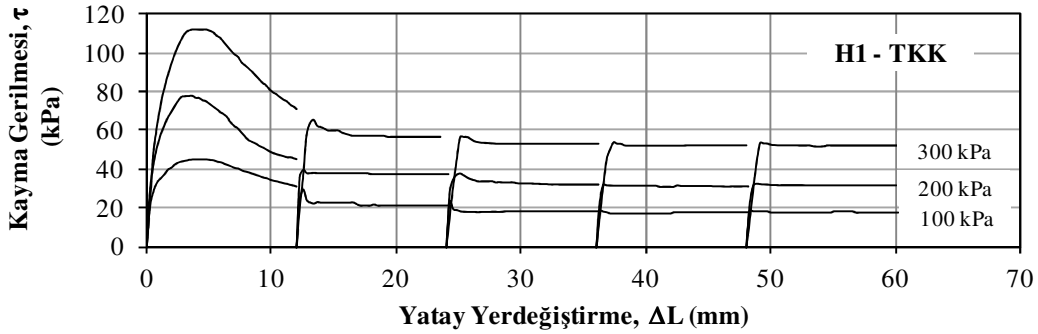



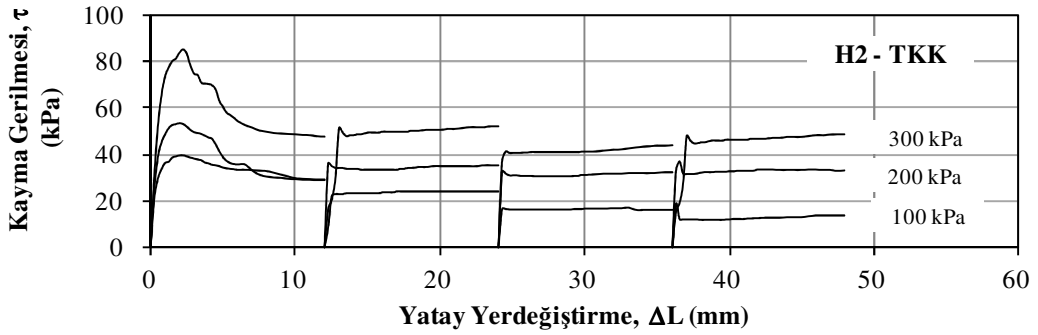

**Şekil A.6 :** H41, H42, H43, H44, H45, H46, H47, H48 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.

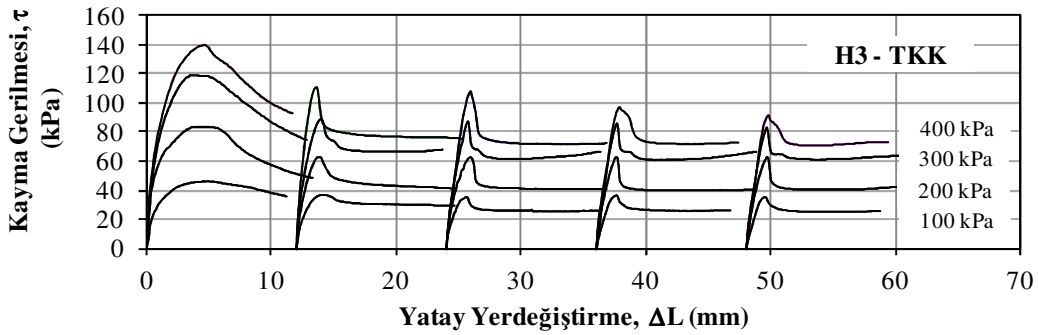


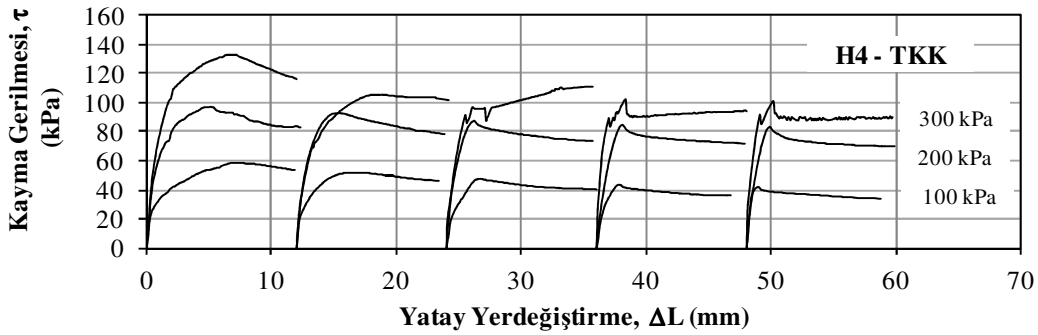

**Şekil A.7 :** H49 ve H50 numunelerine ait halka kesme deneyi sonuçları.

**EK B :** Tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonuçları

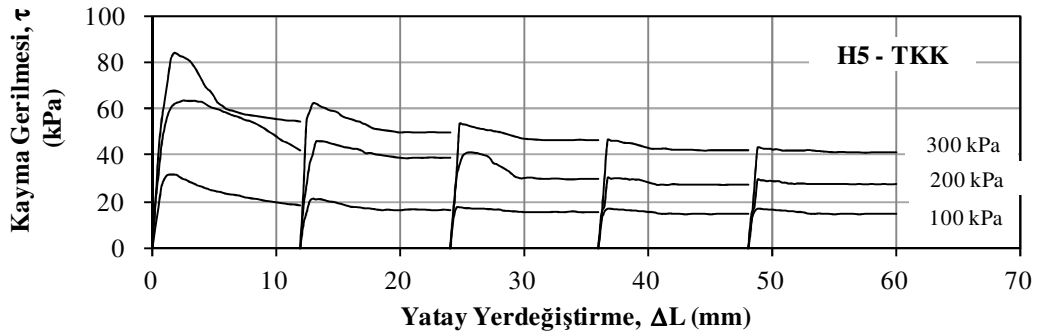


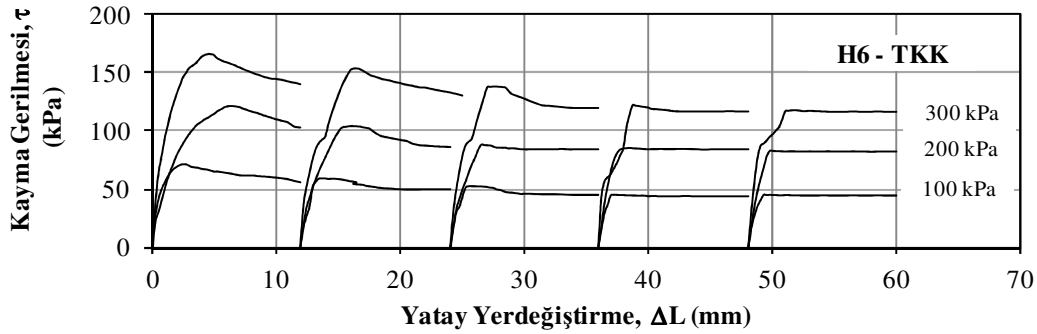



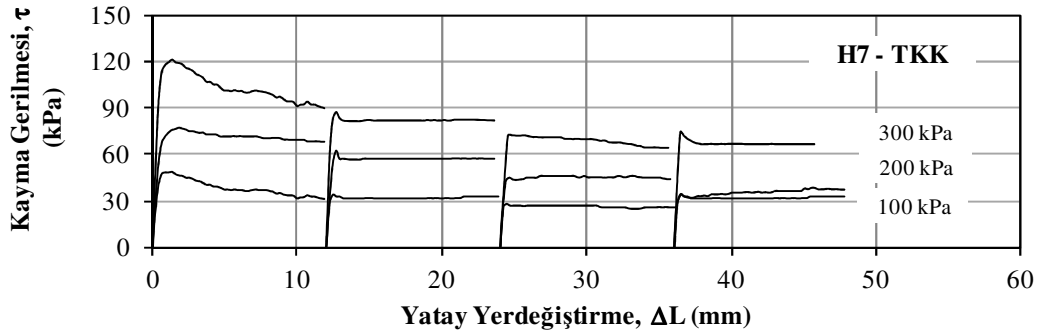



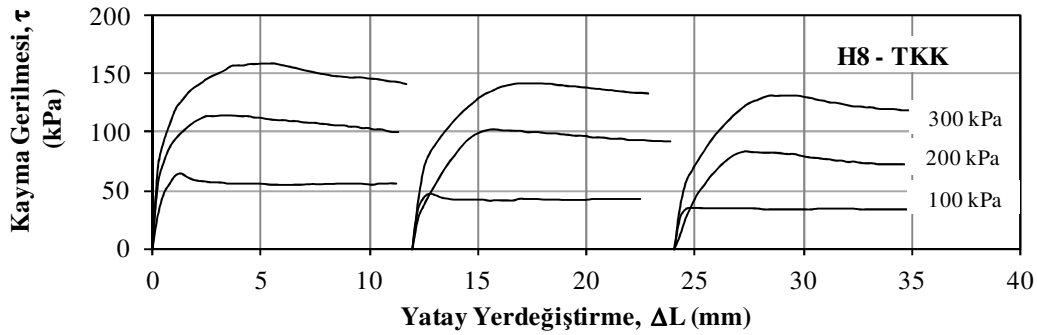




**Şekil B.1 :** H1, H2, H3, H4 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

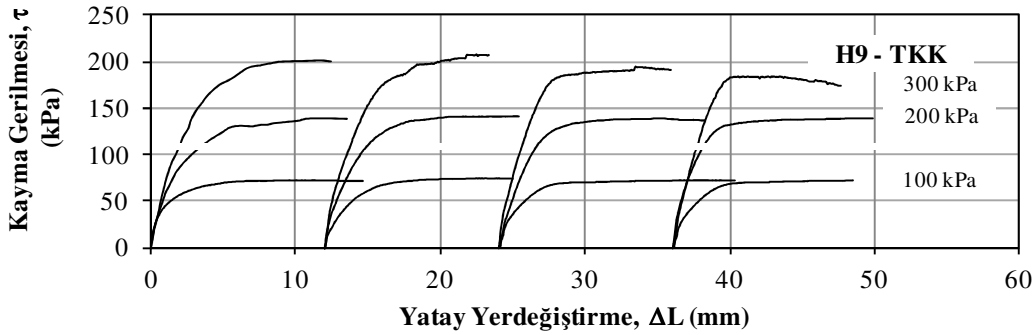


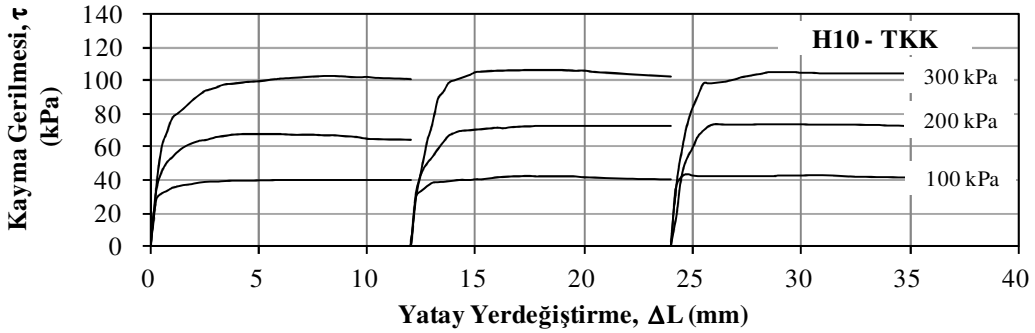



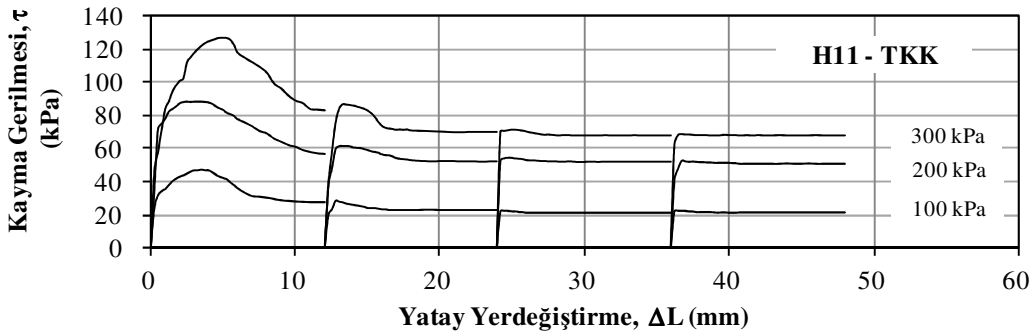



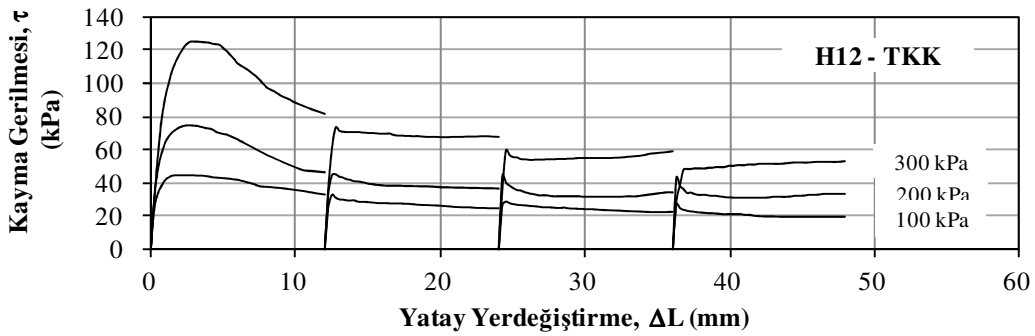




**Şekil B.2 :** H5, H6, H7, H8 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

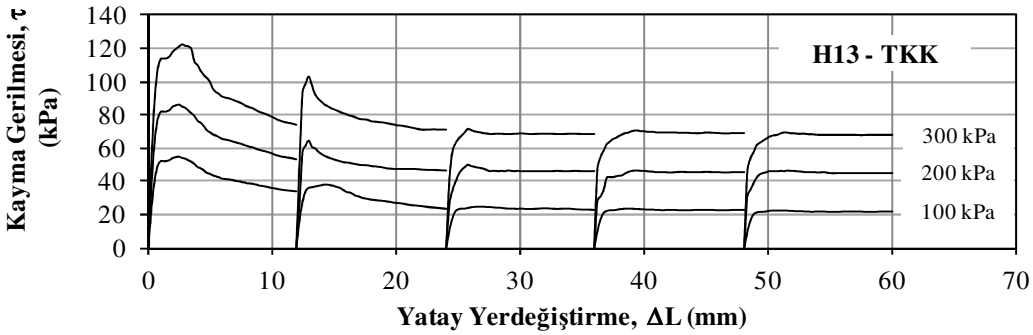


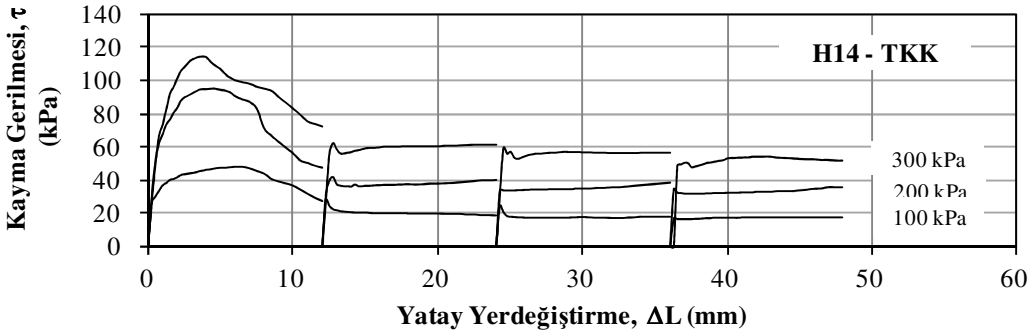



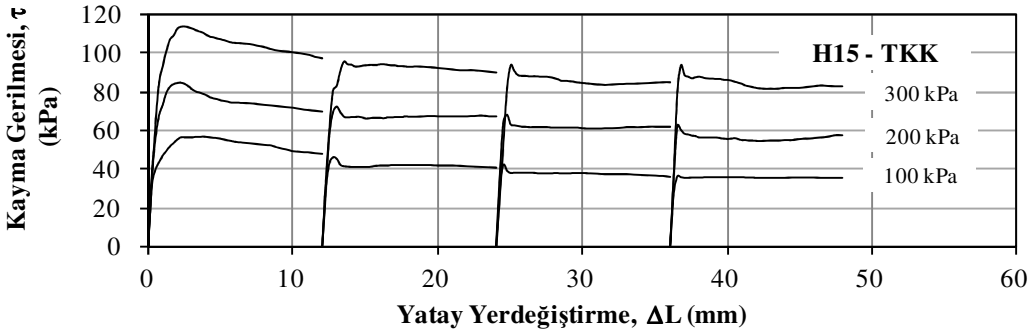



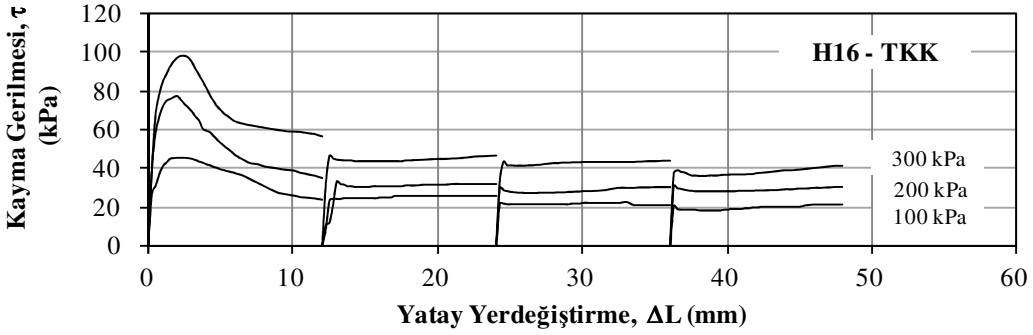




**Şekil B.3 :** H9, H10, H11, H12 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

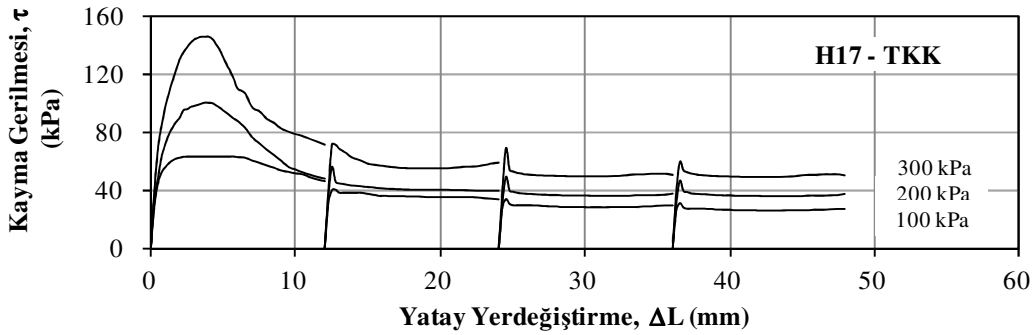


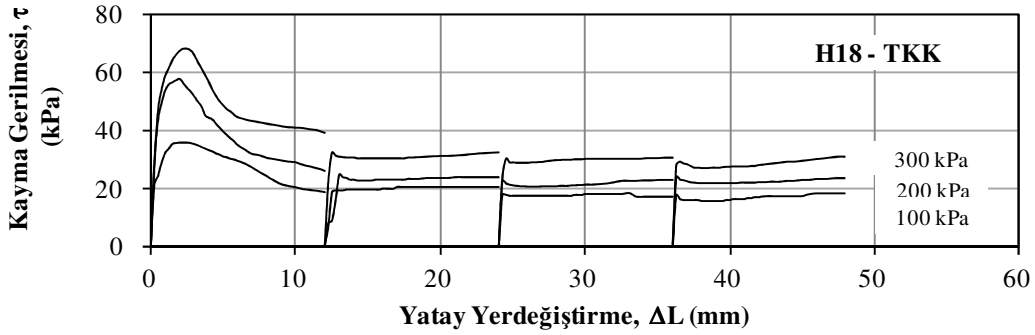



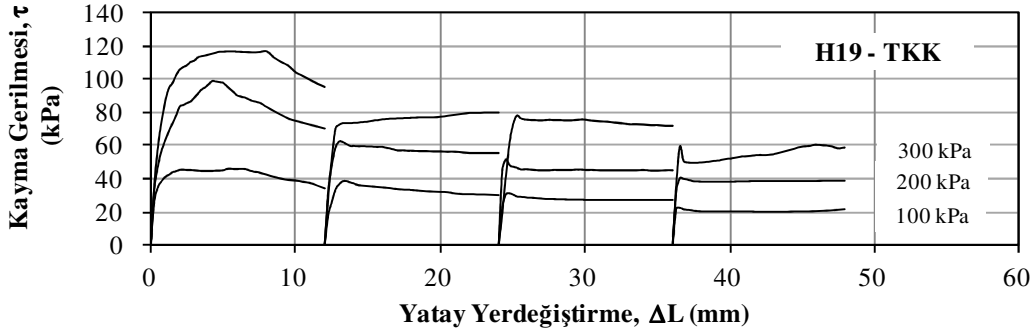



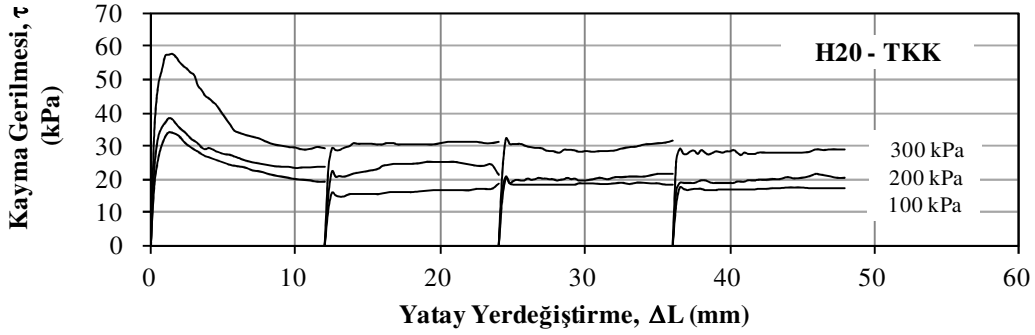




**Şekil B.4 :** H13, H14, H15, H16 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

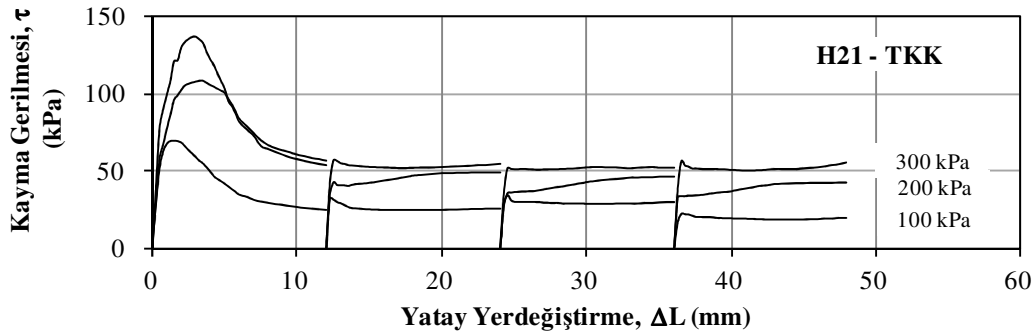


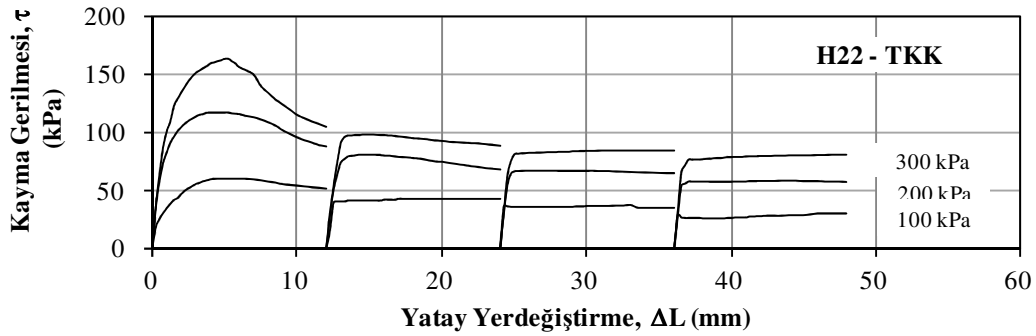



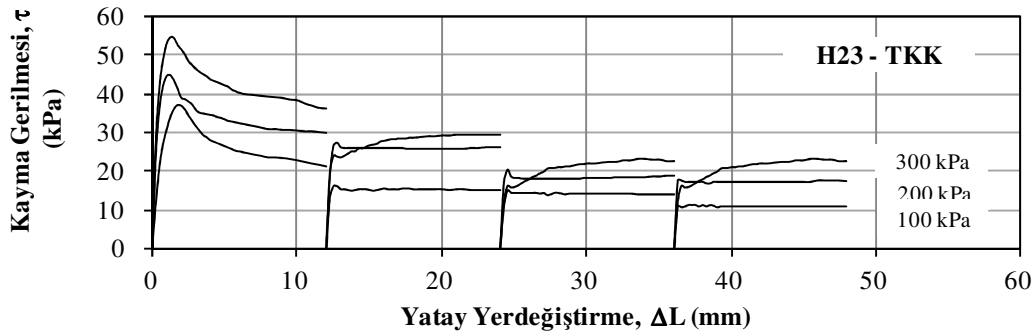



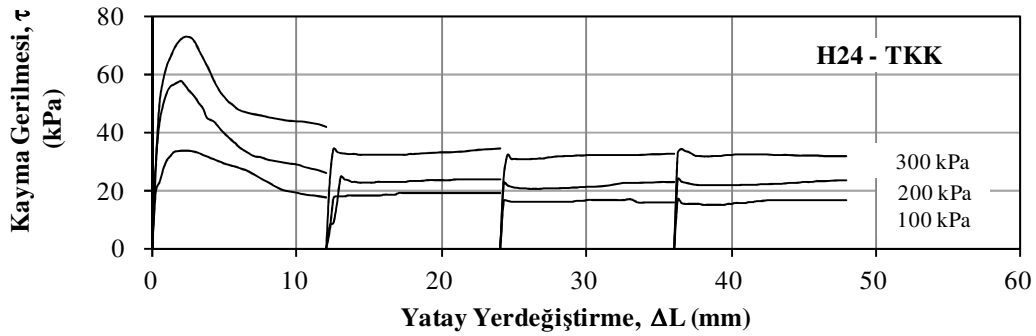




