Killerin Kalıcı Kayma Dayanımlarının Kesme Kutusu Ve Halka Kesme Deneyleri İle Belirlenmesi

Burak Bahadır Şakar

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2021

Determination Of Residual Shear Strengths Of Clays By Shear Box And Ring Shear Tests

Burak Bahadır Şakar

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

December 2021

Killerin Kalıcı Kayma Dayanımlarının Kesme Kutusu Ve Halka Kesme Deneyleri İle Belirlenmesi

Burak Bahadır Şakar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Hasan Savaş

Aralık 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Hasan Savaş danışmanlığında hazırlamış olduğum "Killerin Kalıcı Kayma Dayanımlarının Kesme Kutusu Ve Halka Kesme Deneyleri İle Belirlenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 07/12/2021

Burak Bahadır Şakar

İmza

ÖZET

İnşaat mühendisliğinde zeminlerin kalıcı dayanım parametrelerinin belirlenmesi önemli bir yere sahiptir. Özellikle daha önce kayma hareketinin meydana geldiği şevler ile fisürlü ve sert kil zeminleri içeren şevlerin stabilite tahkiklerinde önem arz etmektedir. Kalıcı kayma dayanımına ulaşabilmek için çok büyük yer değiştirmeler gerekebilmektedir, bu yüzden kayma yüzeyleri var olan istinatların ve şevlerin stabiliteleri sadece kalıcı kayma dayanımları ile kontrol edilebilir. Bu çalışmada İstanbul, Çanakkale ve Eskişehir illerinden alınan örselenmiş numuneler üzerinde farklı hızlarda ve farklı su muhtevalarında tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri yapılmıştır. Çalışmada kesme hızı ile su muhtevasının, zeminin kayma dayanım parametreleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla numuneler yavaş, orta ve yüksek hızlarda farklı normal gerilmeler altında kesilmiş, aynı işlemler yüksek ve düşük su muhtevası olmak üzere iki ayrı su içeriğinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde genel olarak düşük ve orta kesme hızlarında bulunan içsel sürtünme açıları arasında çok fazla fark çıkmazken, halka kesme deneylerinde kesme hızının kalıcı içsel sürtünme açısı üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı, başlangıç su muhtevası arttıkça kalıcı içsel sürtünme açısının arttığı ve likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve kil yüzdesi kalıcı içsel sürtünme açısının azaldığı gözlemlenmiştir. Deney yöntemleri karşılaştırıldığında çoğunlukla halka kesme deneylerinde bulunan içsel sürtünme açıları daha düşük çıkmıştır ve halka kesme deneylerinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı kayma dayanımı, Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi, Halka kesme deneyi, Kil.

SUMMARY

In civil engineering determination of residual strength parameters for soils are very important. They are very important for stability verification especially slopes with preexisting slide surface and slopes that includes fissures, clayed soil. There must be very large displacements for determining residual shear strength, because of that stability of retainings and slopes with preexisting slide surface can be controlled by only residual shear strength. In this study reversal direct shear box tests and ring shear tests are used for different shearing rates and different water contents on disturbed samples which obtained from İstanbul, Çanakkale and Eskişehir. Effects of this variables on soils shear strength parameters are aimed to investigate. Therefore samples were sheared under different normal stresses with slow, medium and fast shearing rates, the same processing were carried out with two different water contents which are high and low content. When obtained results were considered we can say that in reversal direct shear box tests there is small changes on friction angles at slow and medium shearing rates, but in ring shear test shearing rates have no effect on residual friction angles. When initial water content increases residual friction angles increases and when liquid limit, plastic limit, plasticity index and clay percentage increases residual friction angles decreases. When test methods are compared, frictional angles in ring shear tests are mostly lower than reversal direct shear box tests and obtained results from ring shear tests are more trustable.

Keywords: Residual shear strength, Reversal direct shear box test, Ring shear test, Clay.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
3. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA DAYANIMI 13
3.1. Mohr – Coulomb Göçme Hipotezi 13
3.2. Zeminlerin Kayma Dayanımı 16
3.3. Kayma Dayanımının Belirlenmesi 20
3.3.1. Kesme kutusu deneyi 21
3.3.2. Halka kesme deneyi 24
3.3.3. Üç eksenli basınç deneyi 26
3.4. Kalıcı Kayma Dayanımı 29
3.5. Kalıcı Kayma Dayanımının Çalışma Prensibi 32
3.6. Kalıcı Kayma Dayanımının Önemi 34
3.7. Kalıcı Kayma Dayanımını Etkileyen Unsurlar 36
3.7.1. Mineralojinin etkisi 36
3.7.2. Efektif normal gerilmenin etkisi 38
3.7.3. Kesme hızının etkisi 40
4. MATERYAL VE YÖNTEM 42
4.1. Materyal 43
4.2. Yöntem 45
4.2.1. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi 46
4.2.1.1. Numunelerin hazırlanması 47

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.2.1.2. Deney aletinin hazırlanması ve deney aşaması 48
4.2.1.3. DS7 programı 52
4.2.2. Halka kesme deneyi 59
4.2.2.1. Numunelerin hazırlanması 60
4.2.2.2. Deney aletinin hazırlanması ve deney aşaması 61
4.2.2.3. Clisp Studio programı 64
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 70
5.1. Tekrarlı Direkt Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları 71
5.2. Halka Kesme Deneyi Sonuçları 79
5.3. Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması 86
5.4. Deney Numunelerinin Karakteristik Özelliklerinin Değerlendirilmesi 90
5.5. Kesme Hızının Kayma Parametrelerine Etkisi 92
5.6. Su İçeriğinin Kayma Parametrelerine Etkisi 94
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 96
KAYNAKLAR DİZİNİ 99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Bir zeminin genel gerilme ve göçme durumunun Mohr diyagramında gösterimi 14
3.2. Yalnızca zeminin gerilme ve göçme durumunun Mohr diyagramında gösterimi 15
3.3. Zeminlerdeki dayanım analizinin uygulama alanları 16
3.4. Collin tarafından geliştirilen kesme deneyi aparatı 21
3.5. Direkt kesme kutusu mekanizması 22
3.6. Direkt kesme kutusu deneyi kesme mekanizması 23
3.7. Kumların kesme kutusu deneyi grafikleri 24
3.8. Bishop tarafından tasarlanan halka kesme deney aleti 25
3.9. Üç eksenli basınç deney sistemi 26
3.10. Drenajlı deneylerde Mohr – Coulomb göçme doğrusunun gösterimi 28
3.11. Drenajsız deneylerde Mohr – Coulomb göçme doğrusunun gösterimi 28
3.12. Killerin gerilme – deformasyon eğrisinde ve göçme zarfında pik ve kalıcı parametrelerin gösterilmesi 31
3.13. İri daneli zeminlerde gerilme – deformasyon eğrileri 32
3.14. Yüksek kil içerikli zeminlerin gerilme – yer değiştirme diyagramı 33
3.15. Düşük kil içerikli zeminlerin gerilme – yer değiştirme diyagramı 34
3.16. Zemin içindeki danelerin boyut ölçeği 37
3.17. Minerallerin efektif gerilme göçme doğrularındaki değişimi 38
3.18. Kayma dayanımının efektif açısı ve plastisite indisi arasındaki bağıntı 40
4.1. Numunelerin dane boyu dağılım grafikleri 43
4.2. Numunelerin kompaksiyon eğrileri 44
4.3. ELE International marka kesme kutusu deney aleti 46
4.4. Kesme kutusu numune sıkıştırma kalıbı 47
4.5. Kesme kutusu deney numunesi 48
4.6. Kesme kutusu numune haznesi 48
4.7. Kesme kutusu deneyine hazır bir kesme kutusu numune haznesi 49
4.8. Kesme deneyine hazırlanmış sistem: a) yandan görünüş b) önden görünüş 50
4.9. Kesme kutusu makinesi ekranı 50
4.10. Kesme aşamasından sonraki numune yüzeyi 52
4.11. DS7 programı: a) ara yüz b) deney makinesi seçim ekranı 53
4.12. DS7 deney klasörü oluşturma: a) isimlendirme paneli b) deney paneli 54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

4.13. DS7 programında bulunan kesme kutusu makinesi deney aşamaları 55
4.14. Deney başlangıç bilgilerinin girildiği ekran 56
4.15. Konsolidasyon aşaması program penceresi 57
4.16. Kesme aşaması program penceresi 58
4.17. Deney sonlandırma penceresi 58
4.18. Bromhead tipi VJ Tech marka halka kesme deney aleti 59
4.19. Halka kesme aleti numune kalıbı: a) boş kalıp b) numune yerleştirilmiş kalıp 61
4.20. Halka kesme makinesi su haznesi ve kesme aparatları 61
4.21. Deneye hazır bir halka kesme makinesi 62
4.22. Halka kesme makinesinde kesilmiş bir numune 63
4.23. Clisp Studio programı ara yüzü 64
4.24. Makine verilerinin programa girildiği ekran 65
4.25. Numune bilgilerinin girildiği ekran: a) özgül ağırlık ekranı b) su muhtevası ekranı 65
4.26. Konsolidasyon verilerinin girildiği ekran 66
4.27. Kesme verilerinin girildiği ekran: a) konfigürasyon ekranı b) kesme hızı ekranı 67
4.28. Veri girdileri yapılmış deney planının ara yüzü 68
4.29. Deney aşamalarının sekmeleri: a) konsolidasyon sekmesi b) kesme ekmesi c) veri dışa aktarım sekmesi 69
5.1. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0,02 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 72
5.2. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0,1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 73
5.3. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 74
5.4. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0,02 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 75
5.5. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0,1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 76
5.6. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 77
5.7. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0.027 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