**Şekil B.5 :** H17, H18, H19, H20 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

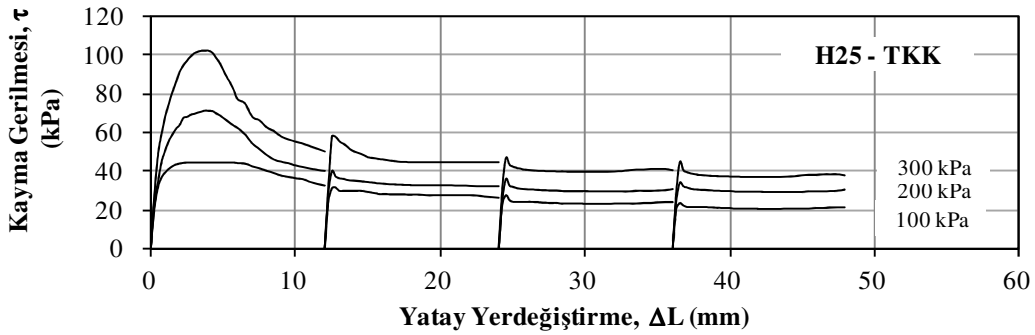


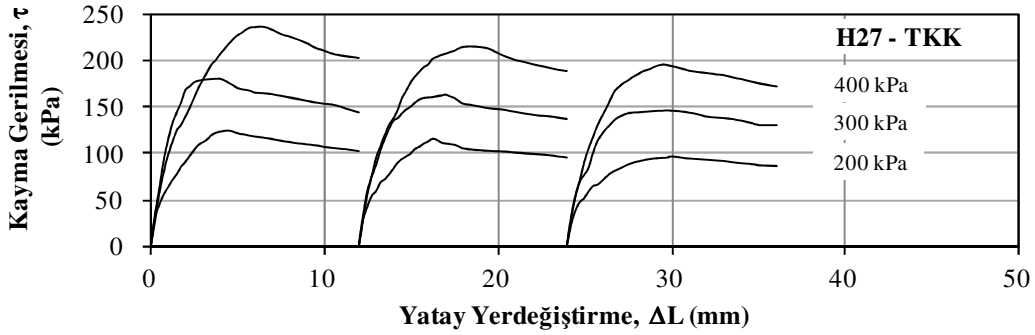



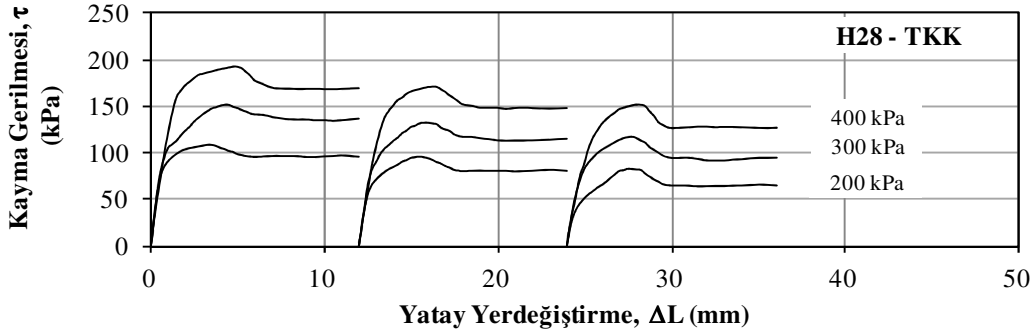



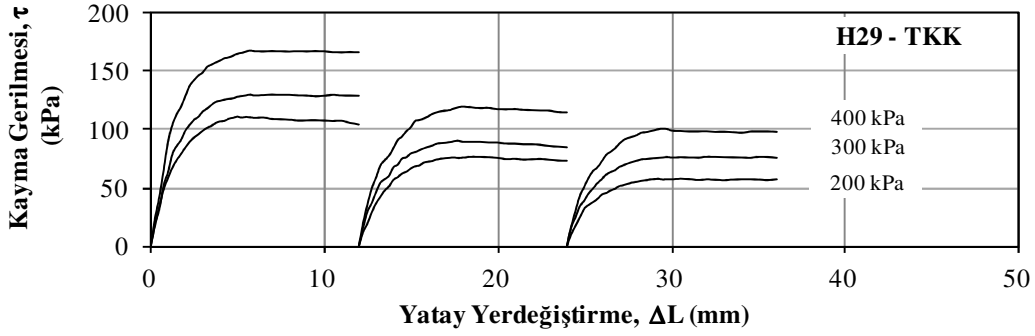




**Şekil B.6 :** H21, H22, H23, H24 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

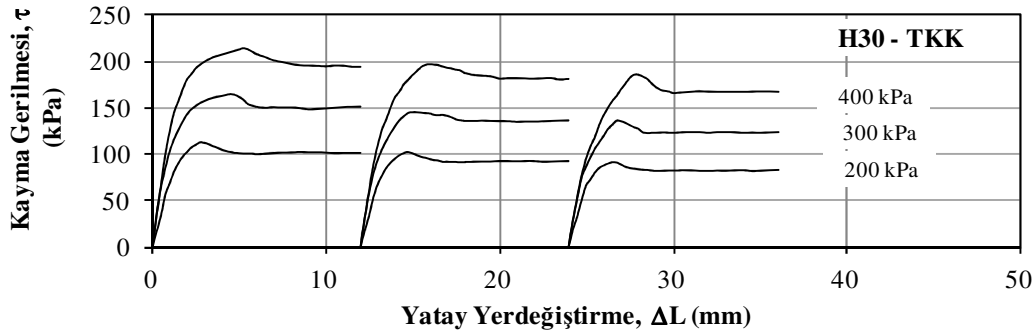


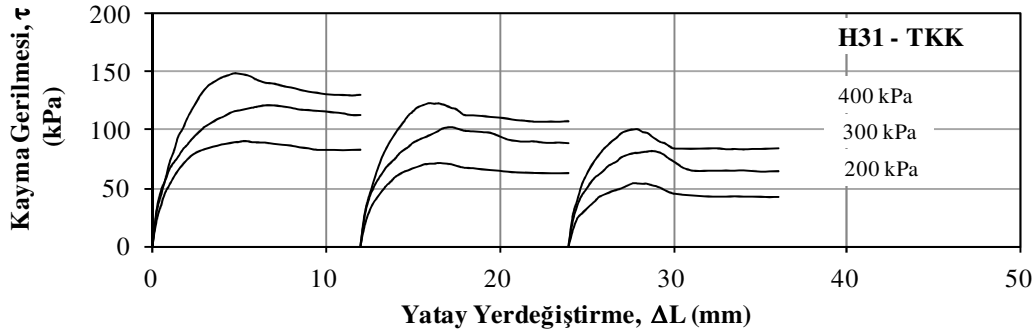



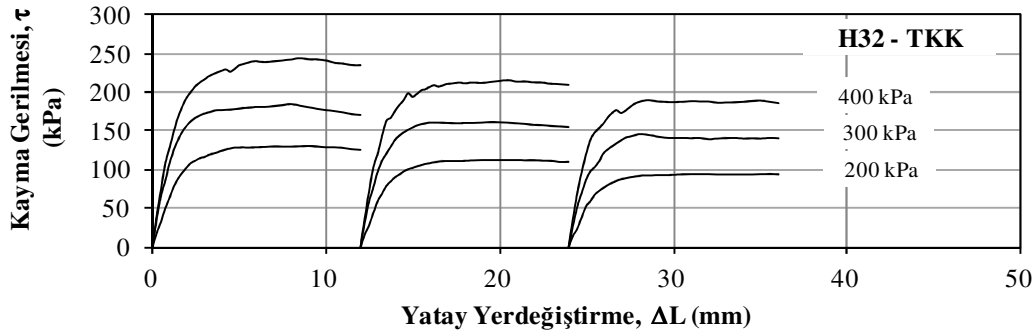



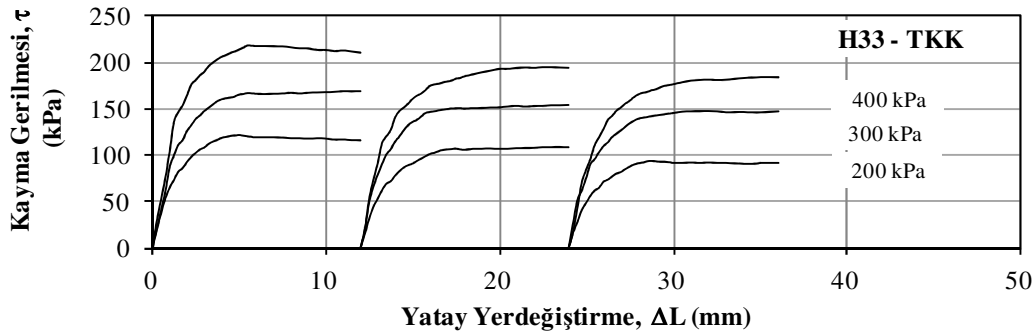




**Şekil B.7 :** H25, H27, H28, H29 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

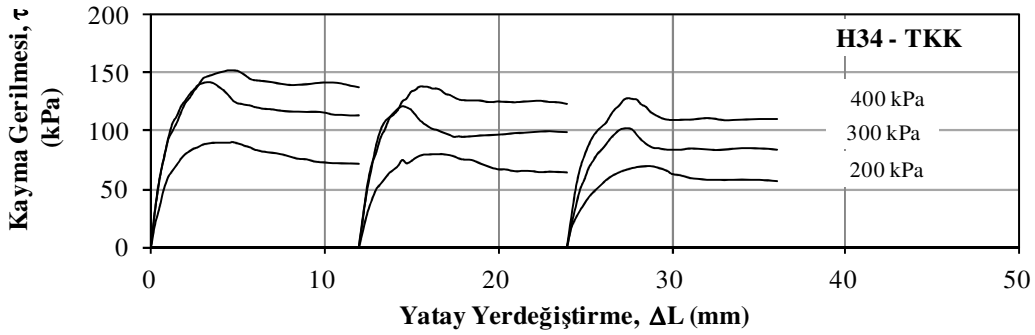


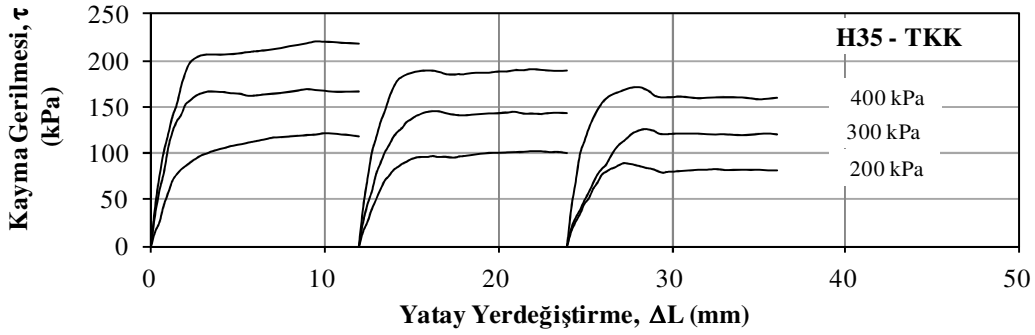



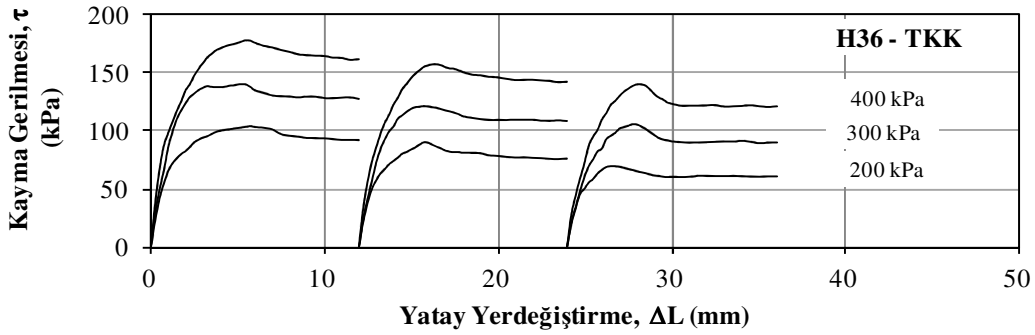



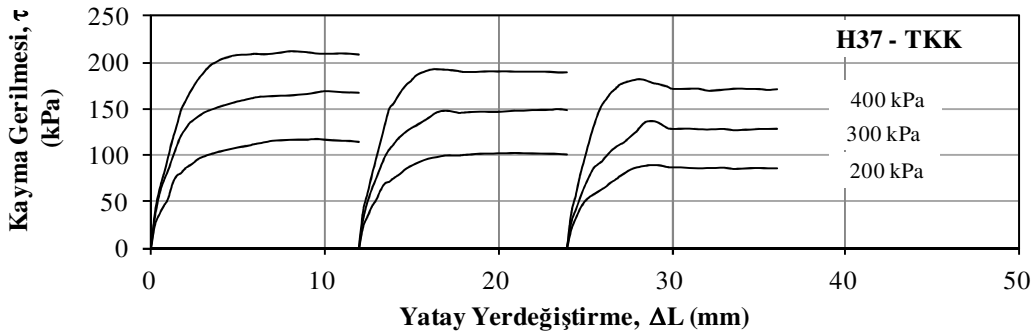




**Şekil B.8 :** H30, H31, H32, H33 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

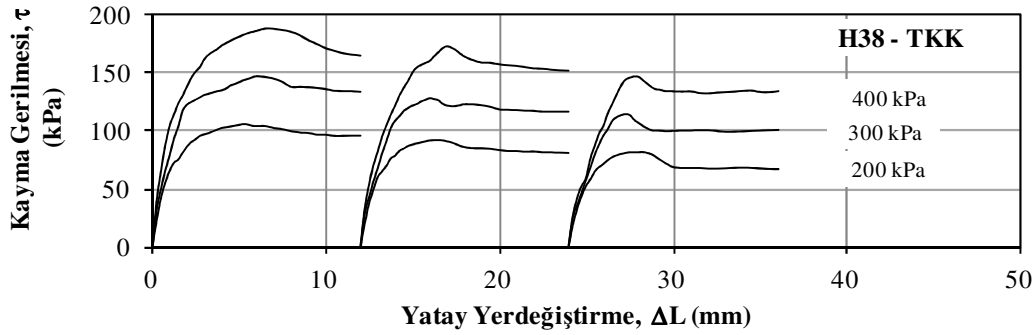


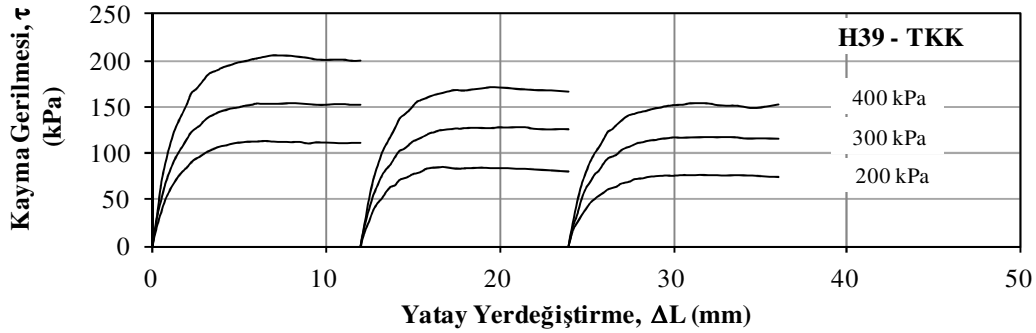



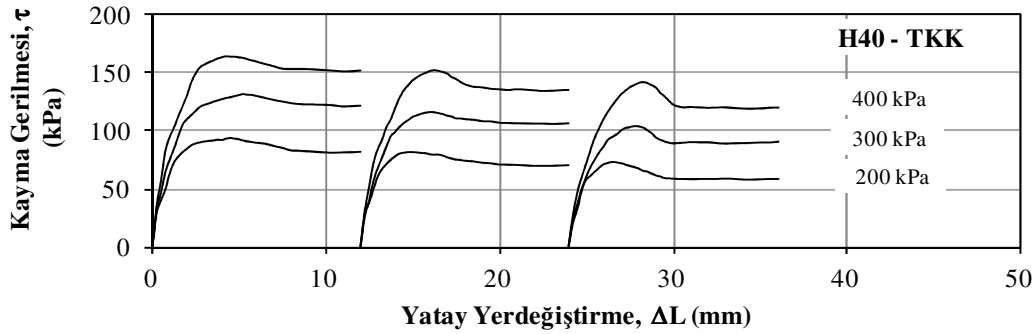



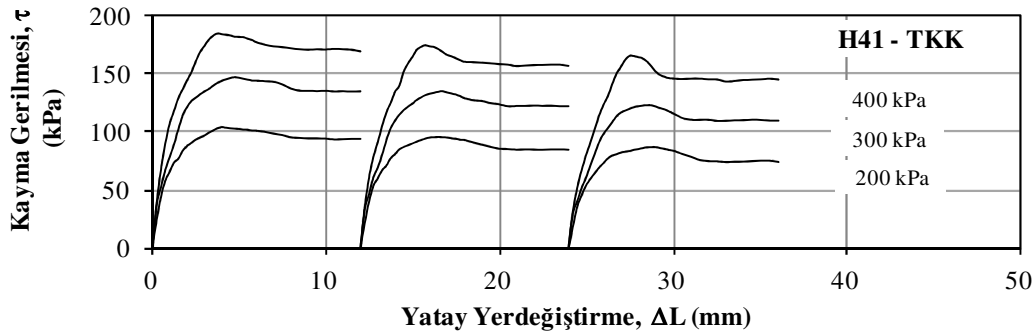




**Şekil B.9 :** H34, H35, H36, H37 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

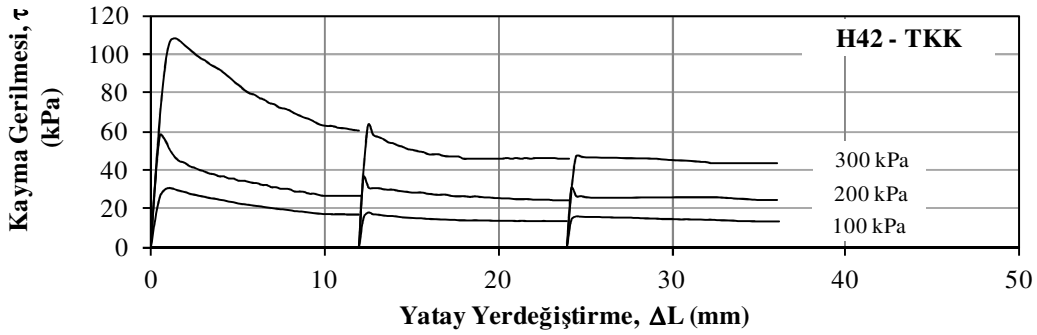


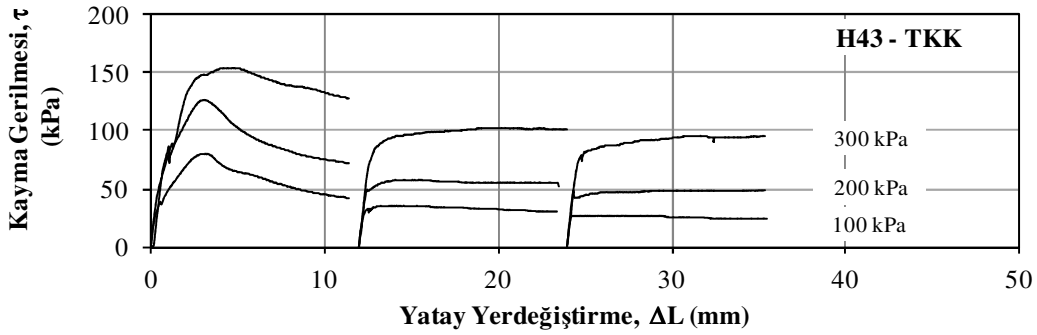



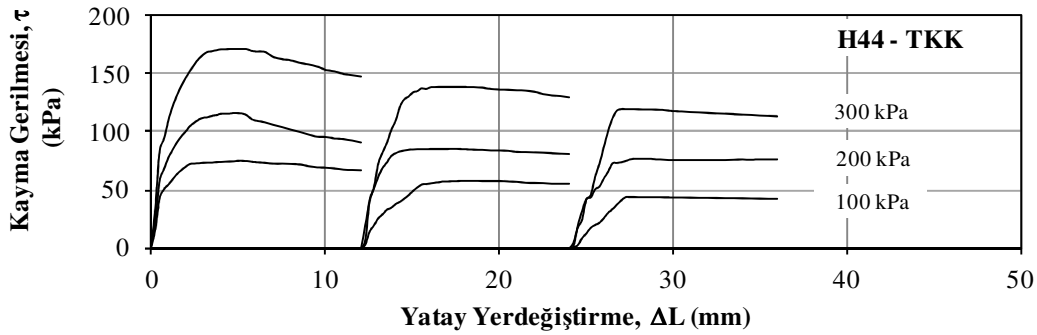



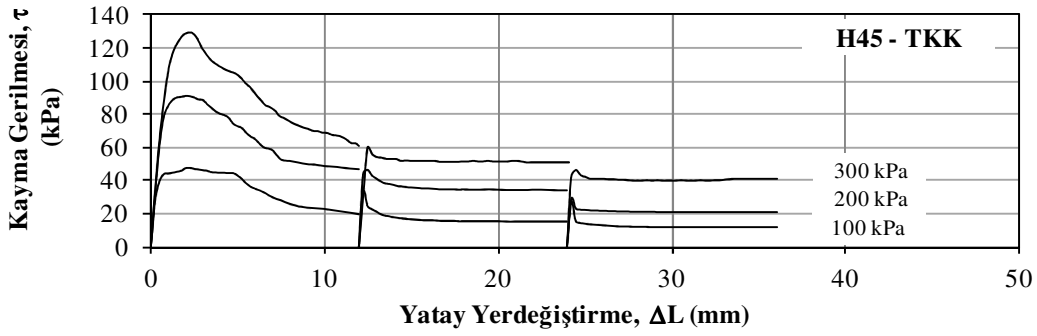




**Şekil B.10 :** H38, H39, H40, H41 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.



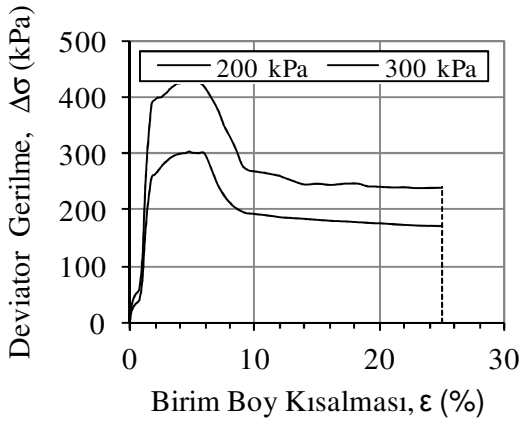



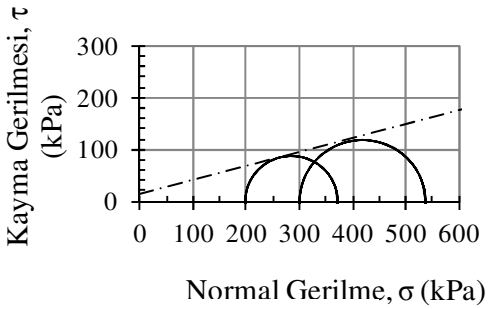



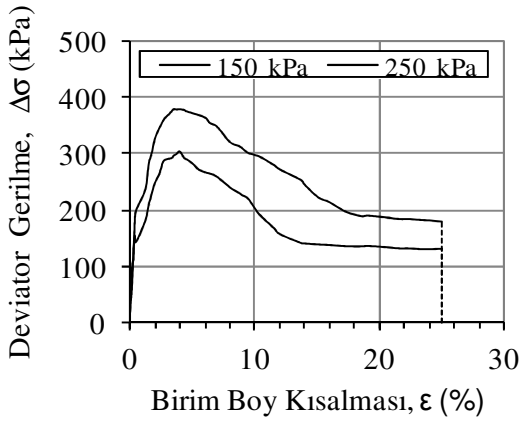

**Şekil B.11 :** H42, H43, H44, H45 numunelerine ait tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçları.

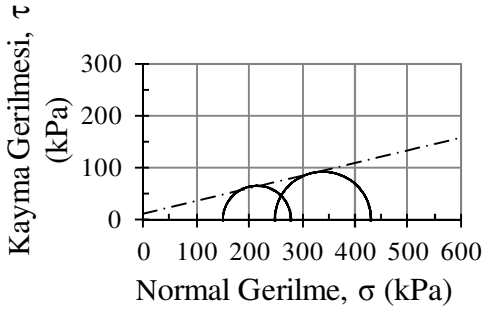
**EK C :** Üç eksenli basınç deneyleri sonuçları