5.8. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0.135 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 80

5.9. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 1.35 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 81

5.10. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0.027 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 82

5.11. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0.135 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 83

5.12. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 1.35 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3 84

5.13. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kohezyon direncinin su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi 86

5.14. Halka kesme deneylerinde kohezyon direncinin su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi 87

5.15. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kalıcı içsel sürtünme açısının su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi 87

5.16. Halka kesme deneylerinde kalıcı içsel sürtünme açısının su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi 88

5.17. Likit limit – içsel sürtünme açısı ilişkisi 90

5.18. Plastik limit – içsel sürtünme açısı ilişkisi 91

5.19. Plastisite indisi – içsel sürtünme açısı ilişkisi 91

5.20. Kil yüzdesi – içsel sürtünme açısı ilişkisi 92

5.21. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi kesme hızı – içsel sürtünme açısı ilişkisi 92

5.22. Halka kesme deneyi kesme hızı – içsel sürtünme açısı ilişkisi 94

5.23. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi başlangıç su muhtevası – içsel sürtünme açısı ilişkisi 95

5.24. Halka kesme deneyi başlangıç su muhtevası – içsel sürtünme açısı ilişkisi 95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

4.1. Numunelerin tanımlama deney sonuçları 44

4.2. Deneylerde kullanılan su muhtevaları 45

5.1. Yüksek su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri 78

5.2. Düşük su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri 78

5.3. Yüksek su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri 85

5.4. Düşük su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri 85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
%	Yüzde
°	Derece
σ	Normal gerilme
σ'	Efektif gerilme
τ	Kayma gerilmesi
s_u	Drenajsız kayma dayanımı
u	Boşluk suyu basıncı
c	Kohezyon
c'	Efektif kohezyon
c_r	Kalıcı kohezyon
φ	İçsel sürtünme açısı
φ'	Efektif içsel sürtünme açısı
φ_r	Kalıcı içsel sürtünme açısı
w	Su muhtevası
w_{opt}	Optimum su muhtevası
w_{LL}	Likit limit su muhtevası
w_{PL}	Plastik limit su muhtevası
I_p	Plastisite indisi
Υ_s	Suya doygun birim hacim ağırlık
ρ_s	Kuru birim hacim ağırlık
$m_{ıslak}$	Islak ağırlık
V_{kesme}	Tekrarlı direkt kesme kutusu deney hızı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	**Açıklama**
V_{halka}	Halka kesme deney hızı
r	Yarıçap
V	Hacim
A	Alan
N	Normal kuvvet
T	Kesme kuvveti
kPa	Kilo paskal
mm	Milimetre
cm	Santimetre
tan	Tanjant
der	Derece
rad	Radyan
dak	Dakika

Kısaltmalar	**Açıklama**
CD	Konsolidasyonlu – drenajlı
CU	Konsolidasyonlu – drenajsız
UU	Konsolidasyonsuz – drenajsız
KY	Kil yüzdesi

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin kalıcı dayanım parametrelerini belirlemek çok önemlidir. Kayma dayanım parametreleri temellerin, istinat duvarlarının, şevlerin ve setlerin stabilite analizlerinde kullanılır (Bardet, 1997). Projelendirilmeler yapılırken çözümlemelerde kullanılan parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanması ve oluşabilecek hataların önüne geçilmesi gerekmektedir. Daha önceden kayma yüzeyleri var olan zeminlerde istinatların ve şevlerin stabiliteleri yalnızca kalıcı kayma dayanımları ile kontrol edilebilir. Kalıcı dayanıma ulaşabilmek için ise çok büyük kayma deformasyonları gerekmektedir. (Mitchell ve Soga, 2005). Kalıcı dayanım yüksek deformasyonlar sonucu oluşan minimum sabit değerdir ve aşırı konsolide killerde yüksek deformasyonlarda dayanım düştükten sonra kalıcı dayanım elde edilirken, normal konsolide killerde pik dayanım sonrası değer sabit bir şekilde devam eder ve zemin kalıcı dayanımına ulaşır (Skempton, 1985).

Zeminler partiküllü bir yapıdadır bu sebeple kayma yenilmeleri partiküllerin kaymasıyla veya birbiri üzerinden yuvarlanıp geçmesiyle meydana gelir (Coduto, 2006). Kesme uygulandıkça kesme düzlemindeki daneler birbiri üzerinden kaymaya veya yuvarlanmaya başlar. Sonuç olarak kesme kuvveti hem daneler arası direncin hem de bağ dirençlerinin üstesinden gelir. Bu bize pik dayanımı verir (Carter ve Bentley, 2016). Zemin içindeki yassı kil danelerinin tekrardan düzene geçmesiyle göçme düzlemleri oluşur ve yassı danelerin bu dizilimi, zeminin düşük dayanıma ev sahipliği yaptığı kaygan yüzeyi oluşturur (Wesley, 2009). Yanal desteği olmayan zemin sıkışmaya başlar ve öncelikle maksimum bir pik değeri alır. Deformasyon arttıkça bu değer düşer ve kalıcı bir değere gelir (Bardet, 1997). Aşırı konsolide killerde bu fark gözle görülür biçimde fazlayken normal konsolide killerde çok ufak bir pik olur ve bu değer ile kalıcı dayanım değeri neredeyse birbirine eşittir (Carter ve Bentley, 2016). Elde edilen dayanım değerleri ile zeminlerin göçme zarfları çizilir ve buradan kayma dayanım parametreleri olan kohezyon ile içsel sürtünme açıları belirlenir.

Kayma dayanım parametrelerinin bulunmasına etki eden faktörler arasında mineraloji, efektif gerilme, kesme hızı ve deney yöntemleri sayılabilir.

Kayma dayanımının belirlenmesinde kullanılan başlıca deney yöntemleri arasında tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri vardır. Kesme kutusu deneyleri kolay ulaşılabilir ve ekonomik olmasına karşın numunenin drenaj durumu kontrol edilememektedir ve numune belirlenmiş olan bir yüzeyden kesmeye zorlanmaktadır. Halka kesme deneyleri ise kalıcı dayanımın bulunmasında gerekli olan büyük deformasyon imkanını sağlamaktadır ve daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

Bu çalışma kapsamında üç adet örselenmiş killi numune üzerinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri yapılmıştır. Numuneler yüksek ve düşük olmak üzere iki farklı başlangıç su muhtevasında hazırlanmış, karakteristik özelliklerine göre 100 kPa, 200 kPa, 250 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edilmiştir. Konsolide edilen numuneler tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde 0,02 mm/dak, 0,1 mm/dak ve 1 mm/dak, halka kesme deneylerinde 0,027 der/dak, 0,135 der/dak ve 1,35 der/dak olmak üzere üç farklı kesme hızında kaymaya maruz bırakılmıştır. Elde edile bulgular sonucunda göçme zarfları çizilerek zeminlerin kayma dayanım parametrelerine ulaşılmıştır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde ise likit limit, plastik limit, plastisite indisi, kil yüzdesi ve başlangıç su muhtevası arttıkça içsel sürtünme açısının azaldığı gözlenmiştir. Her numune kendi içinde değerlendirildiğinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde genel olarak düşük ve orta kesme hızlarında içsel sürtünme açıları birbirine yaklaşık çıkarken, halka kesme deneylerinde tüm kesme hızlarında elde edilen içsel sürtünme açıları birbirine yakın çıkmıştır. Çok büyük çoğunlukla tekrarlı direkt kesme kutusunda bulunan içsel sürtünme açıları, halka kesme deneylerinde bulunanlardan daha yüksek çıkmıştır. Genel olarak deney yöntemleri karşılaştırıldığında ise halka kesme deneylerinin daha güvenilir olduğu kanısına varılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu zamana kadar zeminlerin taşıyabileceği yükler hakkında birçok görüş ortaya atılmış ve bunun üzerine birçok farklı çalışmalar yapılmıştır. Karşılaşılabilecek her türlü sorunun önüne geçilebilmesi için zeminlerin dayanım parametrelerinin bilinmesi hayati önem taşımaktadır. Zeminler üzerine yapılan çalışmalar sonucu bulunan pik kayma dayanımı, kalıcı kayma dayanımı, kohezyon ve içsel sürtünme açısı gibi zeminin dayanım parametrelerine ulaşmak, istinat duvarı çözümlemeleri ve şevlerin stabilite analizleri için çok önemlidir. Bu parametrelere ulaşabilmek için kullanılan kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve üç eksenli basınç deneyi yıllar içinde birçok çalışmaya konu olmuş ve yapılan çalışmalar sonucu hem zeminlerin özellikleri daha iyi anlaşılmış hem de deney yöntemleri daha iyiye geliştirilmiştir.