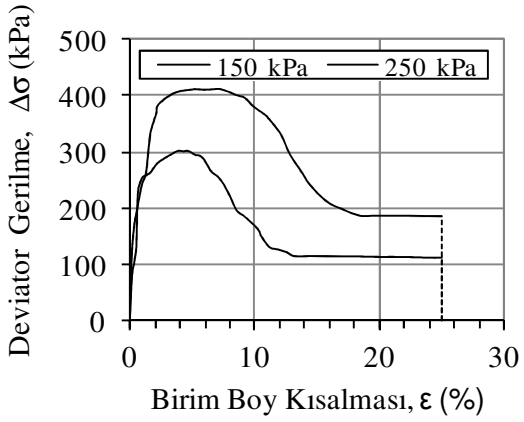



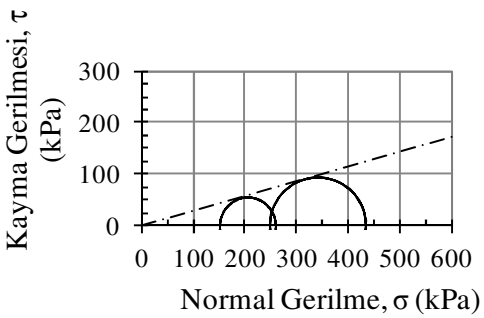

$\phi_{rez} = 15^o$
$c_{rez} = 15$ kPa



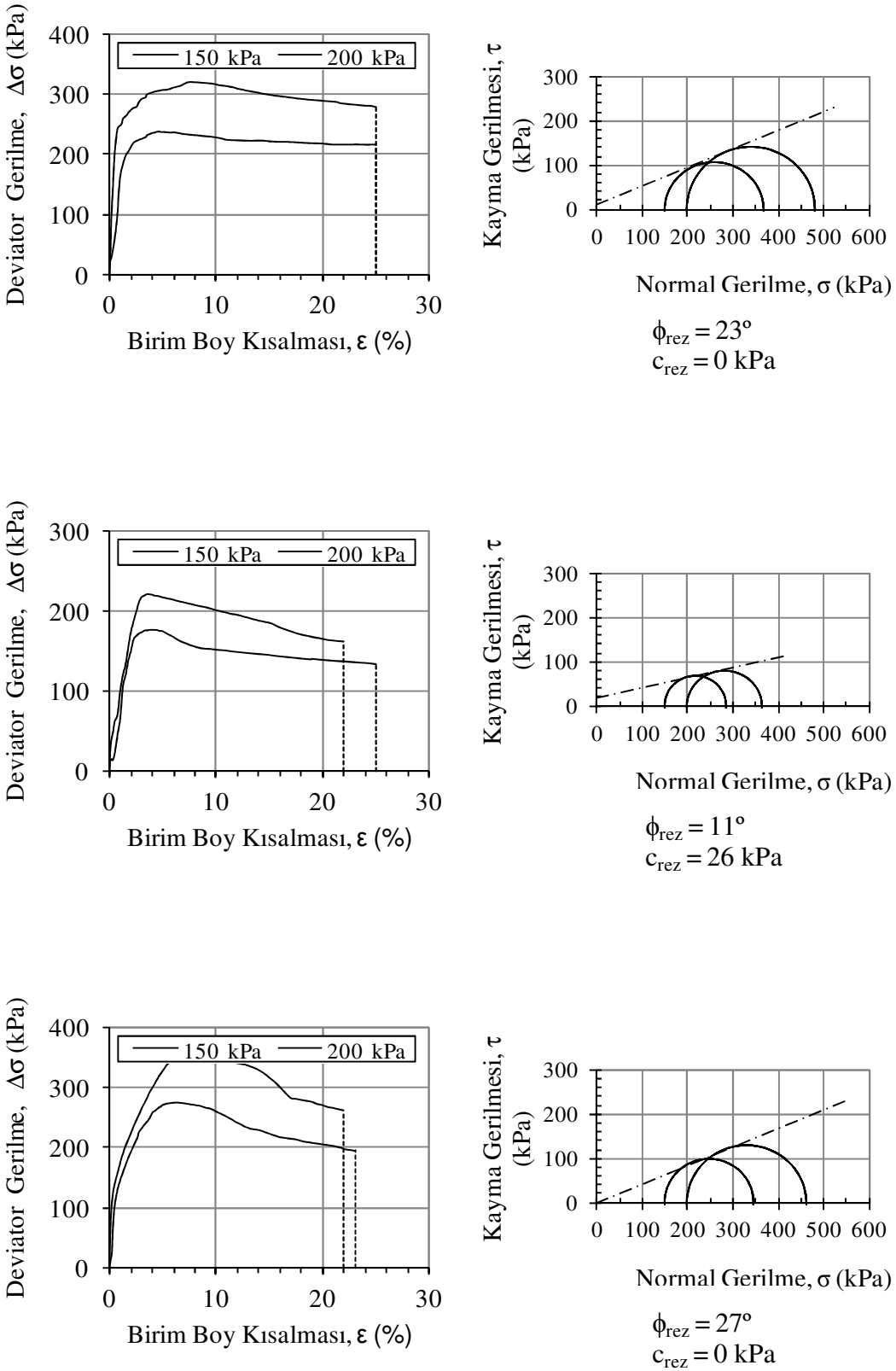

$\phi_{rez} = 11\ ^o$
$c_{rez} = 23$ kPa



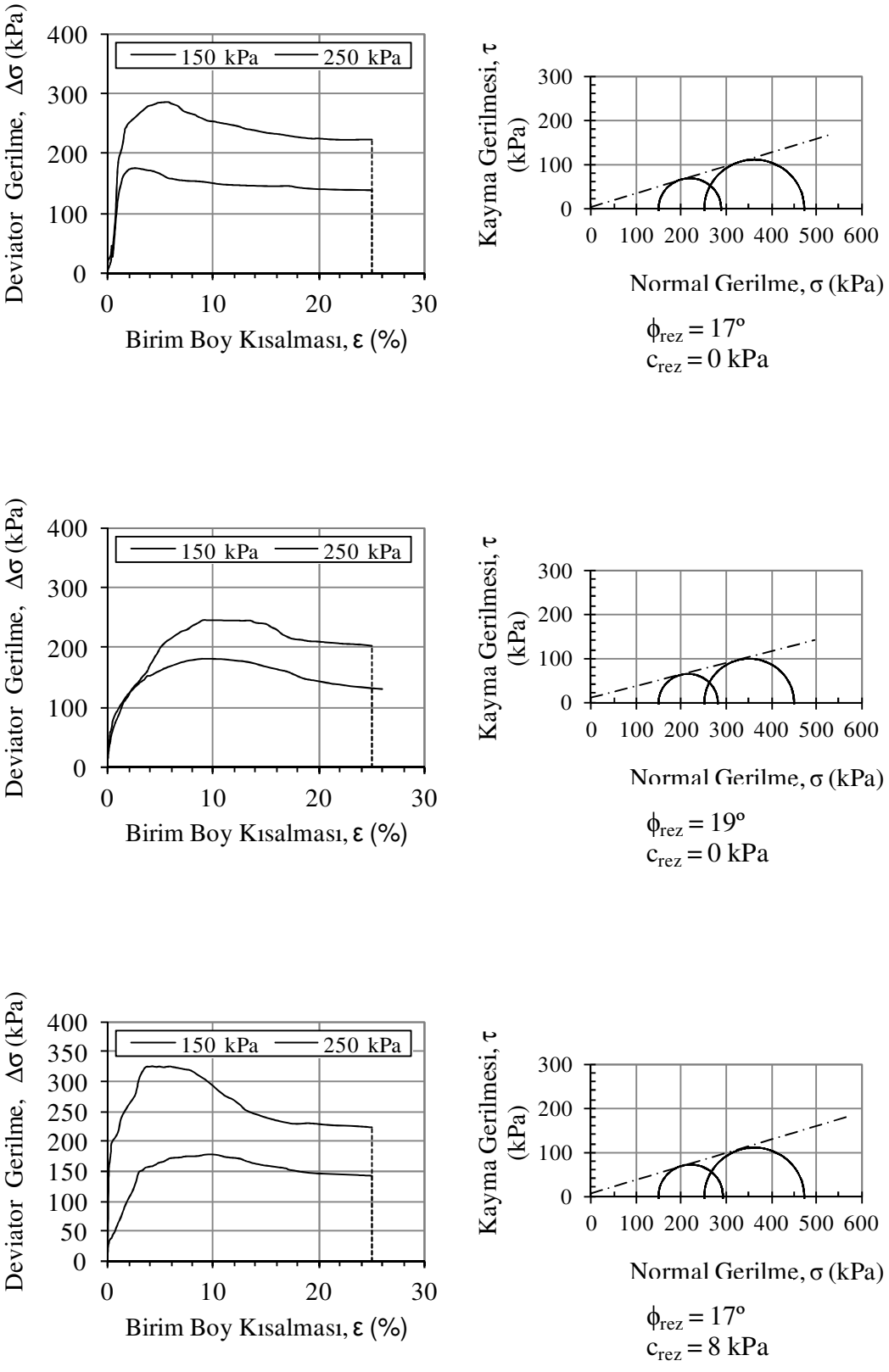




$\phi_{rez} = 16^o$
$c_{rez} = 0$ kPa

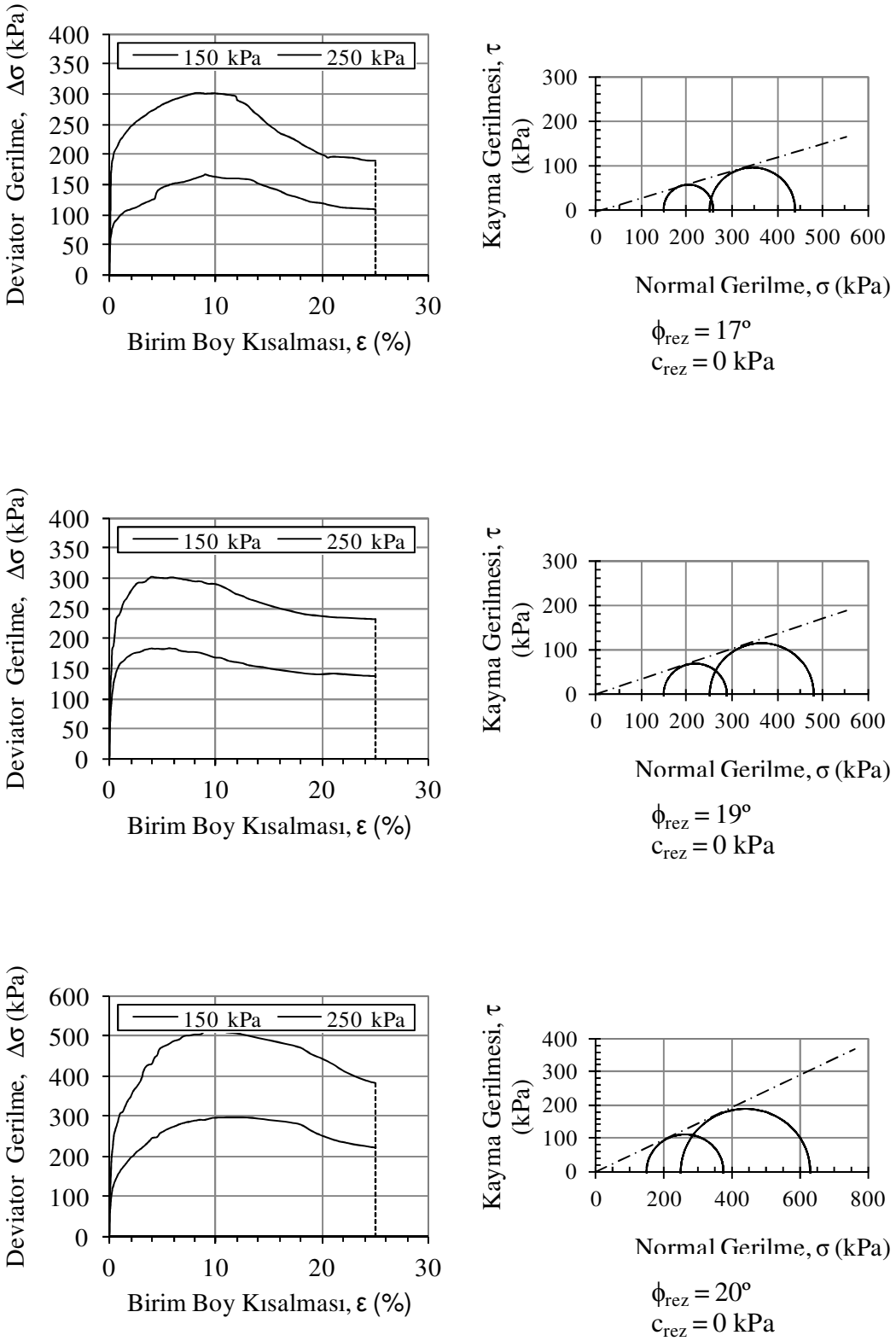
**Şekil C.1 :** H1, H2, H3 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları.




**Şekil C.2 :** H4, H5, H6 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları.

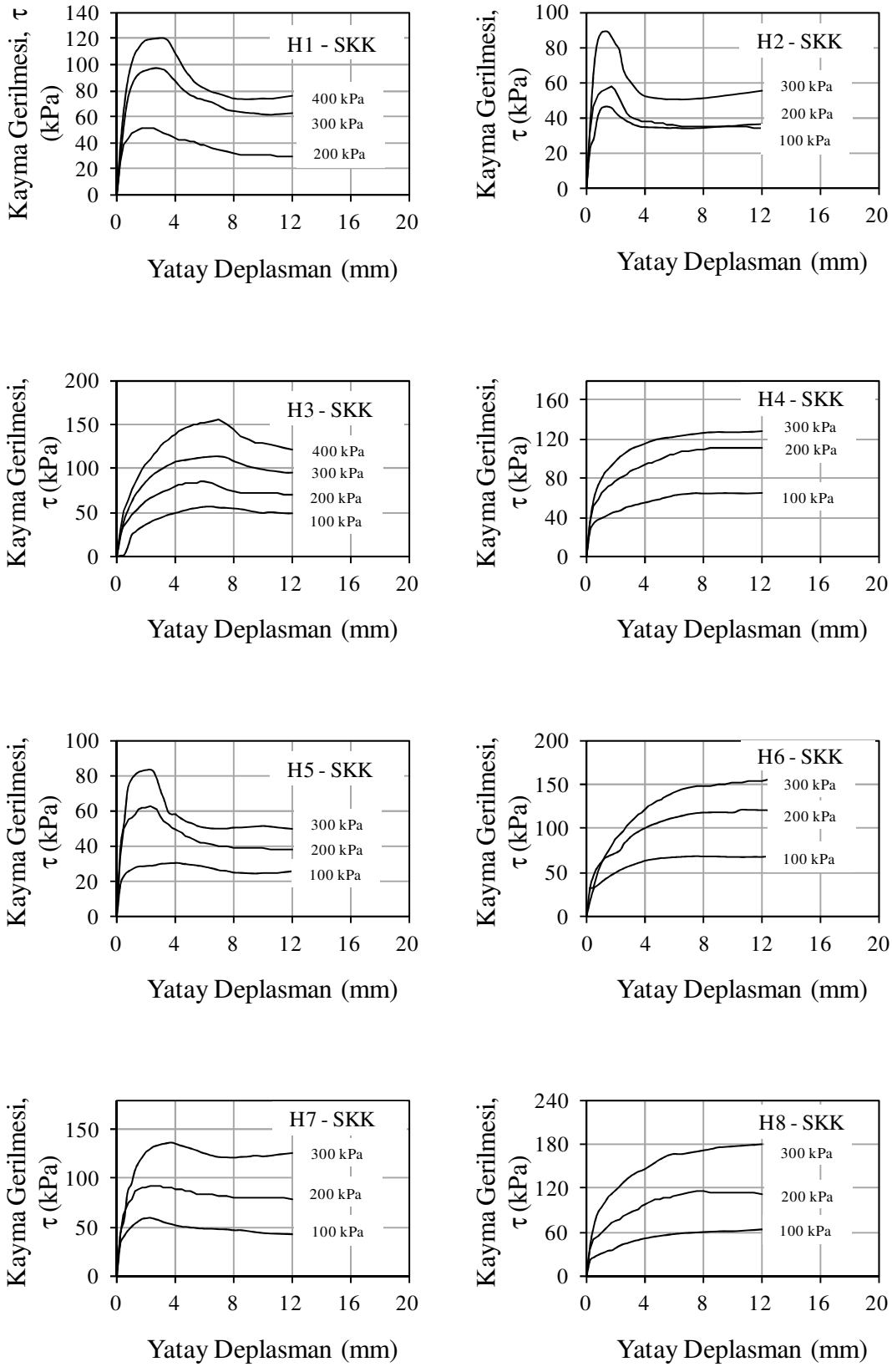



**Şekil C.3 :** H7, H8, H11 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları.

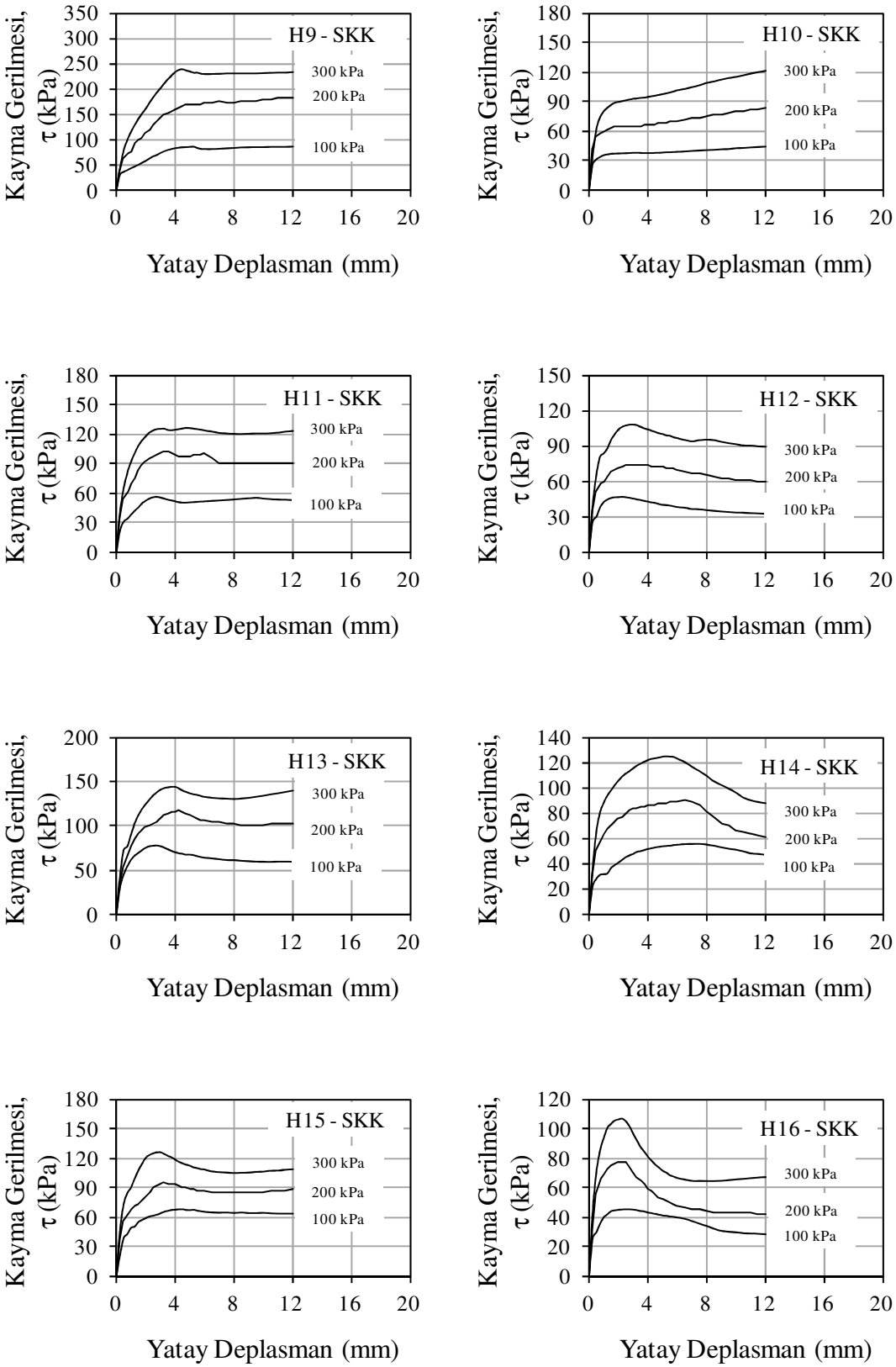



**Şekil C.4 :** H13, H14, H15 numunelerine ait konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları.

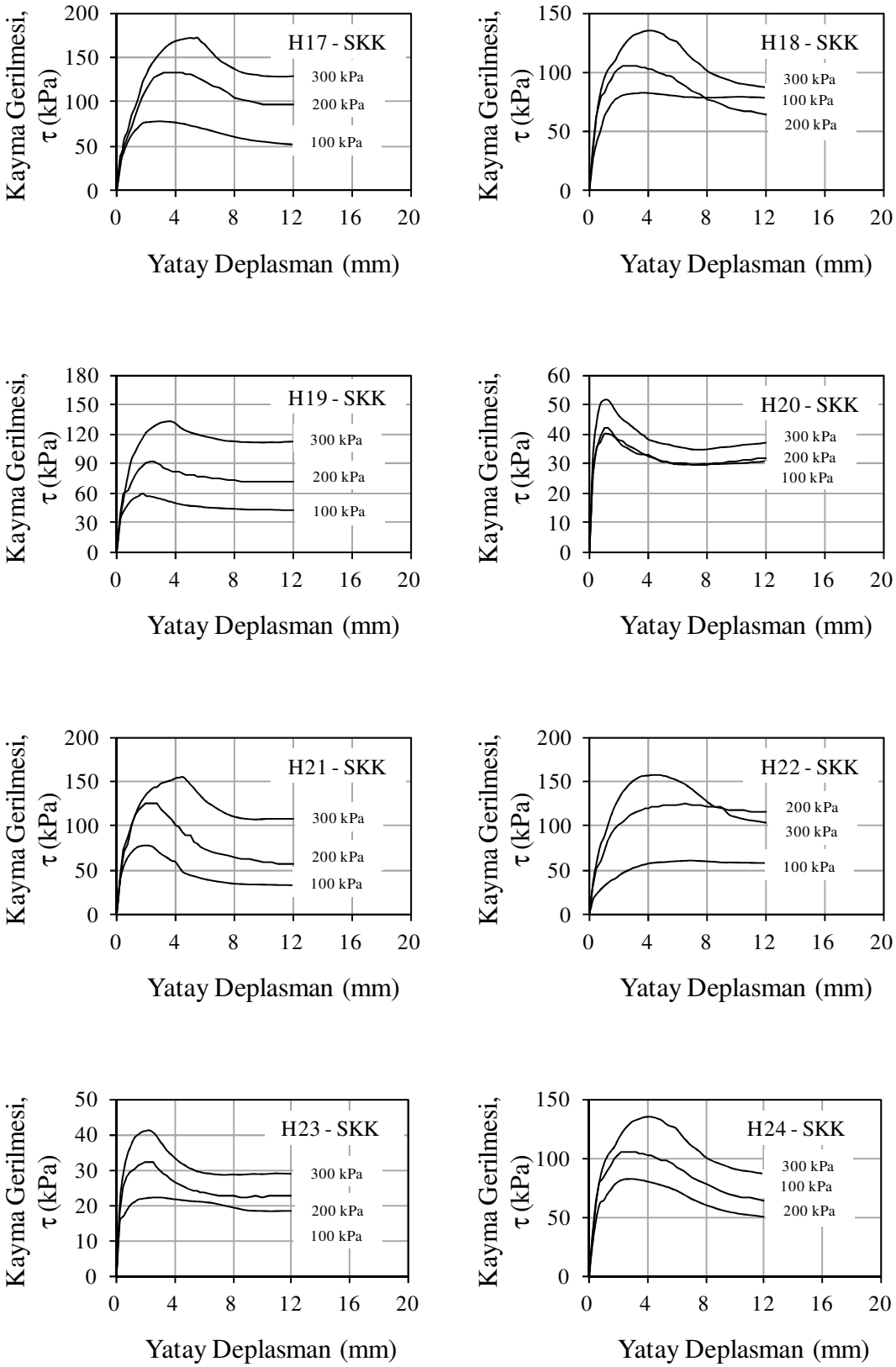
**EK D :** Kesme kutusu deneyleri sonuçları



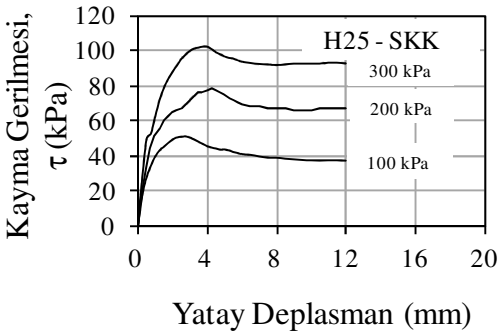

**Şekil D.1 :** H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7, H8 numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları.