Kayma yüzeyi oluşan zeminlerde istinatların ve şevlerin stabiliteleri yalnızca kalıcı dayanım ile kontrol edilebilir ve kalıcı dayanıma ulaşabilmek için kayma deformasyonlarının çok büyük olması gerekmektedir (Mitchell ve Soga, 2005). Kalıcı dayanım yüksek deformasyonlarda oluşan minimum sabit değerdir. Aşırı konsolide killerde yüksek deformasyonlar sonucu dayanım düşüp kalıcı dayanım değerinde sabitlenirken normal konsolide killerde pik dayanım sonrası değer sabit bir şekilde devam eder (Skempton, 1985). Zeminin dayanım parametrelerini etkileyen birçok unsur vardır ve zemin özelliklerinin dayanım üzerindeki etkisini incelemek üzere yapılan çalışmalar ile bazı sonuçlara ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bromhead tipi halka kesme aleti ile çalışan Kalteziotis (1993) kum taşı, kireç taşı ve kil taşı gibi farklı zemin türleri üzerinde deneyler yapmıştır ve deneyler sonucu dane dağılımının ve mineralojinin kalıcı kayma açısı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. 50 kPa ve 400 kPa normal gerilme arasında kalıcı kayma dayanım zarfının lineer olduğu ve kalıcı kayma açısının sabit olduğu görülmüştür. Yüksek kil içerikli zeminlerde kalıcı kayma açısı, dominant ve fazla miktarda bulunan kil minerallerinin

özellikleri tarafından kontrol edilirken düşük kil içerikli zeminlerde silt boyutundaki danelerin mineralojik özellikleri tarafından kontrol edilmektedir.

Stark ve Eid (1994) 32 adet farklı zemin türü üzerinde yaptıkları halka kesme deneyleri sonucu drenajlı kayma dayanımının, kil minerallerine ve kil boyutundaki parçacıkların adetine bağlı olarak değiştiğini savunmuştur. Kil mineralojisinin etkisini göstermek için likit limit kullanılmış, 0,002 mm ve daha küçük kil danelerinin özellikleri gösterge olarak alınmıştır. Böylece likit limit ve kil dane oranı arttıkça drenajlı kayma dayanımının azaldığı görülmüştür. Ayrıca halka kesme deneyleri drenajlı kalıcı göçme zarfının lineer olmadığını ve bu olayın kil dane oranının %50'den daha büyük ve likit limiti %60 ile %220 arasında olan kohezyonlu zeminlerde çok daha belirgin olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Farklı kil zemin türleri üzerinde halka kesme, kesme kutusu ve üç eksenli basınç deneyleri yapan Stark ve Eid (1997) daha önce yapmış oldukları çalışmaya ilaveten kayma dayanımını etkileyen bir faktöründe normal gerilme olduğunu söylemiştir. Likit limiti %50 ve %130 arasında değişen ilk defa kaymaya maruz kalmış fisürlü katı killerde göçme yüzeyi boyunca mobilize kayma dayanımının, yumuşatılmış kayma dayanımından düşük olabileceğini, likit limiti %50 ve daha fazla olan yüksek plastisiteli fisürlü katı killerde yumuşatılmış kayma dayanımının neredeyse pik kayma dayanımına eşit olduğunu ve kritik göçme yüzeyini belirlemede kullanılabileceğini savunmuştur. Yapılan çalışmaya göre yumuşatılmış ve kalıcı kayma açıları, kil mineralojisi ile efektif normal gerilmeye bağlıdır ve likit limiti %30'dan daha fazla olan zeminlerde 16° gibi yüksek kayma açısı farkları görülebilmektedir.

Yedi farklı bölgeden alınan kil taşı üzerinde tekrarlı direkt kesme ve halka kesme deneyleri yapan Dewoolkar ve Huzjak (2005) 30 kPa ile 960 kPa arasında değişen efektif normal gerilme değerleri kullanmıştır. Genel olarak efektif normal gerilme arttıkça kalıcı kayma açısı lineerlik göstermeyen bir şekilde azalmıştır. 30 kPa gibi düşük efektif normal gerilmelerde oluşan kalıcı kayma açısı, 300 kPa gibi bir efektif normal gerilme altında oluşan kalıcı kayma açısının iki katı kadar bir değere ulaşmaktadır. Kullanılan efektif normal

gerilme aralığında bulunan kalıcı kayma açıları 5,5° ile 30° arasında değişmektedir. Daha önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında plastisite esas alınarak oluşturulan korelasyonların, likit limit esas alınarak oluşturulan korelasyonlara göre daha tutarlı olduğu görülmüştür.

Koltuk (2005) farklı plastisite indisine ve kil yüzdelerine sahip numuneler üzerinde 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa düşey gerilmeler uygulayarak tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapmıştır. Farklı hızlarda gerçekleştirdiği halka kesme deneyleri ve 0,035 mm/dak hızla gerçekleştirdiği tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucunda likit limit, plastisite indisi ve kil yüzdesi arttıkça kalıcı dayanım açısının azaldığını ortaya sürmüştür. Halka kesme deneyleri sonucu artan kesme hızıyla birlikte kalıcı dayanım açısının yaklaşık 2° ile 3° arasında azaldığını ve likit limitin, plastisite indisinin ve kil yüzdesinin kalıcı dayanım açısı üzerinde kesme hızına kıyasla daha etkili olduğunu söylemiştir. Ayrıca halka kesme deneylerinde bulunan dayanım parametrelerinin tekrarlı kesme kutusunda bulunan parametrelere kıyasla daha düşük olduğunu ve bu iki deney yöntemi sonucunda bulunan kalıcı dayanım açısı değerleri arasındaki farkın, plastisite indisi ve kil yüzdesi arttıkça azaldığını gözlemlemiştir.

Altı farklı şevden alınan örselenmemiş ve örselenmiş numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yapan Tiwari vd. (2005) kalıcı kayma dayanım parametrelerine ulaşmayı amaçlamıştır. Yapılan deneyler sonucu oluşturulan göçme zarflarında birkaç derecelik bir lineersizlik görülmüştür. Şev numunelerinin birinde oluşturulan göçme zarfı sonucu kohezyon değeri 0 olarak bulunmuş, diğer numunelerde ise 1 kPa ile 9,2 kPa arasında değişen kohezyon değerlerine rastlanmıştır. Bir numune dışında diğer tüm numunelerde efektif gerilme arttıkça kayma açısı sabit bir değere yaklaşmıştır.

Daha çok kum içerikli ve kum karışımlı numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yapan Saito vd. (2006) farklı kesme hızları ile deneyleri tekrarlamıştır. Direkt olarak ölçülen toplam normal gerilme, kayma direnci ve boşluk suyu basıncı kullanılarak kalıcı kayma açısı tanımlanmıştır. Silisli kum üzerinde yapılan çalışmalar sonucu bulunan efektif kalıcı kayma açısı kesme hızından etkilenmezken, diğer numunelerde bulunan efektif kalıcı kayma açısı kesme hızının değişmesinden etkilenmiştir. Efektif kalıcı kayma dayanımının kesme hızına

bağlı olduğu göze alınınca kesme hızının değişmesiyle kayma türünün değiştiği görülmüştür. Bu değişimin kohezyonlu zeminlerdeki kalıcı kayma dayanımının hız etki mekanizması olduğu düşünülmektedir.

Yılmaz (2006) farklı özelliklere sahip 15 zemin numunesi üzerinde tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapmıştır. 200 kPa, 300 kPa ve 400 kPa normal gerilmeler altında tekrarlı kesme kutusunda 0,035 mm/dak, halka kesme deneylerinde ise 25 mm/dak hızları kullanılmıştır ve sonuçlar analiz edilmiştir. Sonuç olarak likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve kil yüzdesi arttıkça kalıcı dayanım açısının azaldığı görülmüştür. Tekrarlı kesme kutusun deneylerinde bulunan parametrelerin halka kesme deneylerinde bulunan parametrelere göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca boşluk suyu basıncının sonuçları değiştirmemesi için düşük hızlarda çalışılması gerektiği önerilmiştir.

Dört farklı doğal ve endüstriyel numune üzerinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri yapan Suzuki vd. (2007) numuneleri örselenmemiş, örselenmiş ve yeniden yapılandırılmış bir biçimde kullanmıştır. Doğal ve yapay şekilde çimentolaşmış numuneler kullanılarak kalıcı dayanımı normal gerilmenin, kesme hızının ve konsolidasyon geçmişinin nasıl etkilediği araştırılmıştır. Örselenmiş numunelerde kalıcı durumda maksimum dane çapı düştükçe içsel sürtünme açısı çok ufak bir miktarda düşüş göstermiştir. Örselenmemiş numunelerde kalıcı durumda gerilme oranı başlangıç boşluk oranından, çimetolaşmış kil numunelerde ise kalıcı durumda gerilme oranı arazideki konsolidasyon gerilmesinden bağımsızdır. Çimentolaşmış killerde kalıcı dayanım parametreleri neredeyse örselenmemiş numunelerin kalıcı dayanım parametrelerine eşit çıkmıştır. Örselenmemiş, çimentolaşmış ve yeniden yapılandırılmış numunelerde kalıcı durumdaki gerilme oranı, normal gerilmenin büyüklüğü ne olursa olsun kayma yer değiştirmesi arttıkça artmıştır. Örselenmemiş ve çimentolaşmış killerde kalıcı durumdaki gerilme oranı, arazideki konsolidasyon gerilmesinin bir sonucu olan aşırı konsolidasyon oranından bağımsızdır. Ayrıca yeniden yapılandırılmış killerde kalıcı durumdaki gerilme oranının ön kesme işleminden etkilenmediği öne sürülmüştür.

Plastisite indisleri %23 ile %95 arasında olan 15 farklı numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapan Ataç (2009), sonuçları zeminin karakteristik özelliklerini esas alarak değerlendirmiştir. Likit limitin ve plastisite indisinin kalıcı kayma dayanımını doğrudan etkilediği ve bu iki parametre arttıkça kalıcı kayma dayanım açısının düştüğü saptanmıştır. Kalıcı kayma dayanım açısını bulmak için geliştirilen korelasyonlarda likit limit ve plastisite indisinin kullanılmasının daha güvenilir sonuçlar göstereceği düşünülmüştür. Halka kesme deneylerinde, tekrarlı kesme kutusu deneylerine kıyasla daha düşük kayma dayanım parametreleri elde edilmesinin sebebinin halka kesme deneylerinde toplam gerilmelere göre çalışılması olduğu ortaya atılmıştır. Halka kesme deneylerinde genel olarak kalıcı dayanıma numunenin çevresi kadar yer değiştirme sonucu ulaşıldığı ve sürtünme gerilmeleri azaltıldığı takdirde düzgün bir kayma yüzeyi elde edileceği gözlemlenmiştir.

Ürkmez (2009) likit limiti %41 ile %128 arasında bulunan ve plastisite indisi %23 ile %95 arasında değişen aşırı konsolide kil zeminler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyi yapmıştır. 0,035 mm/dak kesme hızı kullanarak zeminin karakteristik özelliklerinden yola çıkıp kalıcı kayma dayanım parametrelerini bularak kalıcı kayma dayanım açıları ile aralarındaki etkiyi araştırmayı amaçlamıştır. Oluşturulan korelasyonlarda likit limit, plastik limit, plastisite indisi, ince dane oranı ve pik kayma dayanım açısı arasında yüksek katsayılar bulunurken kil yüzdesi ve aktivite ile kalıcı kayma dayanım açısı arasında düşük katsayılar bulunmuştur. Likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve ince dane oranı arttıkça kalıcı kayma dayanım açısının düştüğü ve buradan yola çıkarak pik kayma dayanım açısı arttıkça kalıcı kayma dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan halka kesme deneyinde bulunan kalıcı kayma dayanım açısının kesme kutusu deneyinde bulunan sonuca göre küçük olmasının sebebinin ise deney yönteminin farklı olması düşünülmektedir.

Direkt kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapan Stark ve Hussain (2010) farklı plastisitelere sahip dört farklı zemin numunesi üzerinde çalışmışlardır. Bulunan sonuçlara göre 100 kPa ve daha düşük efektif normal gerilmelerde dayanım kazanımı dikkate değer çıkmıştır. Bunun yanında 100 kPa değerinden daha yüksek efektif normal gerilmelerde oluşan dayanım kazanımı göz ardı edilebilir derecededir. Bunun sebebinin 100 kPa altındaki

efektif normal gerilmelerde kil danelerinin kesme yönüne doğru paralel bir şekilde yönelmesinden dolayı olduğu ve yüksek efektif normal gerilmelerde danelerin bunu gerçekleştirebilmesinin daha olanaksız olduğu düşünülmektedir. 100 kPa ya da daha düşük efektif normal gerilmelerde yüksek plastisiteli zeminler düşük plastisiteli zeminlere göre kalıcı değerde daha fazla dayanım kazanımı göstermiştir. Bunlara rağmen düşük efektif normal gerilmelerde bile kazanılan dayanım hiçbir zaman ilk haline ulaşamamıştır, buna neden olan durumun daha önceden bir kesme yüzeyinin oluşmasından ve kil danelerinin kesme yüzeyine paralel bir biçimde yönelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kesme hızlarının kalıcı kayma dayanımına olan etkisini araştıran Tiwari vd. (2011) 0,001 mm/dak, 0,01 mm/dak ve 1 mm/dak hızlarında halka kesme deneyleri yapmıştır. Numune olarak dört farklı heyelan bölgesinden kayma yüzeyi var olan zeminler tercih edilmiştir. Deneyler sonucu kesme hızı 10 kat arttırılınca sürtünme direncinde yaklaşık olarak %20 düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen bir diğer sonuç ise kalıcı dayanımı mobilize edebilmek için yüksek kesme hızlarının yüksek yer değiştirmelere ihtiyaç duymasıdır.

Dafalla (2013) farklı kil içeriği bulunan kil – kum karışımı zeminler üzerinde direkt kesme kutusu deneyleri yapmıştır. Farklı kil içeriği bulunan bu karışım zeminleri değişik su muhtevalarında deneye tabi tutarak su içeriğinin etkisi de araştırılmıştır. Su içeriği ve kil oranı fazla olan karışımlarda kohezyon ve içsel sürtünme açılarında ani bir düşüş gözlenmiştir. Kil içeriği arttıkça tüm normal gerilmelerde kayma dayanımının arttığı ve su muhtevası arttıkça kohezyon değerinin %5 ile %10 arasında düştüğü not edilmiştir.

Killi bir zeminde farklı numune hazırlama yöntemleri ile tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri yapan Huvaj ve Maghsoudloo (2013) efektif normal gerilme arttıkça kalıcı içsel sürtünme açısının azaldığını görmüştür. 50 kPa ile 900 kPa arasında efektif normal gerilme değerleri kullanılarak kohezyon değeri 0, içsel sürtünme açısı ise 8,7° olarak bulunmuştur. Numuneler kesme yüzeyi içeren ve içermeyen biçimde iki farklı şekilde hazırlanmış ve 400 kPa efektif normal gerilmeye maruz bırakılarak gerçekleştirilen deneylerde kalıcı içsel sürtünme açıları 7,6° ve 8,6° olarak bulunmuştur.

İyisan vd. (2013) farklı kil numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu, halka kesme ve üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirmiştir. Yapılan tüm deneyler drenajlı koşullarda gerçekleştirilmiştir ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyinde bulunan kalıcı kayma dayanım açısı en büyük sonucu vermiştir. Bunun sebebinin kesme esnasında, numune kayma düzlemi boyunca yer değiştirmenin sınırlı oluyor olması ve dane yöneliminin kayma düzlemine yeteri kadar paralel duruma gelememesi olduğu düşünülmektedir. Tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deyelerinde bulunan sonuçların genel olarak uyum içerisinde olduğu fakat halka kesme deneylerinde yer değiştirme sınırsız olduğundan dolayı dane yönelimi daha kolay sağlandığından dolayı halka kesme deneyinde bulunan sonuçların daha düşük çıktığı savunulmuştur. Genel olarak incelendiğinde ise tüm deney yöntemlerinde likit limit ve plastisite indisi arttıkça kalıcı kayma dayanım açısının azaldığı görülmüştür.

Farklı numuneler üzerinde 0,05 mm/dak ile 5 mm/dak arasında değişen kesme hızlarını kullanarak kesme kutusu deneyleri yapan Beren (2014) kesme hızının zeminin kayma dayanım parametrelerine olan etkisini incelemiştir. Kum numunelerde drenajlı deneyler sonucunda kesme hızının artması ile birlikte içsel sürtünme açısının 1° ile 1,5° civarında azaldığı, kohezyonun ise 2 mm/dak hızına kadar çok yakın olduğu fakat bu hızdan daha yüksek hızlarda 2 kPa ile 3 kPa değerlerinde bir artış olduğu gözlenmiştir. Aynı kum numunelerde drenajsız deneyler sonucunda kesme hızı arttırıldıkça koheyzonun 7 kPa değerine kadar düştüğü, içsel sürtünme açısının ise kesme hızından çok etkilenmediği görülmüştür. Kumlu kil numunelerde drenajlı koşullarda kesme hızı arttırılınca pik kayma dayanımının 8 kPa değerine kadar, içsel sürtünme açısının 2,5° değerine kadar arttığı fakat kohezyon değerinin çok fazla etkilenmediği öne sürülmüştür. Kumlu killerde drenajsız deney sonuçları ise tüm parametrelerin kesme hızından pek fazla etkilenmediğini ortaya koymuştur. Tüm sonuçlar karşılaştırıldığında genel olarak kesme hızı arttıkça içsel sürtünme açısının arttığı, kohezyon değerinin ise azaldığı fakat çok büyük farkların görülmediği savunulmuştur.