**Şekil D.2 :** H9, H10, H11, H12, H13, H14, H15, H16 numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları.

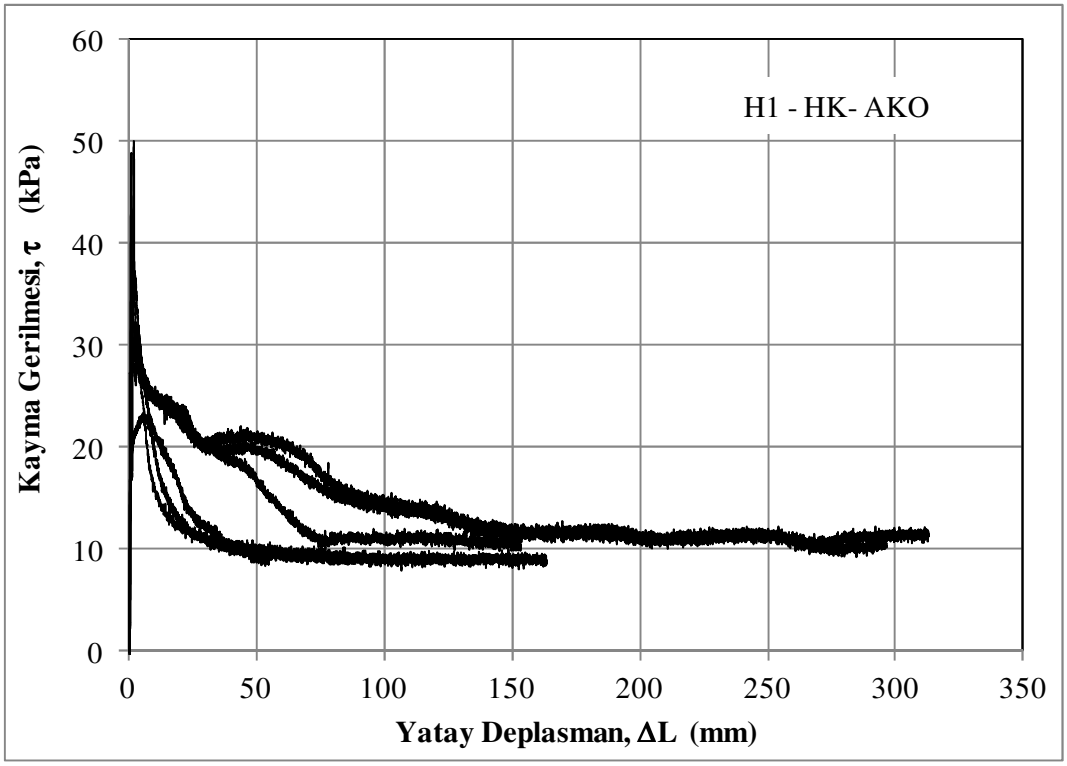


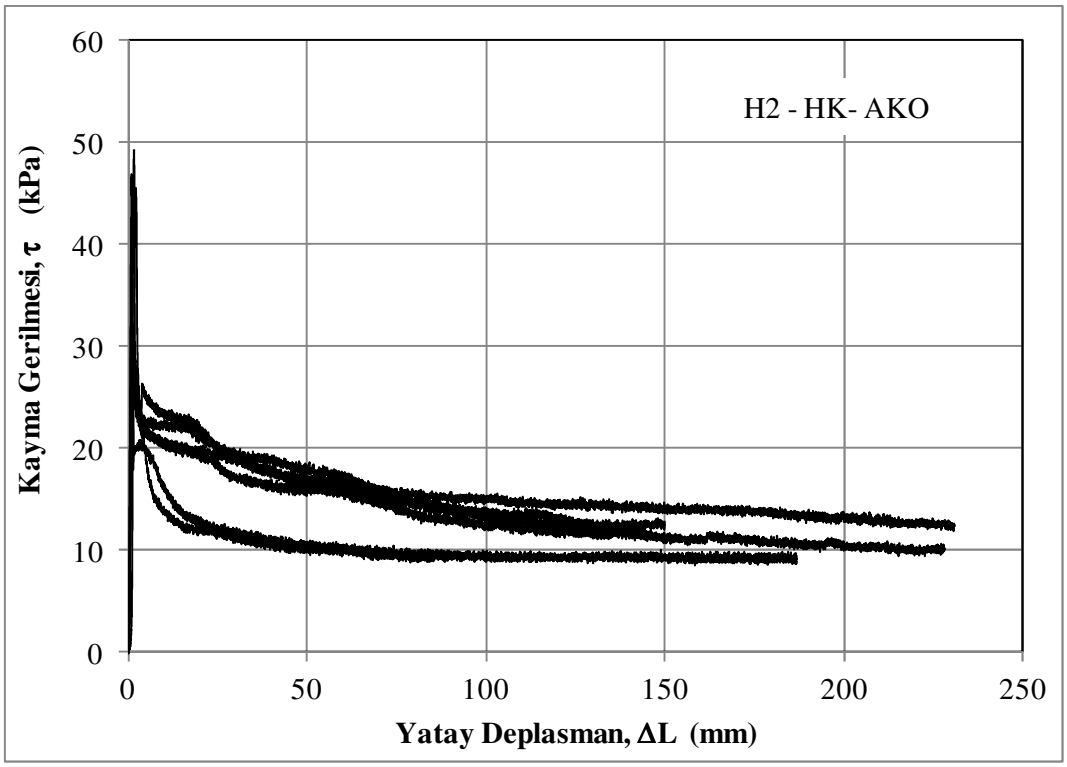

**Şekil D.3 :** H17, H18, H19, H20, H21, H22, H23, H24 numunelerine ait kesme kutusu deneyi sonuçları.



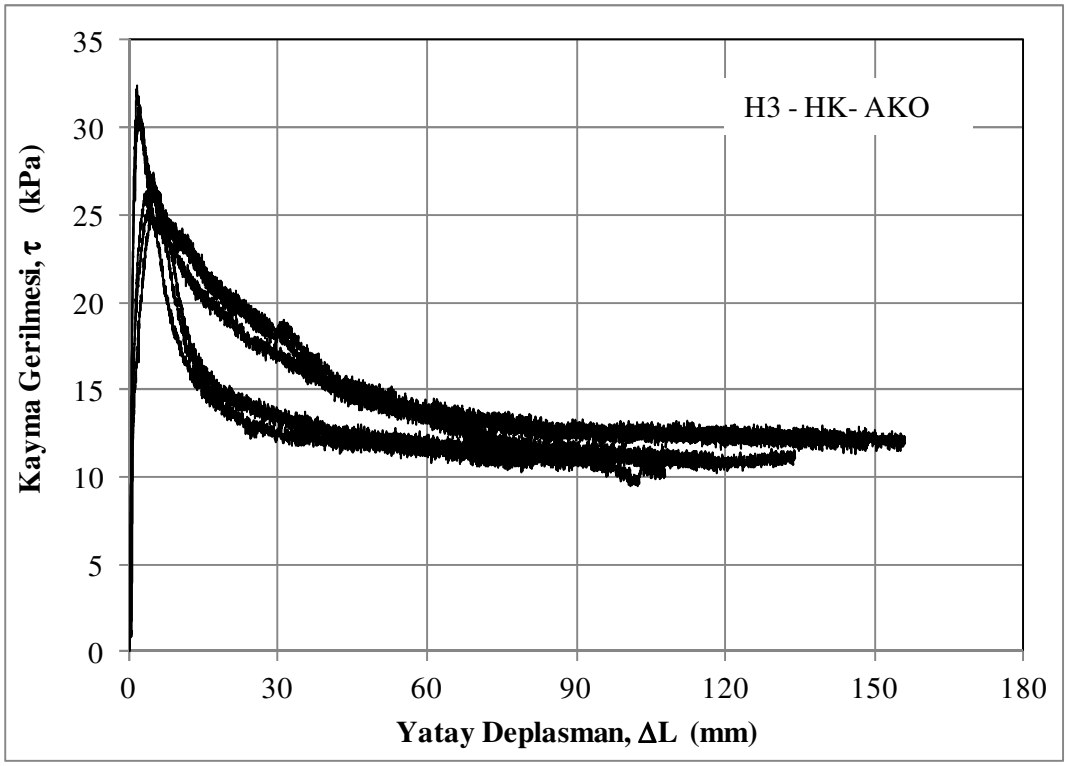

**Şekil D.4 :** H25 numunesine ait kesme kutusu deneyi sonuçları.

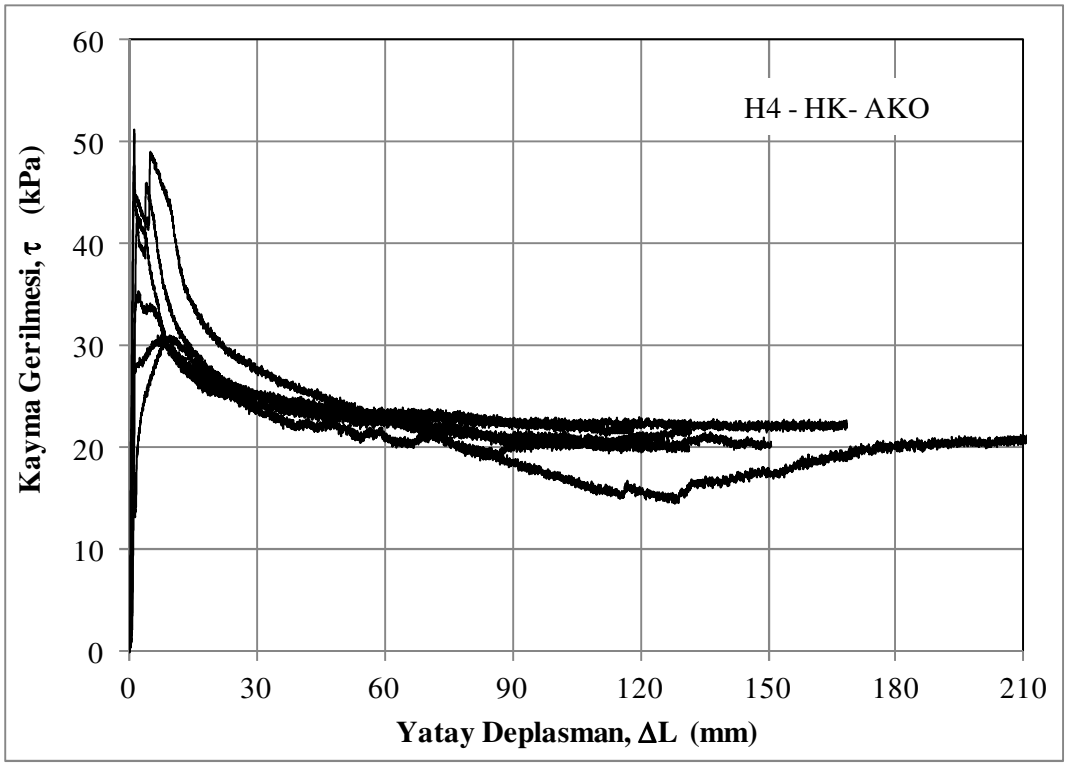
**EK E :** Aşırı konsolidasyon oranının kalıcı kayma mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapılan halka kesme deneylerinin sonuçları