Bhat vd. (2014) heyelan bölgelerinden toplanan numuneler üzerinde halka kesme deneyleri yaparak kesme hızının kalıcı dayanım üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli zeminleri 0,073 mm/dak ile 0,586 mm/dak arasındaki hızlarda keserek sonuçları yorumlamıştır. Deneylerde düşük bir kesme hızı olarak görülebilecek 0,233 mm/dak hızı kullanıldıktan sonra, kalıcı durumdayken kayma dayanımında çok az bir artış görülmüştür.Yüksek plastisiteli zeminlerde düşük plastisiteli zeminlere oranla yavaş kesme hızlarının kalıcı kayma dayanımı üzerindeki etkisinin çok daha büyük olduğu ve pik dayanım ile kalıcı dayanım arasındaki farkın daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.

Binarbaşı (2014) killi zeminler üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyleri yaparak kalıcı kayma dayanımı parametrelerini incelemiştir. Likit limitleri %34 ile %93 arasında, plastik limitleri %19 ile %34 arasında olan numuneler doğal su içeriklerinde suya doygun bir biçimde hazırlanmış ve bu şekilde deneye tabi tutulmuştur. Deneyler sonucu likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve kil yüzdesi arttıkça kalıcı dayanım açısının azaldığı ve pik kayma dayanımı arttıkça kalıcı kayma dayanımının arttığı bulunmuştur. Yüksek plastisiteli numunelerde kalıcı kayma dayanımına ulaşabilmek için deney yaparken daha çok tekrarın gerekli olduğu görülmüştür. Ayrıca bilgisayar kontrollü tekrarlı kesme kutusu deneylerinde çıkan kalıcı kayma dayanım açısı, standart tekrarlı kesme kutusu deneyinde ulaşılan sonuçlara göre 1° ile 2° gibi bir fark ortaya koymaktadır. Bunun nedeninin ise bilgisayar kontrollü tekrarlı kesme kutusu deneylerinde numunenin kesintisiz bir biçimde daha yüksek deformasyonlarda kesilebiliyor olması düşünülmektedir.

Boşluk suyu basıncının hızlara olan etkisini araştırmak üzere Bol ve İspiroğlu (2016) direkt kesme kutusunda killi zeminler üzerinde deneyler yapmıştır. Farklı oranlarda silt içeren beş adet numune üzerinde direkt kesme kutusu ve konsolidasyonsuz drenajlı üç eksenli basınç deneyleri sonucunda satndartlarda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır. Kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneylerinde bulunan sonuçlar karşılaştırıldığında ise efektif kohezyon her iki deney sonucunda farklı çıkmış, efektif sürtünme sonuçlarında ise doğrusal bir ilişki bulunmuştur. Bun rağmen konsolidasyonlu

drenajsız üç eksenli basınç deneylerinde bulunan efektif sürtünme açısının kesme kutusu deneylerinde bulunan değerlere nazaran yaklaşık 13° daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

Suya doygunluğun kalıcı kayma dayanımı parametrelerini incelemek üzere Satı (2016) ince daneli zeminler üzerine bir çalışma yürütmüştür. Farklı sıkıştırma enerjilerinde hazırlanan numuneler üzerinde tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Doygun durumda hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde bulunan kalıcı kayma dayanım açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyleri sonucu bulunan değerlere göre ortalama 5° daha fazla olduğu bulunmuştur. Numunenin suya doygun olmadığı durumlarda ise konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde bulunan maksimum kayma dayanım açılarının doygun duruma göre 2° daha fazla çıktığı saptanmıştır. Bu sonuçlara göre doygunluğun maksimum kayma dayanım açıları üzerinde etkisi olduğu fakat kalıcı kayma dayanım açıları üzerinde ise önemli bir etkisinin bulunmadığı belirtilmiştir.

Akış vd. (2017) yüksek plastisiteli killerde kesme hızının kalıcı kayma dayanımına olan etkisini incelemiştir. Sonuçlardan yola çıkarak ölçülen kalıcı dayanımın kesme hızından etkilendiği ve hızın arttıkça dayanımın da arttığı öne sürülmüştür. Kesme hızı 0,0007 mm/dak ile sınırlandırıldığında bulunan kalıcı kayma dayanım açısının yaklaşık 2,5° hata payıyla bulunabildiği görülmüştür. Kalıcı kayma dayanımına ulaşıldığında kohezyonun 0 olduğu kabul edilerek kalıcı kayma dayanım açıları 9,9° ile 15° değerleri arasında çıkmıştır.

Hatipoğlu ve İyisan (2017) farklı plastisite özelliklerine sahip 31 adet numune üzerinde tekrarlı kesme kutusu ve halka kesme deneyleri yapmıştır. Likit limitleri %50 ile %340 arasında olan, plastisite indisleri %25 ile %297 arasında olan, tamamı yüksek plastisiteli kil numuneler 0,02 mm/dak ve 0,03 mm/dak hızlarında kesilmiş, deneyler en az üç farklı düşey gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar ele alındığında likit limit ve plastisite indisi arttıkça kalıcı kayma dayanım açısının azaldığı, likit limit %100 değerini aşınca sonuçların uyum gösterip saçılma gözlenmediği fakat bu değerin altındaki likit limitlerde verilerde farkedilir bir saçılma gözlendiği, %250 gibi yüksek likit limitli numunelerde kayma dayanım açısının 4° değerine kadar düşebildiği görülmüştür.

Normal konsolide ve yüksek plastisiteli killerde pik ve kalıcı kayma dayanım açılarını inceleyen Akış (2021) tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri sonucu 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında pik dayanım açılarını 28,8°, 20,3° ve 15,7° olarak bulmuştur. Kalıcı kayma dayanım açıları ise aynı normal gerilmeler altında sırasıyla 16,6°, 13,2° ve 5,6° olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak kalıcı kayma dayanım değerinin normal gerilme değeri ile doğrudan ilişkili olduğu kanısına varılmıştır.

3. ZEMİNLERİN KALICI KAYMA DAYANIMI

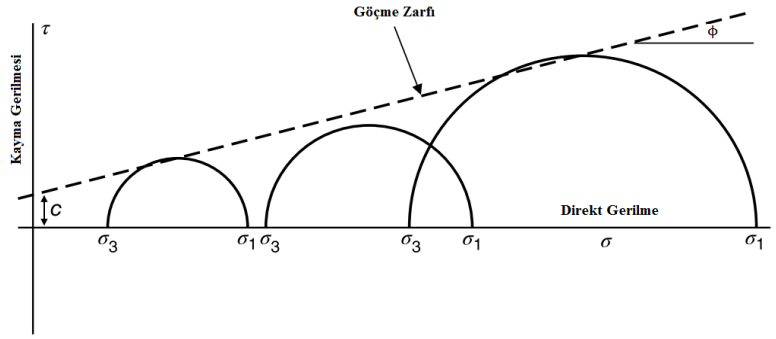
3.1. Mohr – Coulomb Göçme Hipotezi

Zeminlerin bir kısmı hem kohezyonlu dayanıma hem de sürtünme dayanımına sahiptir. Bu durumlarda bu iki dayanım türünü ifade eden tek bir dayanım formülü kullanılması gerekmektedir. Geoteknik analizler yapılırken bu ifadeyi sağlayan Mohr – Coulomb göçme hipotezinden yararlanılır ve deneyler sonucu verilerin güncel veya planlanan saha şartları analizlerine geri yansıtılmasına olanak sağlar. Bu işlem efektif gerilme veya toplam gerilme analizleri ele alınarak yapılabilir (Coduto, 2006).

Gerçek malzemeleri ele alarak öne sürdüğü göçme kriteri ile Mohr (1900) malzemenin göçebilmesi için kayma gerilmesinin artarak kırılma düzleminde bulunan kayma gerilmesine eşit olması gerektiğini savunmuştur. Normal gerilmeye bağlı bir fonksiyon olan kayma gerilmesini içeren durum Denklem 3.1'de şöyle ifade etmiştir;

$$\tau_{ff} = f(\sigma_{ff}) \tag{3.1}$$

Göçme anındaki asal gerilmeler biliniyorsa o eleman için o anki gerilme durumunu ifade eden Mohr dairesi çizilebilir. Yenilme anına kadar birçok deneyler yapılıp, çok sayıda eleman için bu andaki gerilmeler ölçülerek her bir eleman için Mohr dairesi oluşturulabilir. Mohr daireleri yenilme anında oluşturulduğundan dolayı kayma gerilmesinin limitlerini ya da kırılma zarflarını Şekil 3.1'de gösterildiği üzere belirlemek mümkündür. Bu zarfa Mohr kırılma zarfı denir. Kırılma yalnızca kayma ve normal gerilme düzleminde, Mohr daireleri Mohr kırılma zarfına teğet olduğu anda gerçekleşir (Holtz vd., 2015).