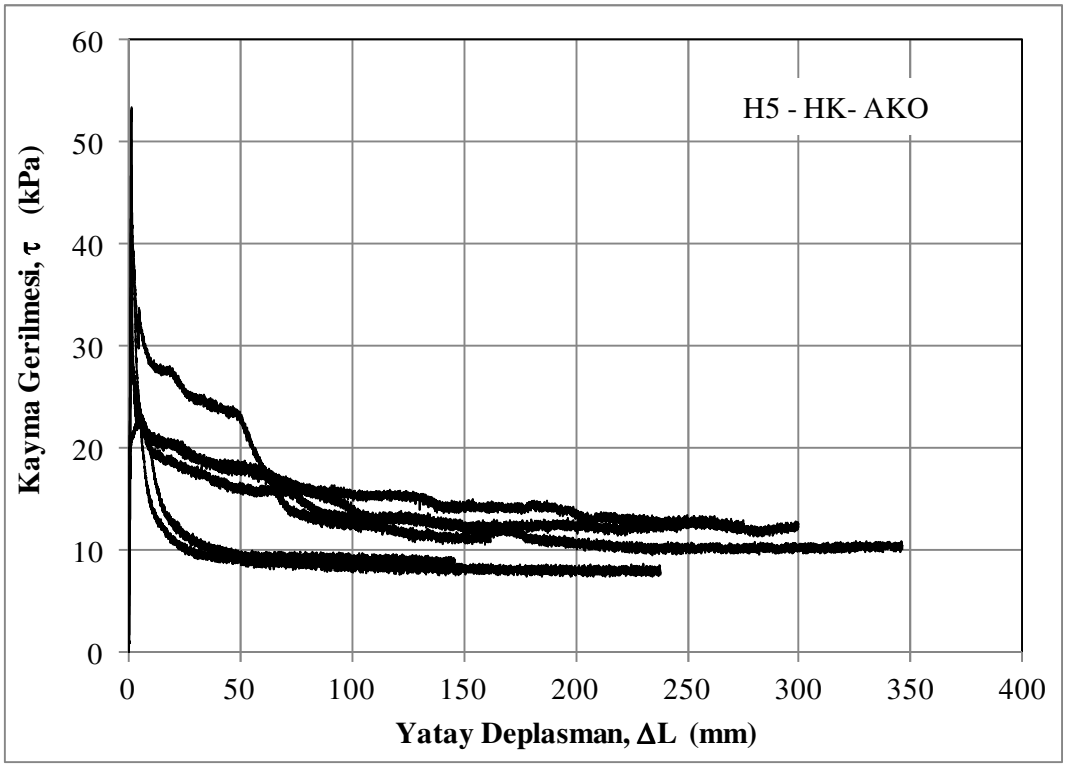



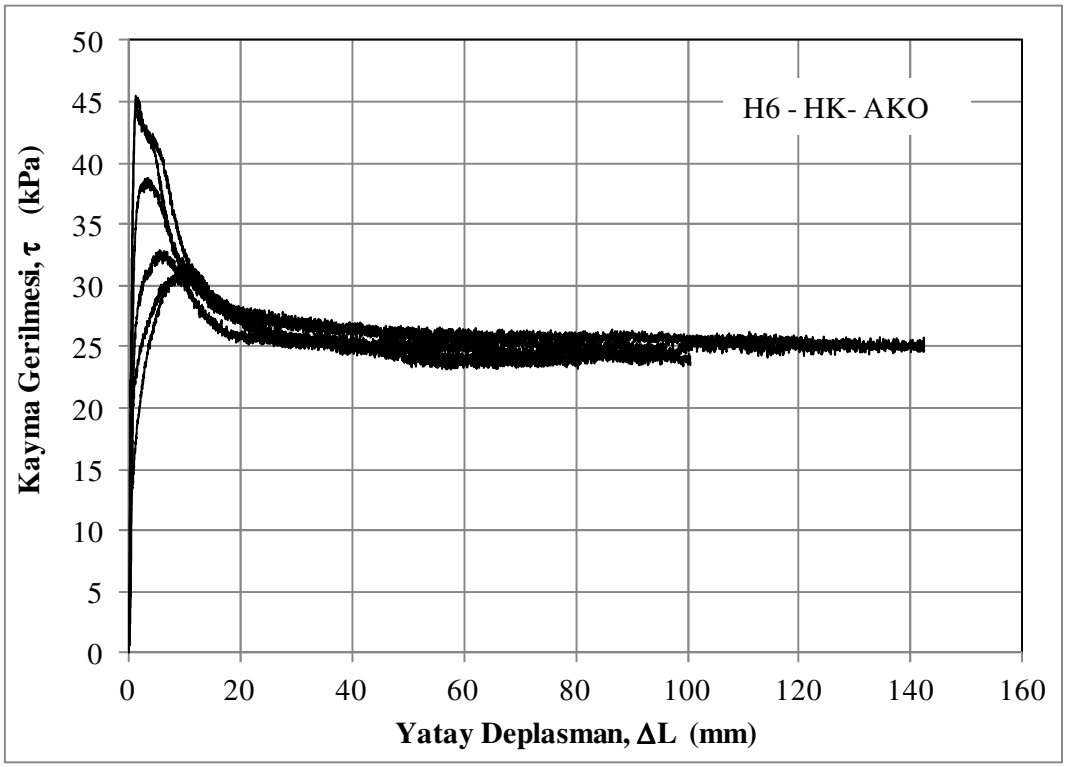

**Şekil E.1 :** H1 ve H2 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.



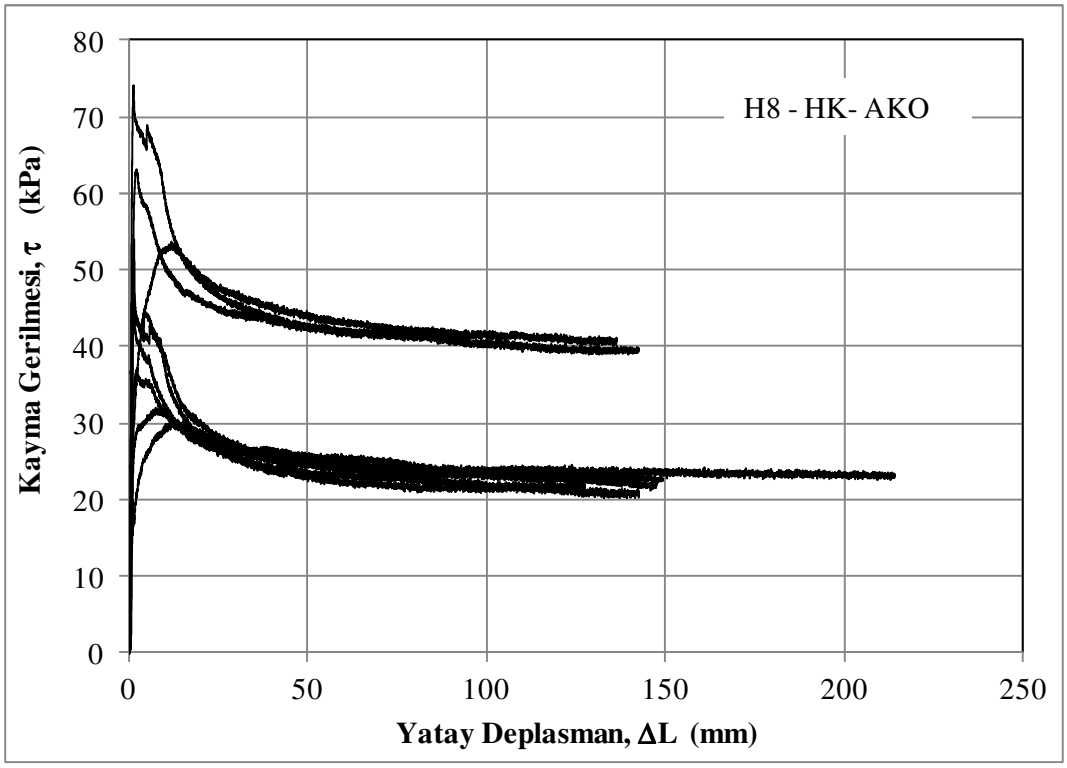



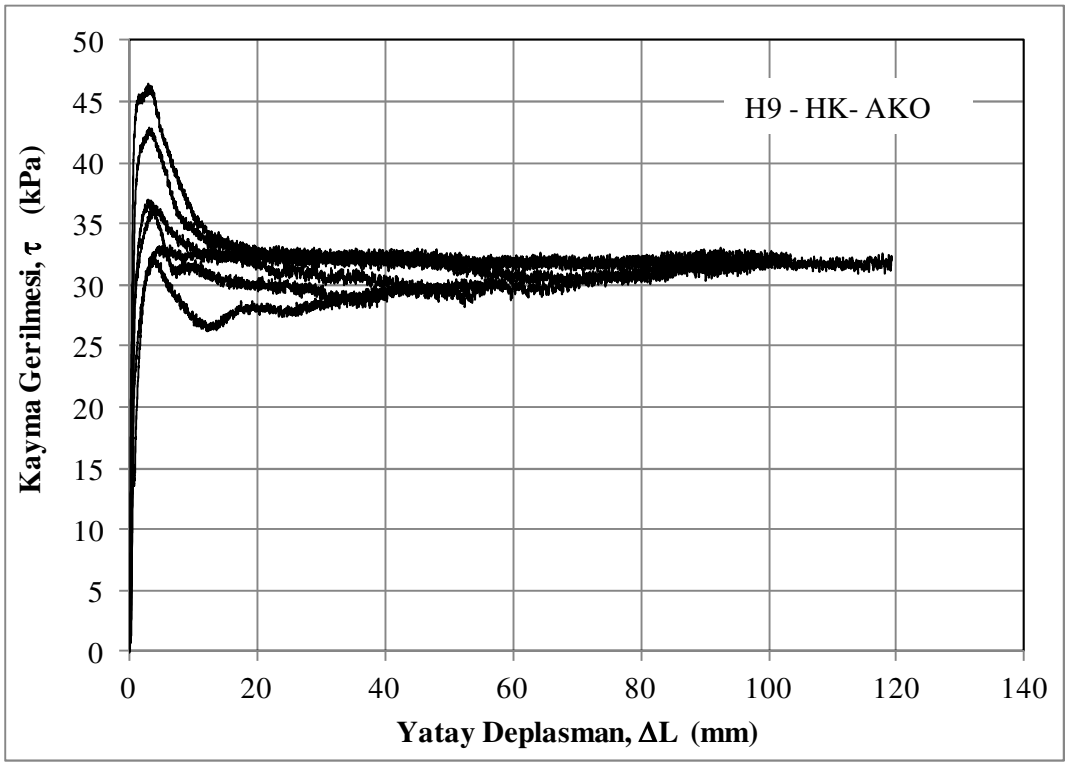

**Şekil E.2 :** H3 ve H4 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.



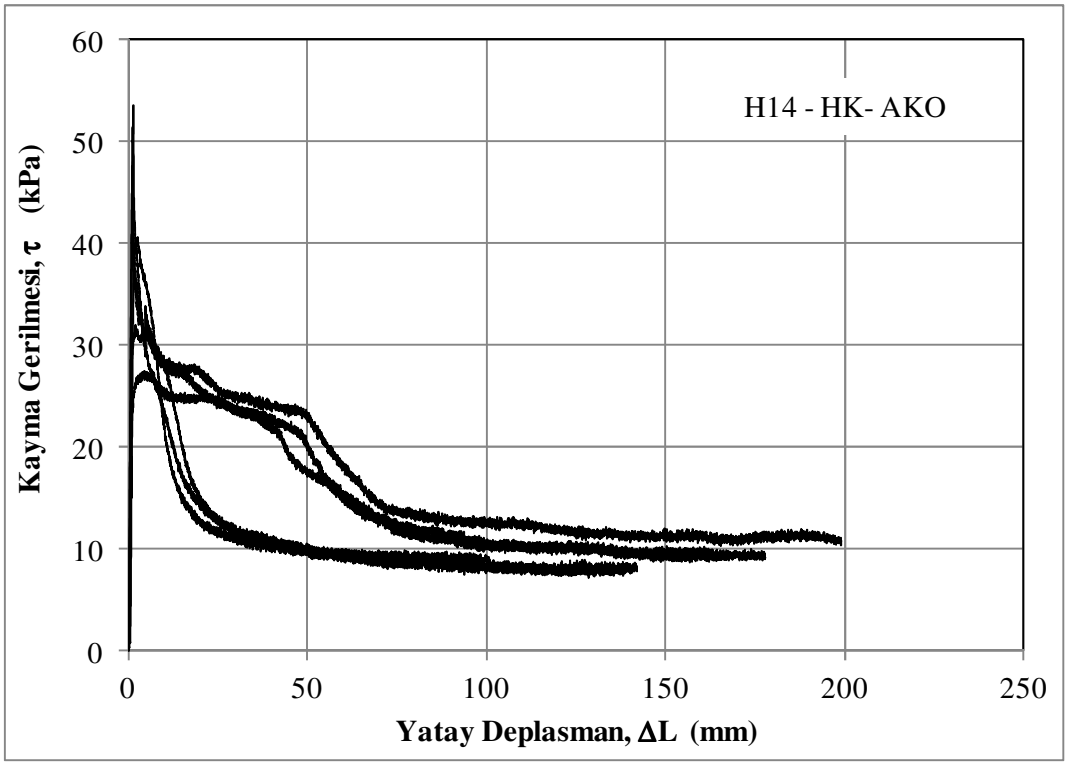



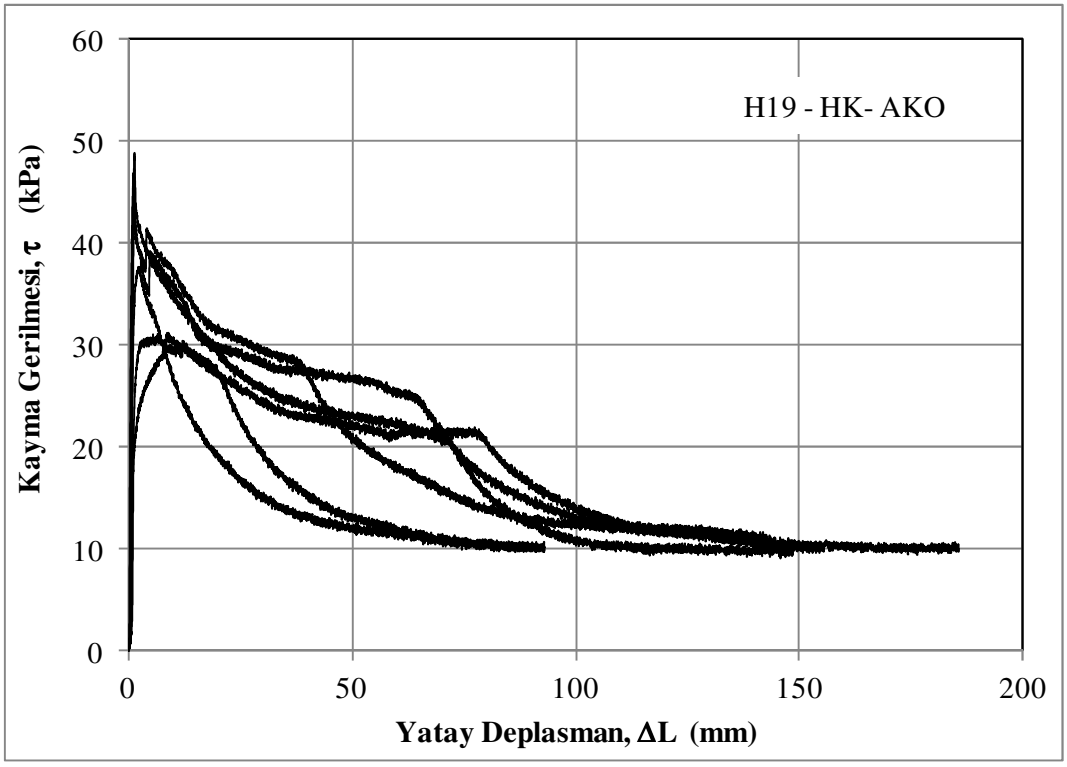

**Şekil E.3 :** H5 ve H6 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.




**Şekil E.4 :** H8 ve H9 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.



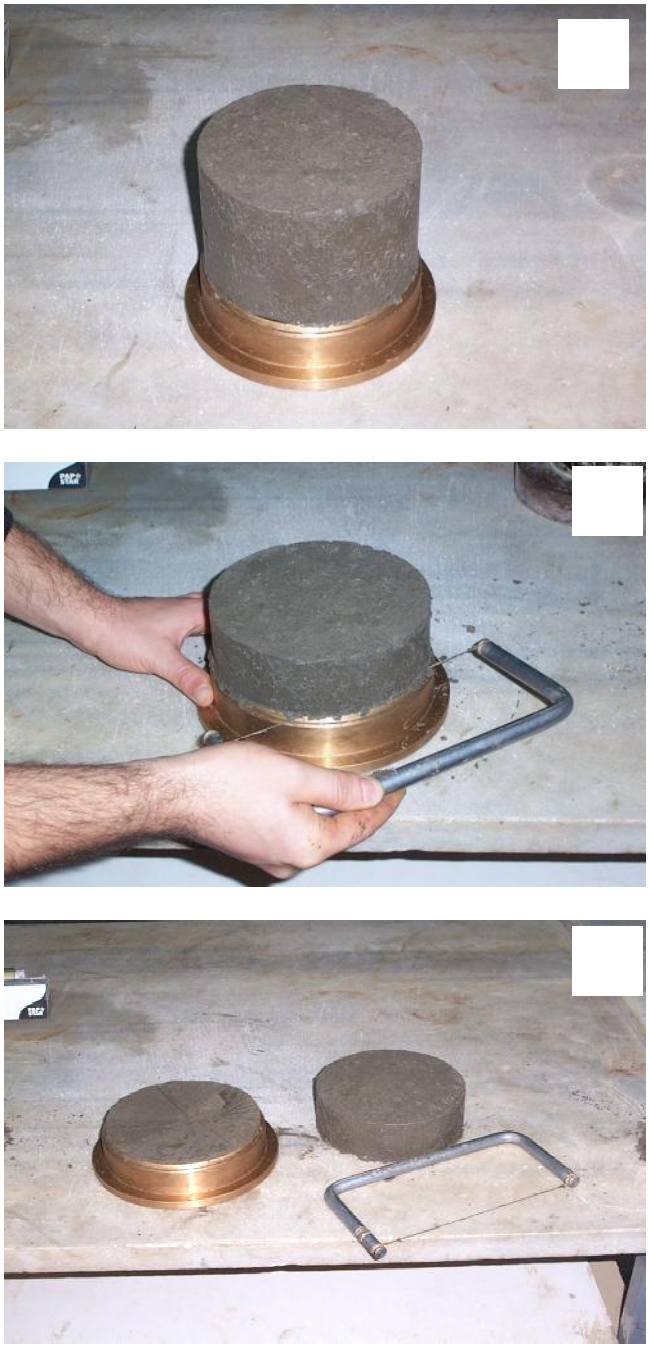




**Şekil E.5 :** H14 ve H19 numunelerinin farklı aşırı konsolidasyon oranlarında yapılan halka kesme deneyi sonuçları.

**EK F :** Halka kesme deneyi kurulumu

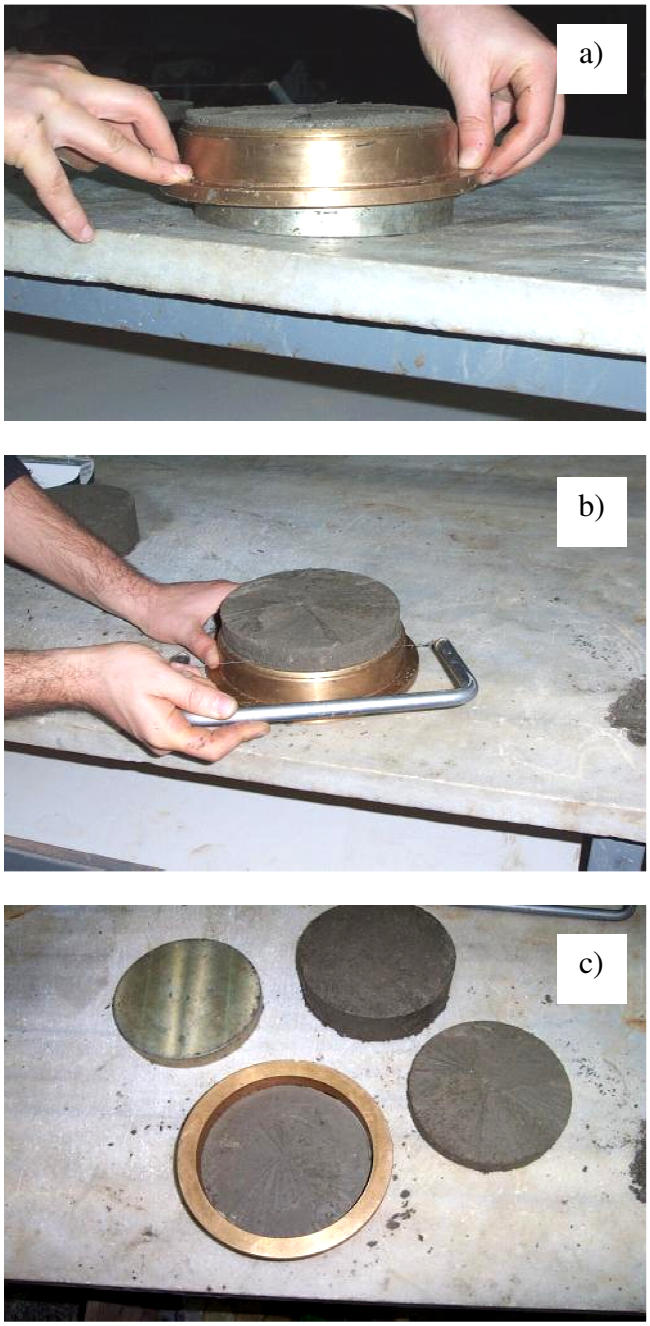
Bu bölümde halka kesme deneyinde kullanılmak üzere numune hazırlığı ve deney kurulumu anlatılmıştır.

1) **N**umune, 150 mm çapında ve 40 mm yüksekliğindeki numune hazırlama dış ringine batırılır (Şekil F.1a). Tel testere yardımıyla, ringin dışında kalan numune kesilir (Şekil F.1b). Böylece dış ring içerisinde, yüksekliği 40 mm olan numune kalır (Şekil 3.2c).



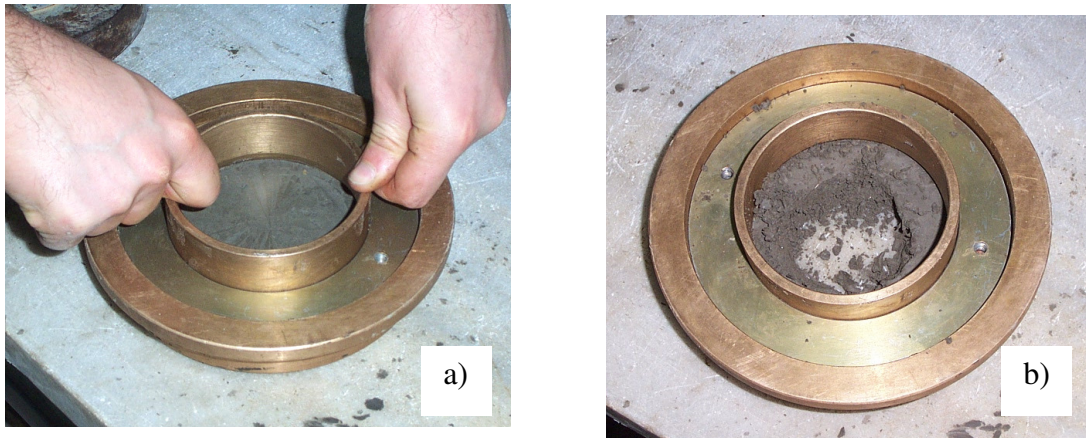