Şekil 3.1. Bir zeminin genel gerilme ve göçme durumunun Mohr diyagramında gösterimi (Carter ve Bentley, 2016)

Zemin kayma dayanımı konsepti Coulomb (1776) tarafından geliştirilmiştir ve sonra Mohr tarafından kohezyon ile kayma dayanım açısı dahil edilerek zeminin kayma dayanımının karakterize edilebileceği öne sürülmüştür. Kimi durumlarda basit bir bağıntı olarak atfedilse de kayma dayanım ilişkileri açısından çok iyi sonuçlar sağlamaktadır ve en sık kullanılan kayma dayanım modelidir. Mohr – Coulomb göçme hipotezi Denklem 3.2'de şöyle tanımlanmıştır;

$$\tau_f = c + \sigma * tan\phi \tag{3.2}$$

Bu bağıntıda τ_f herhangi bir düzlemdeki kayma dayanım yenilmesini, σ düzlemdeki normal gerilmeyi ve c ile ϕ kayma dayanım parametreleri olan kohezyon ile kayma dayanım açısını ifade etmektedir (Carter ve Bentley, 2016).

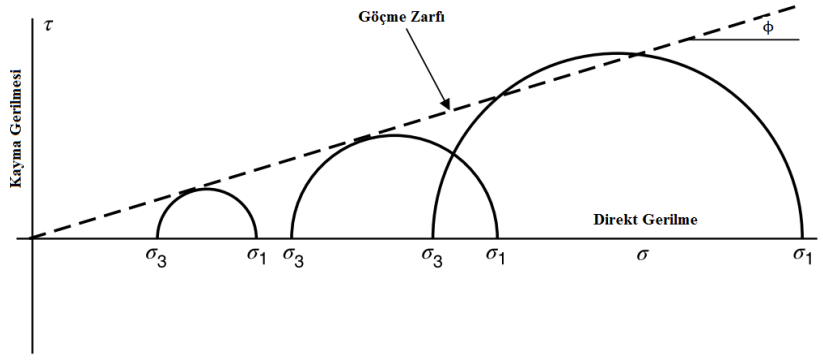
Formülde belirtilmiş olan kayma dayanım parametreleri kohezyon ve kayma dayanım açısı zeminin kendi özellikleri değildir ve deney koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. Bağıntı göz önüne alınırsa her iki parametrenin de sıfır olabileceği anlaşılmaktadır. Ele alınan iki çalışmayı birleştirerek tek bir bağıntının elde edilmesi diğer kırılma kriterlerine göre oldukça kolay bir kullanım sunmuştur. Oluşturulan bu formül, kırılma düzlemindeki gerilmeleri göçme anında tahmin eden tek bağıntıdır ve zeminler farklı yüzeylerde göçtüklerinden dolayı oluşabilecek kayma yüzeylerinde göçme anındaki

gerilmeleri belirleyebilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında temellerin ve şevlerin stabilite analizlerinde Mohr – Coulomb göçme hipotezi oldukça yararlıdır (Holtz vd., 2015).

Zeminlerin kayma dayanımı değerlendirilirken iki farklı yöntem izlenebilir. Zeminin ve boşluk sularının birlikte oluşturduğu toplam dayanım değerlendirilebileceği gibi zeminin kendisinin, boşluk suyu basıncından bağımsız olarak karşılayabileceği efektif gerilme değerlendirilebilir. Bu durum Denklem 3.3.'de görülen bağıntıdaki gibi ifade edilir;

$$\tau_f = c' + \sigma' * tan\phi' \tag{3.3}$$

Bu bağıntıda σ' zemin iskeletindeki efektif normal gerilmeyi, c' ve ϕ' ise efektif gerilmeye bağlı kayma dayanım parametrelerini belirtmektedir. Efektif gerilme yaklaşımı zemine etkiyen yüklerin etkisini ölçmede daha doğru sonuçlar vermektedir. Bunlar göz önüne alındığında doygun zeminlerde drenaja izin verilmesinin daha basit bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir çünkü yüklemenin yavaş olduğu durumlarda boşluk suyu basıncı oluşmayacaktır ve efektif gerilme toplam gerilmeye eşit olacaktır. Drenajlı durumlarda efektif gerilme durumu değerlendirildiğinde zeminlerin kesme dayanım sonuçlarında kohezyon değeri Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sıfır çıkmıştır ve Mohr daireleriyle bu durum gösterilmiştir (Carter ve Bentley, 2016).

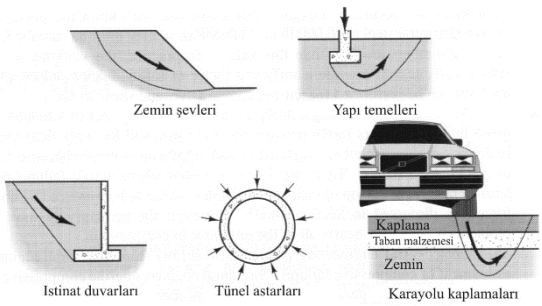


Şekil 3.2. Yalnızca zeminin gerilme ve göçme durumunun Mohr diyagramında gösterimi (Carter ve Bentley, 2016)

Granül zeminlerde drenaj hızlı bir biçimde sağlanabileceği için boşluk suyu basıncı oluşturmazlar ve görüldüğü üzere bu tür bir sonuç gözlenmesi daha olasıdır (Bkz. Şekil 3.2). Benzer olarak çoğu kil konsolidasyonlu drenajlı durumlar altında veya boşluk basınçları ölçülmek şartıyla konsolidasyonlu drenajsız durumlarda deneye tabi tutulduğunda aynı sonuçlar gözlenmektedir. Bazı killerde, özellikle aşırı konsolide killerde, görüldüğü gibi ufak bir drenaj veya efektif gerilme kohezyonu görülebilir (Bkz. Şekil 3.1) (Carter ve Bentley, 2016).

3.2. Zeminlerin Kayma Dayanımı

Bir malzemenin dayanımı o malzemenin kaldırabileceği en büyük gerilmedir (Coduto, 2006). Zeminlerde tıpkı diğer malzemeler gibi artan gerilmelere maruz kaldıklarında bir noktadan sonra dayanım gösteremezler. Kendi kayma dayanımlarından daha yüksek kayma gerilmelerine dayanamazlar ve etki eden kayma gerilmeleri kendi kayma dayanımlarına yaklaştığında deforme olurlar. Kayma dayanımı temellerin, istinat duvarlarının, şevlerin ve setlerin stabilitelerini tespit etmede çok önemli bir zemin parametresidir (Bardet, 1997). Taşıma kapasitesi, derin temellerin destek kapasiteleri ve penetrasyon direnci gibi zemin stabilitelerini etkileyen tüm unsurlar zemin dayanımına bağlıdır (Mitchell ve Soga, 2005). Zeminler veya kayalar basınç altında yenilmezler. Büyük bası gerilmeleri uygulandığında yenilme gözlemlense de zemin aslında basınçtan ziyade kayma şeklinde yenilir. Bu sebeple neredeyse tüm geoteknik dayanım analizlerinde Şekil 3.3'te gösterildiği üzere yalnızca kayma değerleri göz önüne alınır (Coduto, 2006).



Şekil 3.3. Zeminlerdeki dayanım analizinin uygulama alanları (Coduto, 2006)

Zeminler partiküllü bir yapıdadır bu yüzden kayma yenilmeleri partiküllerin kayarak veya birbiri üzerinden yuvarlanıp geçerek meydana gelmektedir. Kimi zaman partikül ezilmeleri oluşsa da kayma dayanımı, hepsinden önce iç dayanıma değil partiküller arası etkileşime bağlıdır. Bu etkileşimler ise kohezyon dayanımı ve sürtünme dayanımı olarak ikiye ayrılır (Coduto, 2006).

Zeminlerdeki sürtünme dayanımı da fizikteki sürtünmeye benzer fakat geoteknik mühendisliğinde sürtünme katsayısını kullanmak yerine içsel sürtünme açısını kullanmak tercih sebebidir. Ayrıca kuvvet yerine de gerilme cinsinden çalışmak daha uygun görüldüğü için sürtünmeden dolayı oluşacak kayma dayanımı Denklem 3.4'teki gibi yazılabilir;

$$\tau = \sigma' * tan\phi' \tag{3.4}$$

Burada τ kayma dayanımını, σ' kayma düzlemi üzerindeki efektif gerilmeyi ve ϕ' efektif içsel sürtünme açısını ifade etmektedir. Dayanım efektif gerilmeler cinsinden tanımlandığı için toplam gerilme yerine efektif gerilme değerleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise boşluk suyunun statik kayma dayanımı olmadığı için sürtünme dayanımına sadece katı partiküllerinin katkıda bulunması ve efektif gerilmenin tanımının ise katı partiküller tarafından taşınan normal gerilme olmasıdır. Suyun sürtünme dayanımına olan etkisi çok önemlidir çünkü kayma yenilmelerinin birçoğu yeraltı suyu değişimlerinden dolayı meydana gelmektedir (Coduto, 2006).