**Şekil F.1 :** Numunenin kalıptan çıkarılması ve dış ringe alınması.

2) Ring içerisindeki bu zeminin, alttan ve üstten 10 mm yüksekliğindeki kısımları kesilerek atılır. 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 F.2a) ve tel testere yardımıyla, kesilerek atılır (Şekil F.2b). Bu yüzey düzleştirildikten sonra, aynı işlem ringin diğer yüzeyine de uygulanır. Böylece dış ring içerisinde, yüksekliği 20 mm olan numune kalır (Şekil F.2c).



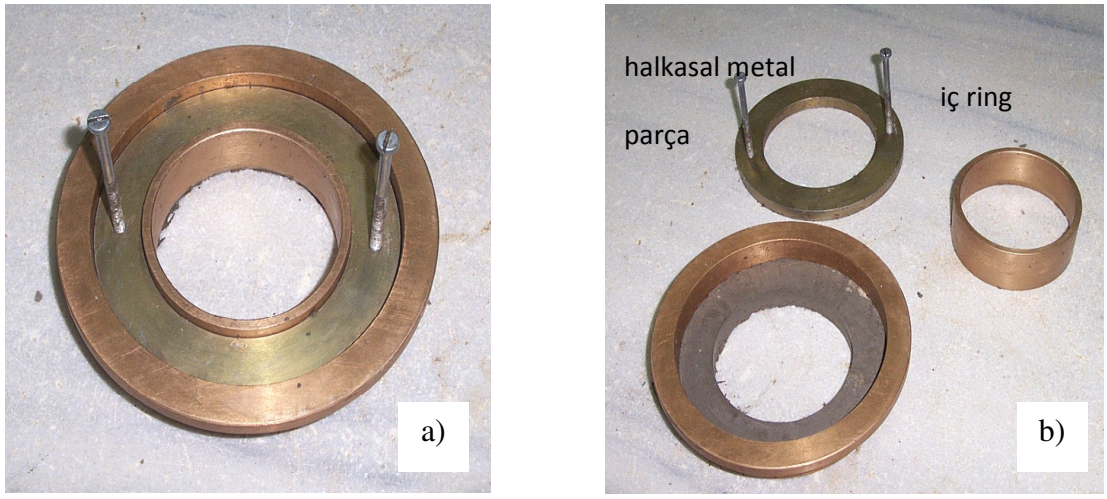

**Şekil F.2 :** Numunenin 2 cm yüksekliğine getirilmesi.

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 F.3a). Çıkarılacak zeminin orta kısmı, bir tornavida yardımıyla oyularak atılır (Şekil F.3b).




**Şekil F.3 :** Numunenin halka şekline getirilmesi.

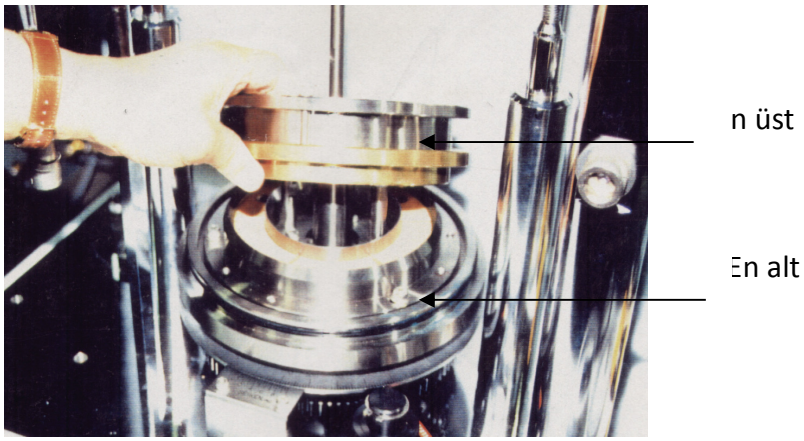
4) 100 mm çaplı iç ring zemine tamamen batırılarak 100 mm çaplı iç kısım çıkarılır (Şekil F.4a). Zeminin 100 mm çapındaki iç kısmı oyularak çıkarıldıktan sonra, önce halkasal metal parça, daha sonra iç ring çıkarılır. Böylece dış ring içerisinde, iç çapı 100 mm ve dış çapı 150 mm olan halka şeklinde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




**Şekil F.4 :** Numunenin deneye hazır durumu.

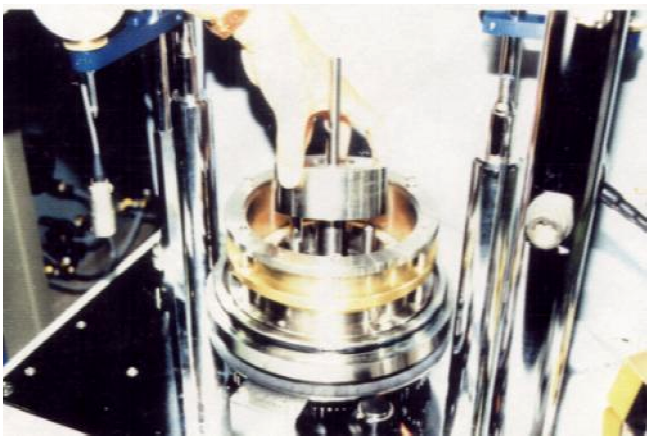
**Deney Aletinin Montajı ve Deneyin Yapılışı**

En üst dış ring ve sarı renkli (kılavuz) ring, sarı vidalarla (3 tane) birbirine tutturulur ve Şekil F.5'te görüldüğü gibi en alt dış ring üzerine yerleştirilir.



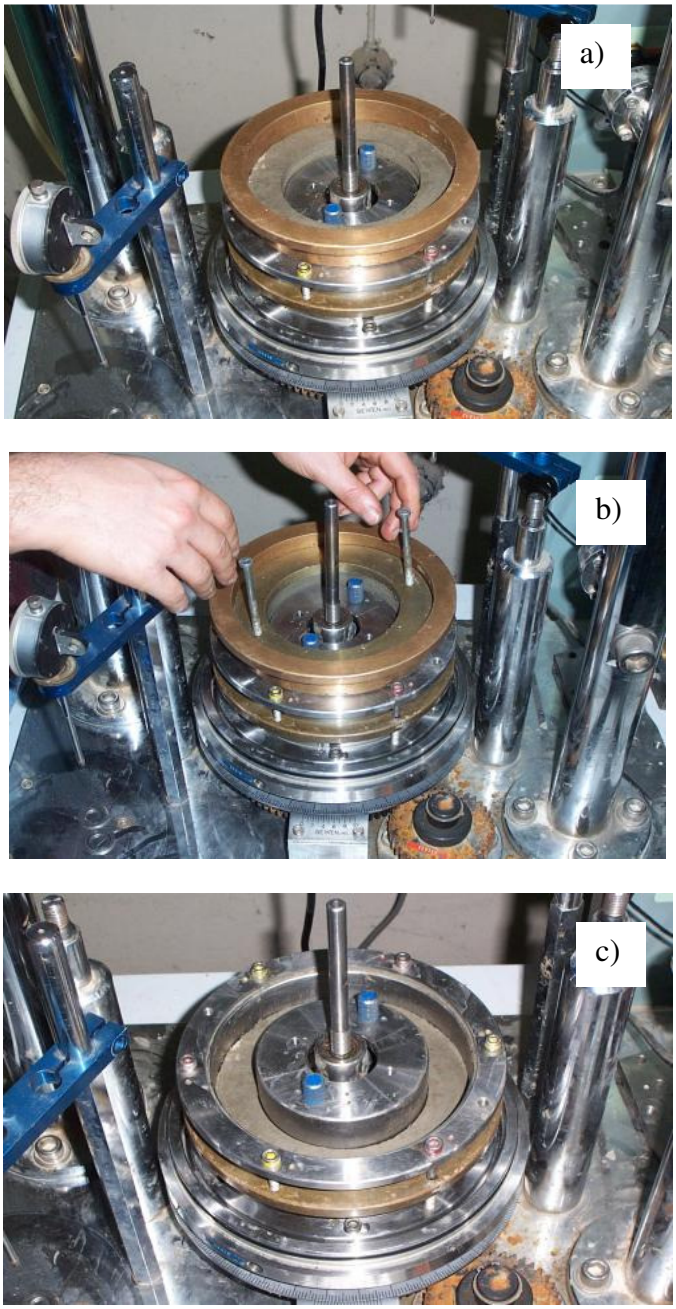

**Şekil F.5 :** En üst dış ve kılavuz ringlerin montajı.

Şekil F.6'da 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.