Kohezyon faktörünü de göz önüne aldığımızda zeminin kayma dayanımını ifade etmek için uluslararası geçerliliği olan Denklem 3.5 yazılabilir;

$$\tau = c' + \sigma' * tan\phi' \tag{3.5}$$

Efektif gerilmelere bağlı olan c' ve ϕ' genellikle kayma dayanım parametreleri olarak adlandırılır. Eğer zemin kütlesi üzerinde herhangi bir düzlemdeki kayma gerilmesi

Mohr – Coulomb göçme hipotezi olarak da bilinen bu formülden bulunan sonucu aşarsa, o düzlem üzerinde hareket veya kayma oluşur (Wesley, 2009). Zeminlerin bir kısmında efektif gerilme sıfır olsa bile kayma dayanımı oluşabilir. Buna kohezyonlu dayanım adı verilir. Kohezyonlu dayanım gerçek kohezyon ve görünür kohezyon olmak üzere ikiye ayrılır. Gerçek kohezyon zemin partikülleri arasındaki bir bağ sonucu oluşurken, görünür kohezyon partiküller arasındaki bağdan dolayı oluşuyormuş gibi görünse de aslında görünmeyen sürtünme dayanımıdır (Coduto, 2006). Kayma dayanım parametreleri neredeyse onları bulmak için yapılan deney yöntemlerinden bağımsızdır ve belirli bir durumdaki zemin için sabit değer olarak alınabilir. Kohezyon, partiküller arası bağlar sonucu oluştuğu için bu değer sabittir fakat sürtünme değerleri olan efektif normal gerilme ve içsel sürtünme açısı öyle değildir. Bu değerler kayma düzlemindeki normal gerilmeye göre değişmektedir (Wesley, 2009).

Kumların kayma dayanımı ve deformasyon davranışı kil ve siltlere nazaran daha anlaşılabilirdir (Wesley, 2009). Kumların kayma dirençleri belirlenirken mineraloji, dane boyutu, dane şekli, dane dağılımı, sıkılık, gerilme durumu, deney yöntemi ve drenaj gibi pek çok faktör birlikte ele alınır (Mitchell ve Soga, 2005). Yüksek geçirgenliklerinden dolayı iri daneli zeminlerde boşluk suyu basınçları pek fazla gözlenmez (Carter ve Bentley, 2016). Yüklemeler altında temiz kumlar ve çakıllarda sıfır veya sıfıra yakın bir miktarda aşırı boşluk suyu meydana gelir çünkü bu zeminlerin hidrolik iletkenlikleri çok yüksektir. Normal gerilmeler veya kayma gerilmelerindeki değişimler sonucu boşluklar genişler veya büzülür. Böylece su kolayca içeriye veya dışarıya doğru akar. Bunların sonucu olarak boşluk suyu basıncı, hidrostatik boşluk suyu basıncına eşit olur ve kayma dayanımı analizleri efektif gerilmelere bağlanabilir (Coduto, 2006). Bu veriler sonucu toplam ve efektif gerilmenin karmaşıklığından kaçınılır ve görünen kohezyon veya drenajsız kayma dayanımı gibi parametreler gözlenmez. Nihayetinde iri daneli zeminlerin kayma dayanımları daneler arası sürtünme direnci kullanılarak belirlenir (Carter ve Bentley, 2016).

Çoğu zaman göçme, numunenin kayma dayanımı ile aynı olan en büyük asal gerilme farkı olarak tanımlanır. Kumların kayma dayanımları ölçülürken yapılan deneylerdeki davranışlarını gözlemlemek için yüksek boşluk oranına sahip gevşek zeminler ile düşük

boşluk oranına sahip sıkı zeminler değerlendirilir (Holtz vd., 2015). Doygun kumlarda boşluk suyu basıncının sıfır olduğu göze alınınca, kuru ve doygun kumların kayma dayanım karakteristiklerinin aynı olduğu söylenebilir (Craig, 2004). Doygun kumlarda ve çakıllarda çimentolayıcı bir malzeme veya kil yoksa kohezyon sıfırdır. Sürtünme açıları ise laboratuvar veya arazi deneyleri sonucu elde edilir. Yapılan deneyler sonucu içsel sürtünme açısı değerinin zemin birim ağırlığı arttıkça arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin zeminlerin sıkıştırılabilir olmasından kaynaklandığı sanılmaktadır. Ayrıca deneyler genellikle çakılların kumlara göre daha sağlam olduğunu ve iyi derecelenmiş zeminlerin kötü derecelenmiş olanlara göre daha sağlam olduğunu göstermiştir (Coduto, 2006).

Kil ve siltlerde kayma dayanımını değerlendirmek kum ve çakıllara göre daha zordur. Çünkü kil daneleri kesme esnasında daha önemli değişmelere maruz kalırlar ve hidrolik iletkenlikleri daha düşük olduğu için su boşlukların içine veya dışına rahatlıkla akamaz, böylece genellikle zeminde boşluk suyu basınçları oluşur. Ayrıca suya doygun killer ve siltler çoğu zaman kum ve çakıllardan daha zayıf olduğu için çoğunlukla problemlerin kaynağını bu zeminler oluşturmaktadır. Yere temeller gibi yükler uygulandığında toplam düşey gerilme ve kayma gerilmesi artar. Kumlu zeminlerde gerilme arttığı zaman boşluk suyunun bir kısmı kolayca akar. Bu hızlı konsolidasyona, dolayısıyla düşey efektif gerilmede artışa sebebiyet verir. Buna drenajlı durum denir. Buna karşılık olarak suya doygun bir kil aynı yüke maruz bırakıldığında bu tür zeminlerin hidrolik iletkenliği düşük olduğundan boşluk suyu çok daha yavaş bir akışa sahip olur. Bunun sonucu olarak zeminde aşırı boşluk suyu basınçları meydana gelir ve buna drenajsız durum denir. Bu durumlar yükleme hızına ve drenaj hızına bağlıdır. Yükleme hızı drenaj hızına nazaran yavaş ise drenajlı koşullar, yüksek ise drenajsız koşullar egemendir (Coduto, 2006).

Killerin dayanım parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı, zemin içeriğine göre değişmektedir ve deney yöntemlerinin farklılığı nedeniyle boşluk suyu basınçları değişkenlik gösterdiğinden dolayı drenajsız kayma dayanımları geniş bir aralıkta yer almaktadır (Wesley, 2009). Öte yandan drenajlı durum değerlendirmesi en kolay olan durumdur. Çünkü aşırı boşluk suyu olmadığından uygun deney yöntemleri ile sadece kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlendirilebilir. Hidrostatik boşluk suyu basınçlarına

dayanarak efektif gerilme bulunup oradan da kayma dayanımı hesaplanabilir (Coduto, 2006). Eğer doygun bir kil numunesi deney esnasında konsolide edilirse boşluk oranı ve efektif gerilme arasında bir ilişki bulunabilir. Bu ilişki kilin gerilme geçmişine göre değişkenlik gösterir. Eğer hali hazırda bulunan efektif gerilme zemine etkiyen en büyük gerilme ise zemine normal konsolide denir. Eğer zemin geçmişte daha büyük gerilmelere maruz kaldıysa aşırı konsolide zemindir. Bu gerilmenin şimdiki gerilme değerine bölünmesiyle ise aşırı konsolide oranı bulunmuş olur. Normal konsolide killerde drenajsız dayanım genellikle efektif düşey gerilmenin artmasıyla lineer olarak artar (Craig, 2004).

Doygun olmayan zeminlerde ise dayanım genellikle daha büyüktür fakat değerlendirilmeleri daha zordur. Bu tür zeminlerdeki ilave dayanımın bir kısmı negatif boşluk suyu basınçlarından kaynaklanmaktadır. Bu basınçlar efektif gerilmeyi arttırdığından dolayı kayma dayanımını da arttırır (Coduto, 2006). Genel olarak killer ele alındığında boşluk suyu statik kayma gerilmelerini taşıyamayacağından dolayı uygulanan gerilmeler zeminin kendisi tarafından taşınmak zorundadır. Bu da zeminin kayma dayanımının boşluk suyu basınçlarına bağlı olmayıp yalnızca efektif gerilmelere bağlı olduğunu gösterir (Holtz vd., 2015).

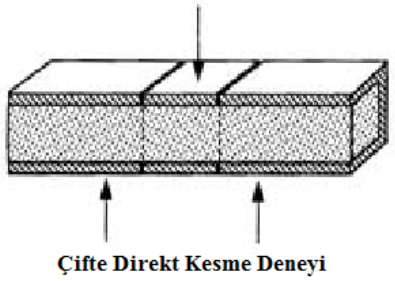
3.3. Kayma Dayanımının Belirlenmesi

Geoteknik mühendisleri kayma dayanımını hem yerinde hem de saha dışı yöntemler kullanarak ölçebilirler. Saha dışında yapılan deneyler, bir sondaj kuyusundan veya kazı sonucu elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler bir zemin mekaniği laboratuvarına getirildikten sonra laboratuvarda bulunan deney ekipmanları kullanılarak analiz etmeyi kapsar. Kayma dayanım ölçümlerinin çoğu laboratuvarda yapılmaktadır. Bu deney yöntemleri arasında sıkça kullanılanlar kesme kutusu deneyleri, halka kesme deneyleri ve üç eksenli basınç deneyleridir (Coduto, 2006). Laboratuvarda yapılan zemin deneylerinin amacı zeminin gerilme – yer değiştirme davranışlarını belirlemek ve numunelerin gerilme izlerine bağlı kalarak sahadaki duruma benzer kayma dayanımlarını bulmaktır. Fakat zemin sahadan çıkarılırken, laboratuvara taşınırken ve laboratuvar numuneleri hazırlanırken genellikle zeminin başlangıç koşulları değişmektedir. Bu sebeple

deneyler yapılmadan önce bu duruma dikkat edilmeli ve zeminin tabi hali üzerinde çalışılacaksa özellikle sıkılık olmak üzere başlangıç koşulları oluşturularak uygun yüklemeler yapılmalıdır (Bardet, 1997). Kayma dayanım değerlerinin, yapılacak olan temeller, istinat duvarları, şevlerin stabiliteleri, kazıkların dayanımları dahil olmak üzere tasarım hesaplamalarında geniş bir kullanım alanı vardır (Carter ve Bentley, 2016).

3.3.1. Kesme kutusu deneyi

Kayma dayanımını bulmada kullanılan en eski test yöntemi olan direkt kesme kutusu deneyi ilk olarak 1776 yılında Coulomb tarafından ortaya atılmıştır (Wesley, 2009). Direkt kesme kutusu deneyleri temellerin, şevlerin ve istinat duvarlarının analizlerinin yapılabilmesi için zeminlerin sürtünme açısını, kohezyonunu ve kayma dayanımlarını ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Collin tarafından 1846 yılında geliştirilen ve kesme kutusu aletinin atası sayılan çifte direkt kesme aparatı Şekil 3.4'te görülmektedir. Bu aparatta zemin, ayrılan kutuların içerisine yerleştirilir ve ağırlıkların koyulduğu orta kısım kesme işlemine maruz bırakılır (Bardet, 1997).

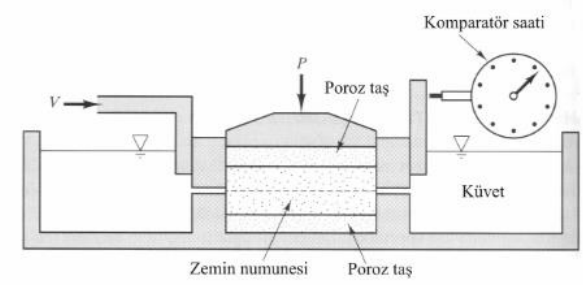


Şekil 3.4. Collin tarafından geliştirilen kesme deneyi aparatı (Bardet, 1997)

Kesme kutusu deneyi kayma yüklerini taklit ederek, önceden belirlenmiş bir doğrultuda göçme yüzeyi oluşturur. Birbirine bağlı iki rijit kutu içerisinde bulunan numuneye normal yük verilir ve kesme kuvvetiyle numunede kayma yüzeyi oluşturulur. Kesme kuvvetinin zemine daha sağlıklı aktarılabilmesi için zemin ve kesme kutusu arasındaki kayma etkileşimi minimuma indirgemek amacıyla numune tırtıklı poroz taşlar arasına yerleştirilir. Poroz taşlar aynı zamanda doygun numunelerde suyun rahatça drene

olabilmesini sağlamaktadır. Kesme kutusu deneyleri zeminlerin kayma dayanımını bulmada kullanışlıdır fakat gerilme – yük davranışları bu deney yöntemiyle tespit edilememektedir (Bardet, 1997). Buna karşın kesme işlemi, mekanizma geri ve ileri alınarak tekrarlanırsa zeminlerin kalıcı kayma dayanımını bulmada kullanılabilir (Carter ve Bentley, 2016).

Şekil 3.5'te gösterilen deney aletinde genellikle aralığı 60 – 75 mm çapında değişen silindirik numuneler kullanılır ve numuneye düşey bir yük uygulanır. Numunenin suya doygun halde kalabilmesi için deney esnasında su küvetinin içinde bekletilir. Verilen düşey yük sayesinde numunenin bu yük altında konsolide olması sağlanır. Zemin numunesi tamamen konsolide olduğunda ise bir kesme kuvveti yavaşça uygulanır. Bu işlemler sonucu zeminin kayma gerilmelerine karşın kayma yer değiştirmelerinin grafiği çizilir. Daha sonra aynı aşamalar özdeş yeni numuneler üzerinde farklı büyüklüklerde düşey yük uygulanarak tekrarlanır. Kesme işlemi, kesme kutusunun yer değiştirme kapasitesinin sonuna gelinceye dek devam edilir (Coduto, 2006). Farklı gerilmelerde yapılan deneyler sonucu göçme anındaki kayma dayanımları belirlenir. Bunun sonunda en uygun yerden bir doğru geçirilerek göçme zarfı çizilir ve kayma dayanım parametreleri bu doğrudan hareketle belirlenir (Craig, 2004).



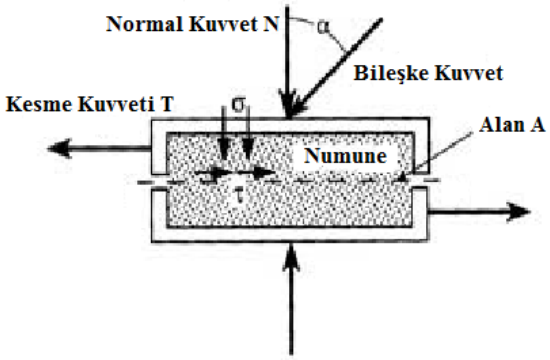
Şekil 3.5. Direkt kesme kutusu mekanizması (Coduto, 2006)

Zeminlerin önceden belirlenmiş bir göçme yüzeyindeki kayma dayanımını belirlemede kullanılan direkt kesme kutusu deneylerinde kesme mekanizması Şekil 3.6'da görülmektedir. Rijit kutuda bulunan zemin numunesine uygulanan normal yük N, kesme kuvveti T ve kayma alanı A olarak tanımlanırsa, kayma yüzeyi τ, kesme kuvvetinin kayma alanına bölünmesine yani T/A'ya eşit olur. Normal gerilme olan σ ise N/A'ya denktir. Zemin

yüzeyinde kaymaya sebep olan kesme gerilmesi τ, aynı zamanda zeminin kayma dayanımıdır ve Denklem 3.6'da görülen Mohr – Coulomb teorisi ile tanımlanabilir;

$$\tau = c + \sigma * tan\phi \tag{3.6}$$

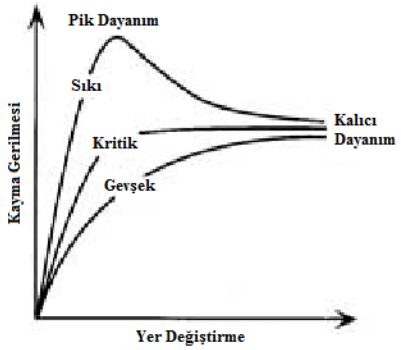
Bu denklemde c kohezyonu ve ϕ ise içsel sürtünme açısını temsil etmektedir (Bardet, 1997).



Şekil 3.6. Direkt kesme kutusu deneyi kesme mekanizması (Bardet, 1997)

Direkt kesme kutusu deneyleri sırasında gerilme durumu tamamıyla belli değildir çünkü σ ve τ yalnızca yatay düzlemde ölçülebildiğinden dolayı diğer yüzeylerdeki değerler belirsizdir. Bu nedenle kesme esnasındaki gerilme izleri gösterilememektedir. Fakat göçme düzleminin yatay olduğu ve gerilme durumunun üniform olduğu kabul edilirse göçme anındaki Mohr daireleri çizilebilir (Bardet, 1997).

İri daneli zeminlerde kum daneleri öncelikle sıkışır, sonra kesme sırasında birbirinden uzaklaşmaya başlar. Küçük yer değiştirmelerde sıkı kumlar gevşek kumlara göre daha büyük kayma dayanımlarına ulaşmaktadır. Fakat pik dayanıma ulaştıktan sonra Şekil 3.7'de görüldüğü gibi sıkı kumlar, gevşek kumlarla aynı kalıcı dayanıma ulaşana kadar kademeli olarak yumuşamaya başlar (Bardet, 1997).