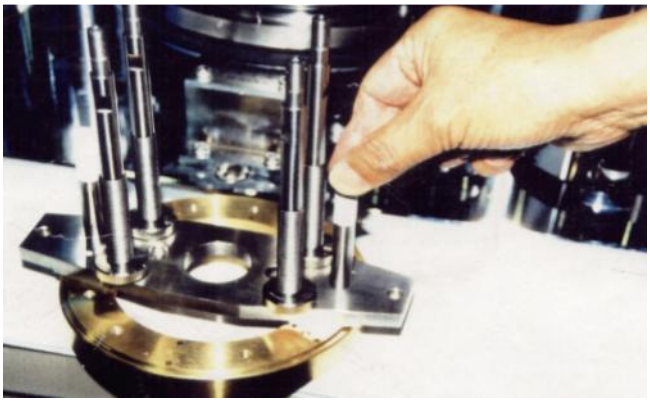
**Şekil F.6 :** İç ringin montajı.

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 F.7a). Bu ring içerisindeki numune, halka şeklindeki metal parça yardımıyla itilerek halka kesme hücresine yerleştirilir (Şekil F.7b). Numunenin üst kısmına da, daha önce su içinde bekletilerek doyurulmuş poroz kağıt konulmalıdır (Şekil F.7c).



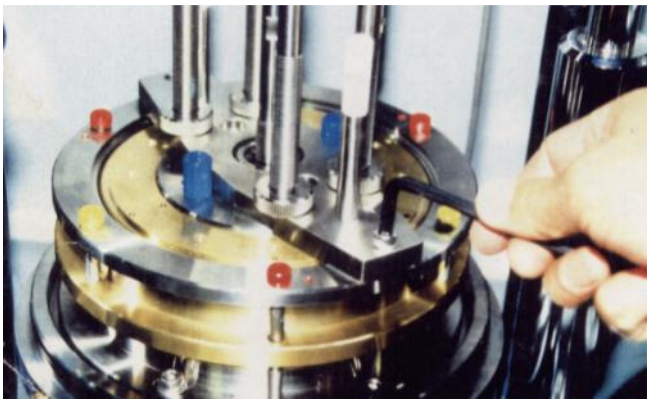

**Şekil F.7 :** Numunenin halka kesme deney aletine yerleştirilmesi.

En üst iç ring ve çekme metali, beyaz renkli vidalarla birbirlerine tutturulur. Daha sonra çekme çubukları, somunlarla birlikte çekme metaline takılır (Şekil F.8).



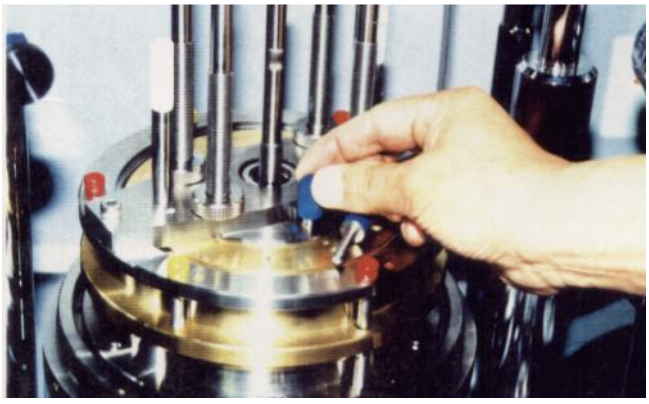
**Şekil F.8 :** En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının montajı

En üst iç ring ve çekme metali, 4 vida ile sisteme sabitlenir (Şekil 3F.9).



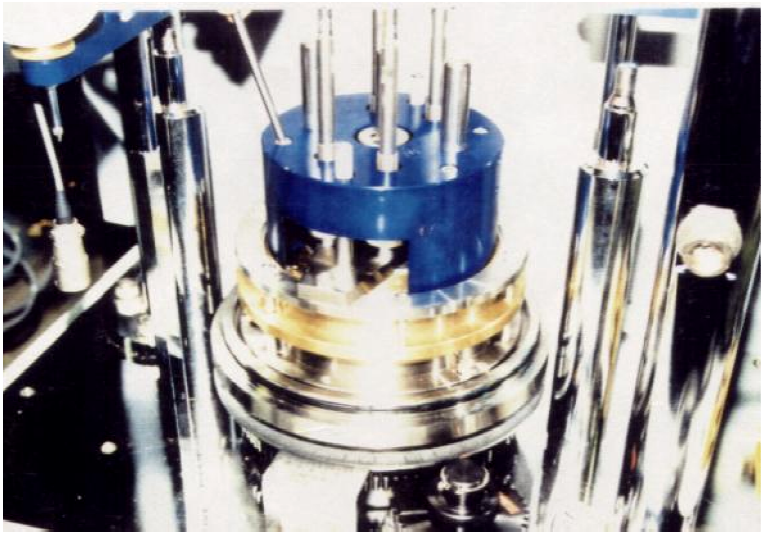
**Şekil F.9 :** En üst iç ring, çekme metali ve çekme çubuklarının deney aletine montajı.

2 mavi pim çekilerek çıkarılır (Şekil F.10).



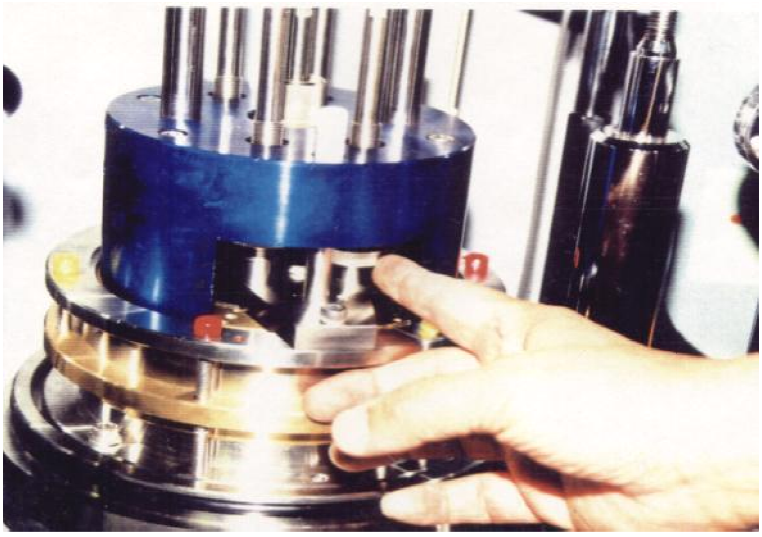
**Şekil F.10 :** Mavi renkli pimlerin çıkarılması.

Mavi renkli basınç plakası yerleştirilerek, 4 vida ile sıkıştırılır (Şekil F.11).



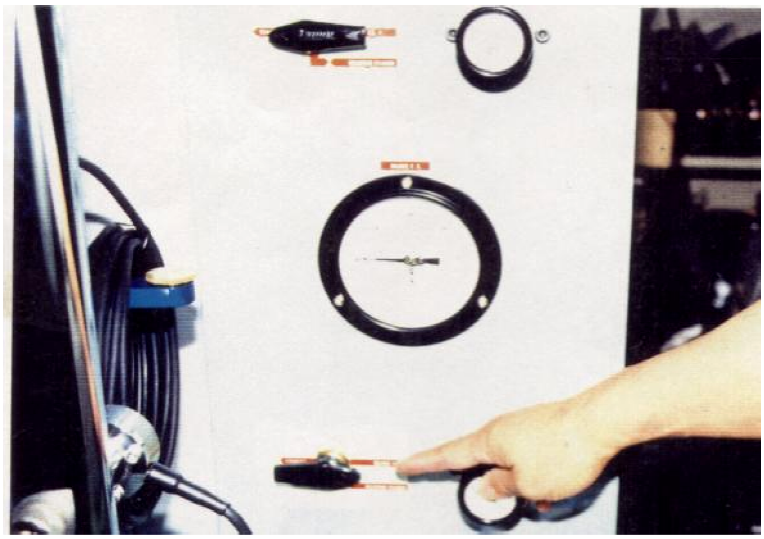
**Şekil F.11 :** Basınç plakasının montajı.

Çekme çubuklarında bulunan 4 somun, sağa doğru çevrilerek mavi basınç plakasına değdirilir (Şekil F.12).



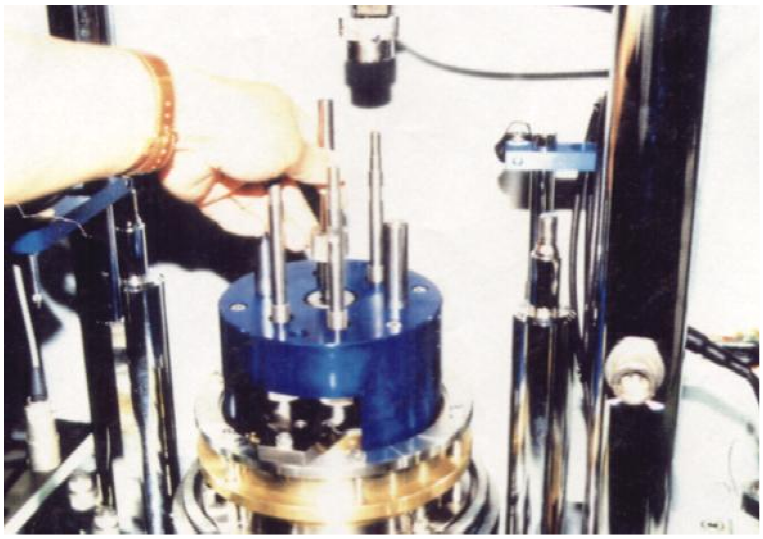
**Şekil F.12 :** Somunların basınç plakasına sabitlenmesi.

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 F.13).



**Şekil F.13 :** Dengeleme basıncının uygulanması.

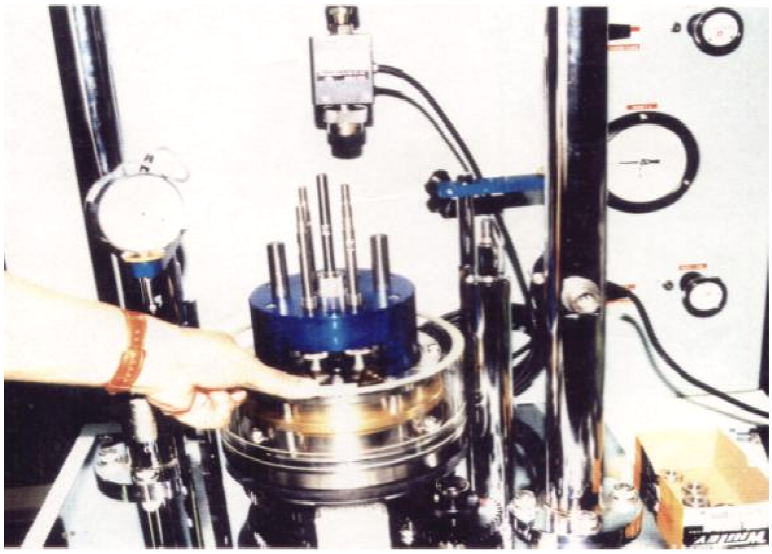
Şekil F.14'te görüldüğü gibi düşey yük uygulama şaftına yuk uygulayacak şekilde çekme metallerine ana somun takılır.



**Şekil F.14 :** Düşey yük uygulama şaftının yerleştirilmesi.

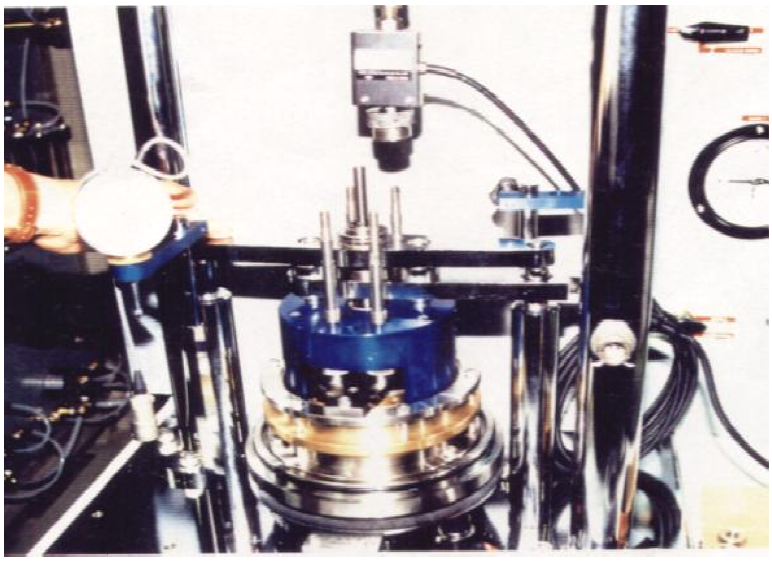
Dengeleme basıncı (balancing pressure) vanası sola (exhaust yönüne) çevrilir. Bu işlemden sonra ortadaki yukarı doğru haraket etmiş olan şaft, aşağı doğru inerek eski konumunu alır. Böylece ona takılan ana somun, mavi renkli basınç plakasına değmiş olacaktır.

Numuneyi doyurmak amacıyla koyulacak suyu tutmaya yarayan su yatağı yerleştirilir (Şekil F.15).



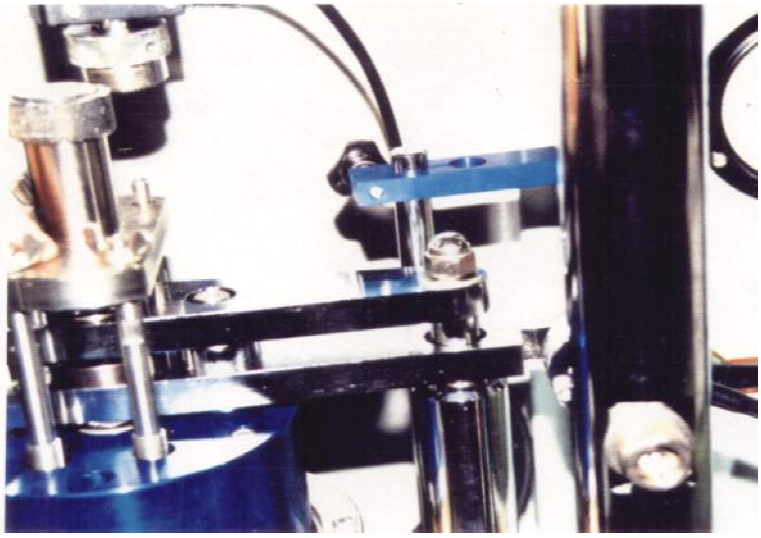
**Şekil F.15 :** Su yatağının yerleştirilmesi.

Tork kolu 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 doğultuya 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 F.16).



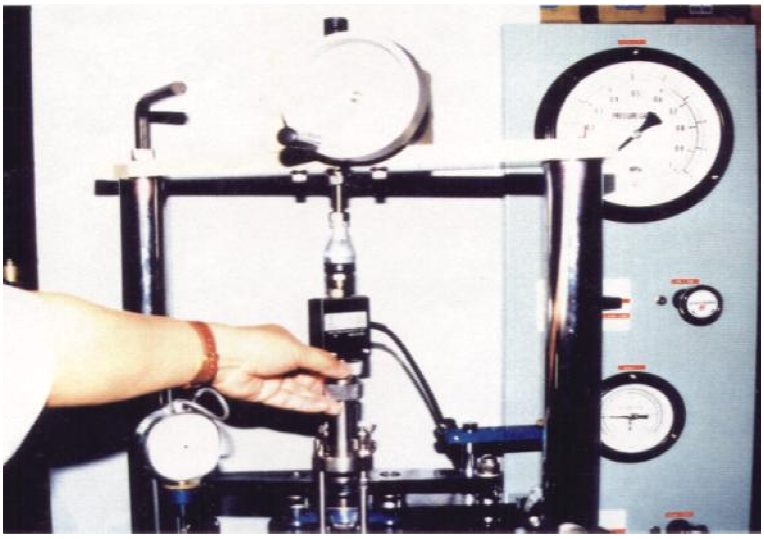
**Şekil F.16 :** Tork kolunun yerleştirilmesi.

Ring çekme metali yerleştirilerek, 4 kelebek somun ile sabitlenir (Şekil F.17).



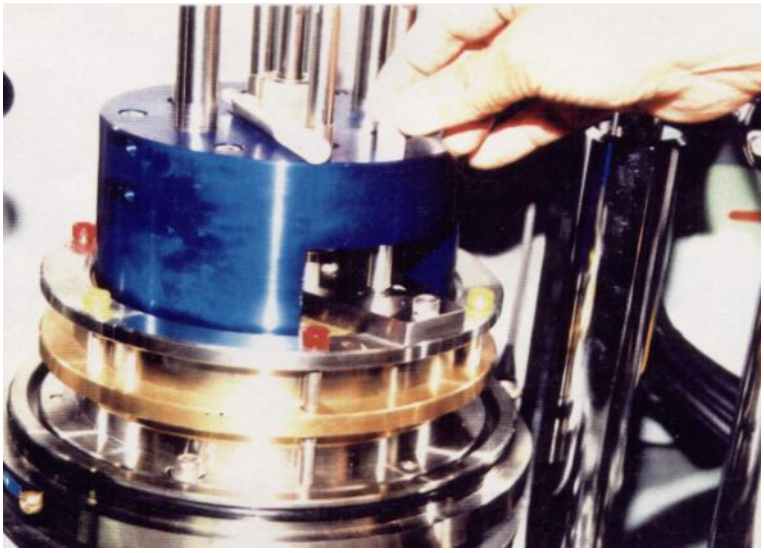
**Şekil F.17 :** Ring çekme metalinin yerleştirilmesi.

15) Düşey yüzey sürtünmesini ölçen alıcı, krikonun sağa doğru çevrilmesiyle, ring çekme metaline değdirildikten sonra ring çekme metali ile sabitlenir (Şekil F.18).



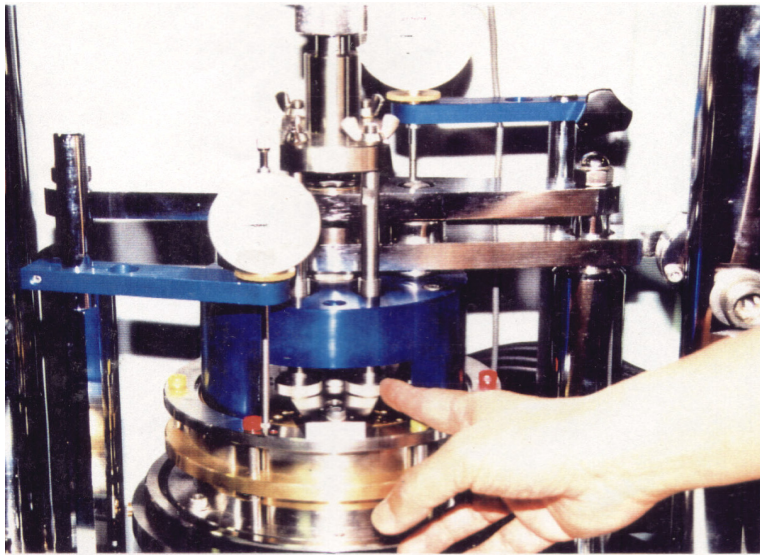
**Şekil F.18 :** Sürtünme yükü alıcısının montajı.

Mavi basınç plakasındaki beyaz renkli kalın vidalar çıkarılır (Şekil F.19).



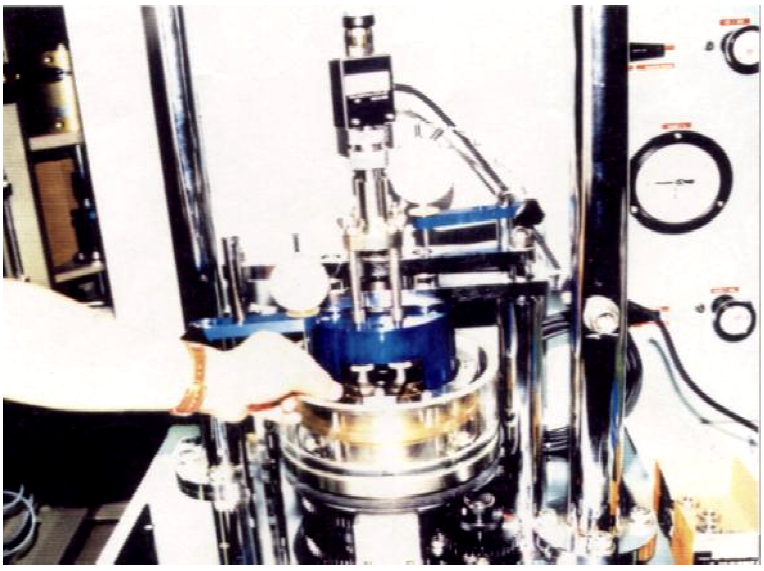
**Şekil F.19 :** Beyaz renkli vidaların çıkarılması.

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 F.20).



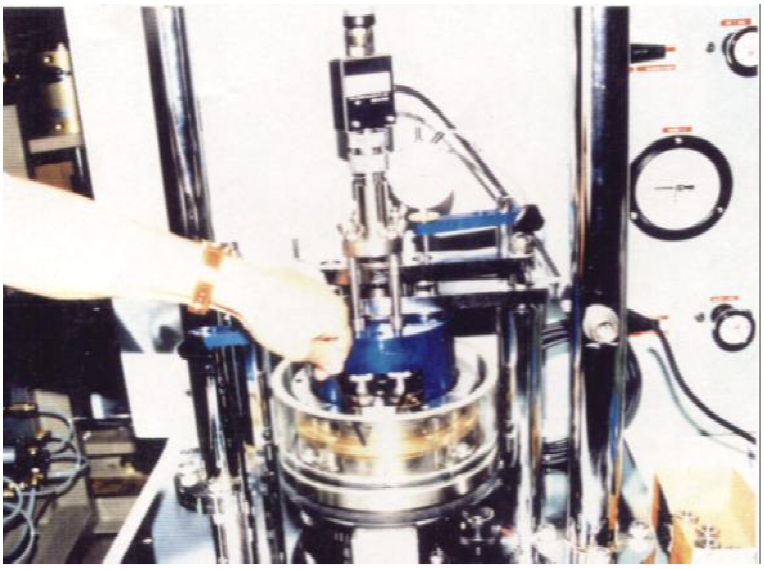
**Şekil F.20 :** Somunların gevşetilmesi.

En üst dış ringteki sarı ve kırmızı renkli vidalar çıkarılır (Şekil F.21).



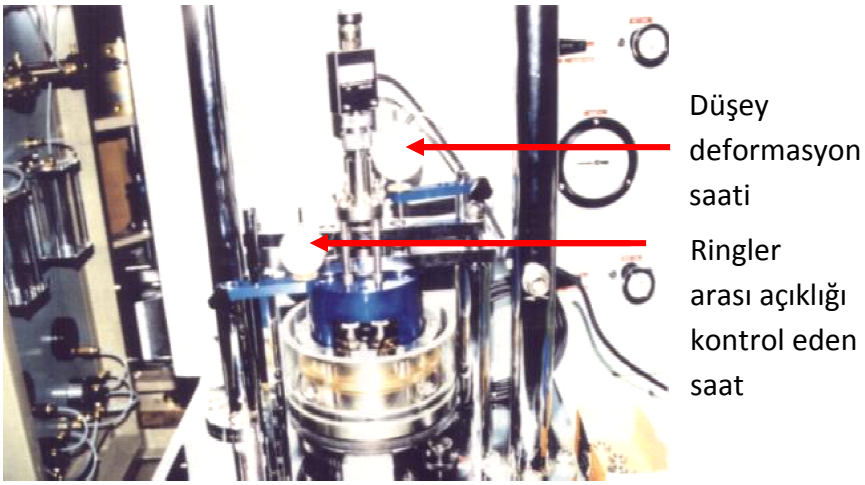
**Şekil F.21 :** Sarı ve kırmızı renkli vidaların çıkarılması.

Sarı renkli ring, kesme yüzeyini oluşturmak için aşağı indirilir. Bu ringin itilerek en alt dış ringe değdirildiğinden emin olunmalıdır (Şekil F.22).



**Şekil F.22 :** Sarı renkli ringin aşağı indirilmesi.

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 değecek şekilde sabitlenir (Şekil F.23).



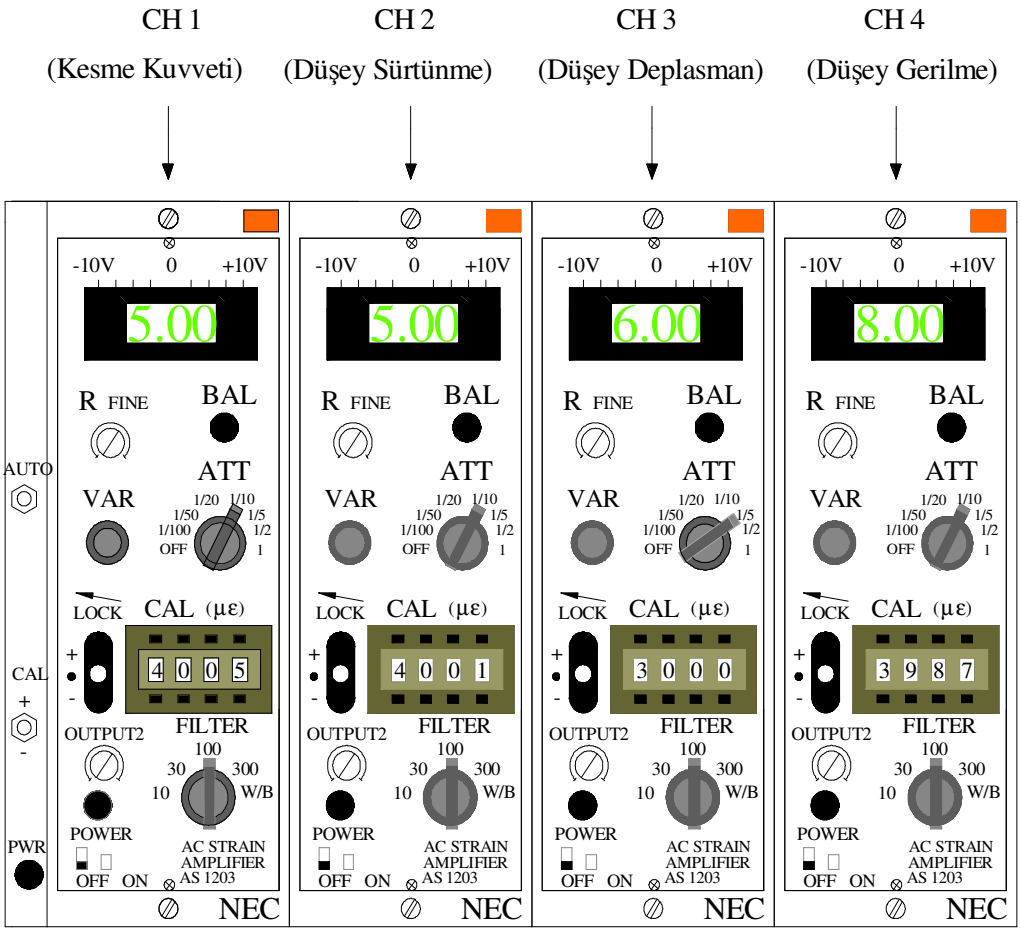

**Şekil F.23 :** Deformasyon saati ve ringler arası açıklık saatinin yerleştirilmesi.

Şekil F.24'te gösterilen amplifikatör, Çizelge F.1'de verilen değerlere göre ayarlanır. Tabloda verilen değerler, deneylerden önce yapılan kalibrasyon çalışmalarından elde edilmiştir.

**Çizelge F.1:** 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.




**Şekil F.24 :** Amplifikatör.

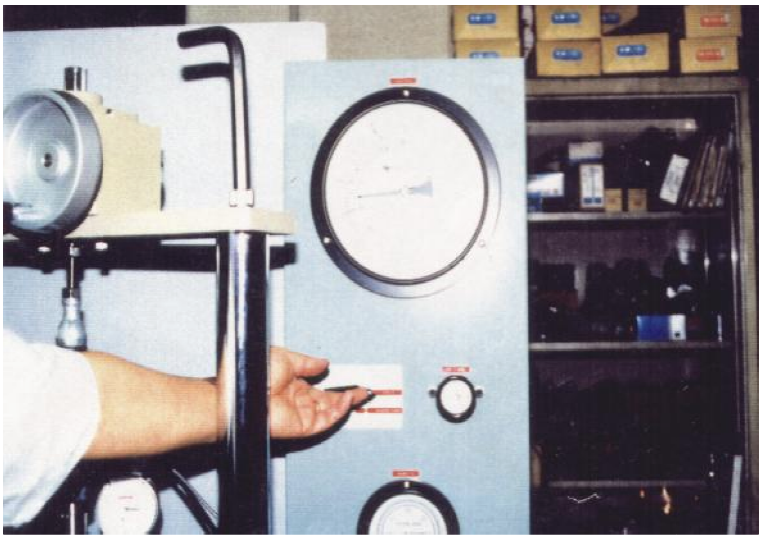
Daha sonra her kanaldaki POWER düğmesine basılarak veya tüm kanalların açılmasını sağlayan POWER düğmesine basılarak amplifikatör çalıştırılır. En az 10 dakika bekledikten sonra, ATT düğmesi, her kanal için tabloda (veya şekilde) gösterilen değere (1/10, 1/5 gibi) getirilir. Her kanalda, BAL düğmesine 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.

Basınç panelinden uygulanacak düşey yük değeri ayarlanarak basınç vanası sağa çevrilir (Şekil F.25). 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 $cm^2$/98.17 $cm^2$=0.69

Numune üzerindeki düşey gerilme, σ=0.69 x (Uygulanan gerilme)

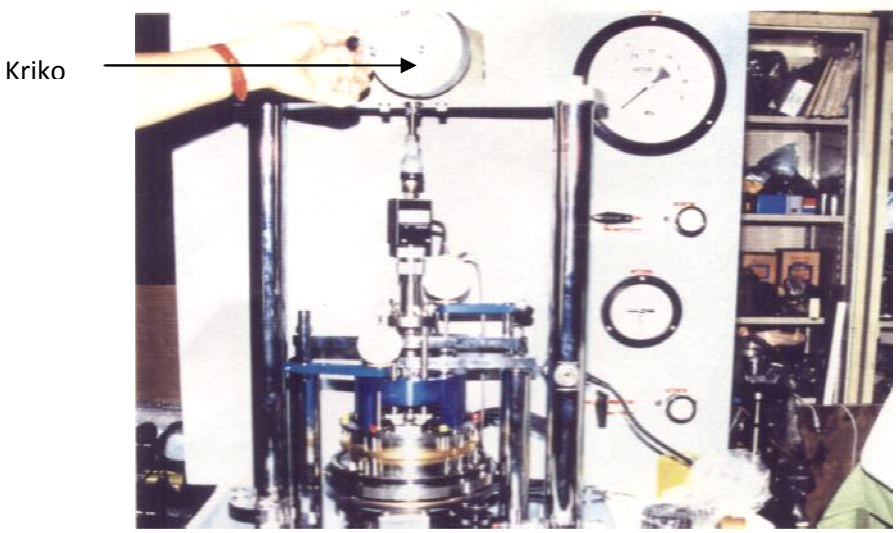
O halde, numune üzerinde 100 kPa değerinde normal gerilme elde etmek için, basınç panelinden uygulanması gereken gerilme; 100/0.69=145 kPa değerinde olmalıdır.



**Şekil F.25 :** Normal gerilmenin uygulanması.

Düşey basınç uygulandıktan sonra, hücre su ile doldurulur ve zeminin konsolidasyonunu tamamlaması için beklenilir. Bu çalışmadaki deneylerde, numuneler 100, 200, 300 ve 400 kPa değerlerindeki normal gerilmeler altında, en az 2 gün süre ile konsolidasyona bırakılmışlardır.

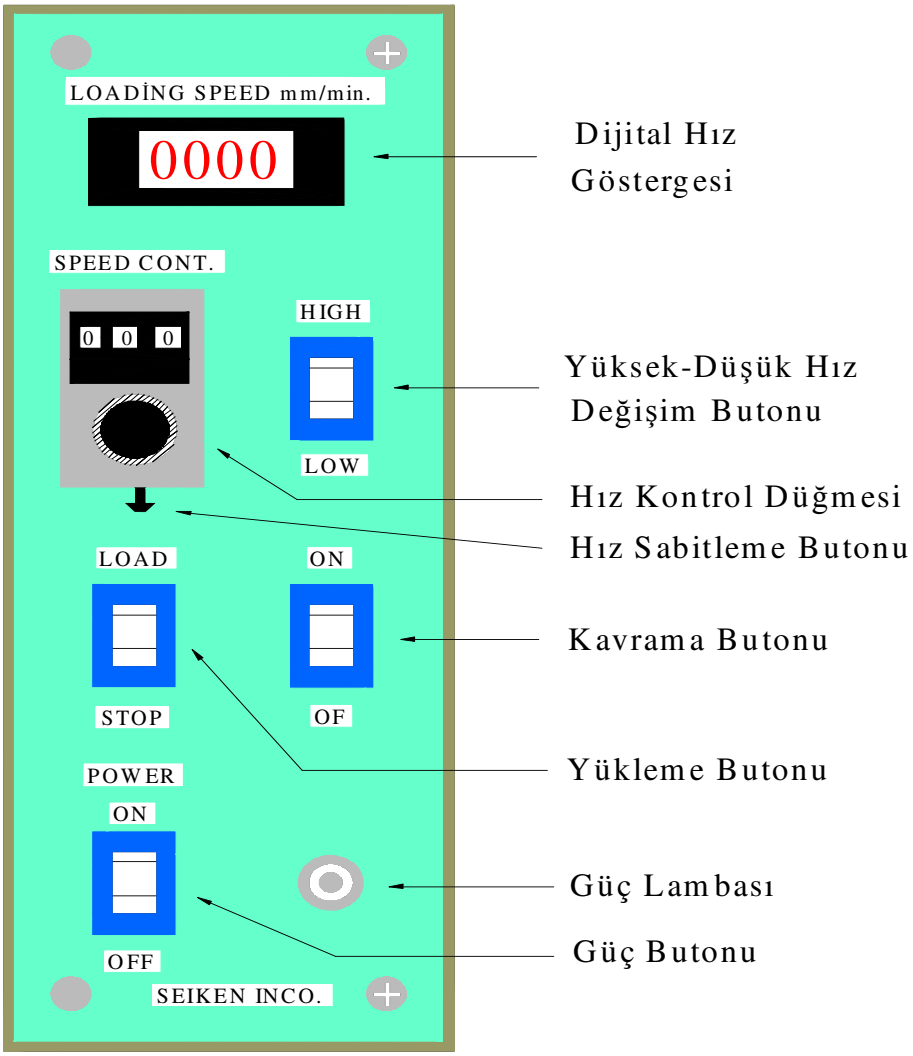
Konsolidasyon sonrasında deneye başlamadan önce kriko, sola doğru döndürülerek ringler arasında yeterli açıklık bırakılır (Şekil F.26). Açıklığın miktarı, en üst dış ringe değdirilerek sabitlenmiş olan ölçü saatinden okunabilir. Açıklığın miktarı, sistemde minimum düşey sürtünme (side friction) oluşacak şekilde seçilir. Ancak, açıklığın artmasının deney esnasında daha fazla zemin kaybı olacağı ve numunenin doğrudan suya maruz kalan yüzeyi artacağı neden olacağı dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, ringler arası mesafe ortalama 0.2 mm olarak alınmıştır.




**Şekil F.26 :** Ringler arasında açıklığın bırakılması.

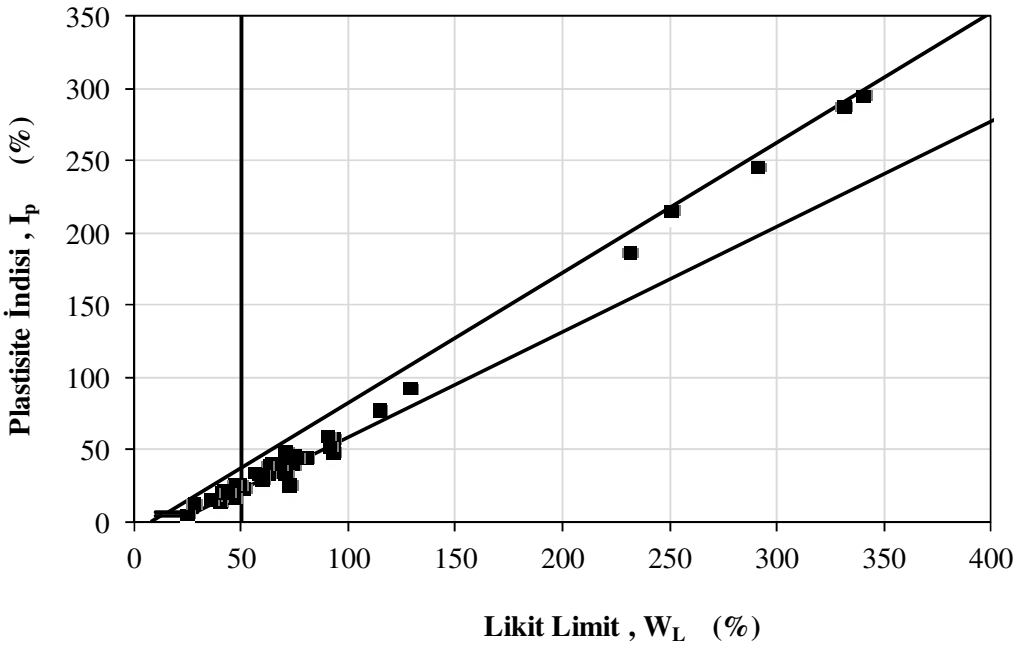
Şekil F.27'de gösterilen hız kontrol kutusundan, kesme hızı belirlenip, kesme işlemi başlatılır. Bunun için: Güç butonu, 'ON' konumuna getirilir, Yükleme butonu, 'LOAD' konumuna getirilir. Hız butonu, 'HIGH' veya 'LOW' konumuna getirilir. Belirlenen hız değeri, dijital gösterge tarafından gösterilir. Hız sabitleme butonu sağa doğru çekilerek, hız kontrol düğmesinin etkinliği ortadan kaldırılır. Daha sonra, kavrama butonu 'ON' konumuna getirilerek kesme işlemi başlatılır.

Deney tamamlandığında, önce drenaj deliği açılarak su boşaltılmalı, daha sonra numune üzerindeki düşey yük kaldırılmalıdır.



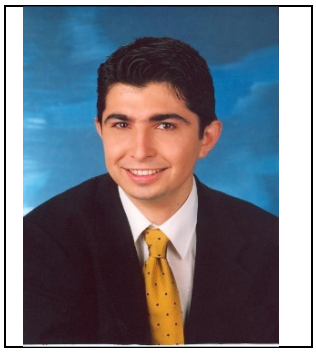

**Şekil F.27 :** Hız kontrol kutusu.

**EK G :** Numunelerin tümünü içeren Casagrande plastisite kartı




**Şekil G.1 :** Çalışmada kullanılan numunelerin tamamını içeren Casagrande plastisite kartı.

## ÖZGEÇMİŞ




**Ad Soyad:** Mustafa Hatipoğlu

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Konya / 1976

**Adres:** İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı Maslak İstanbul

**E-Posta:** hatipoglu1@itu.edu.tr


**Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Yüksek Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendiliği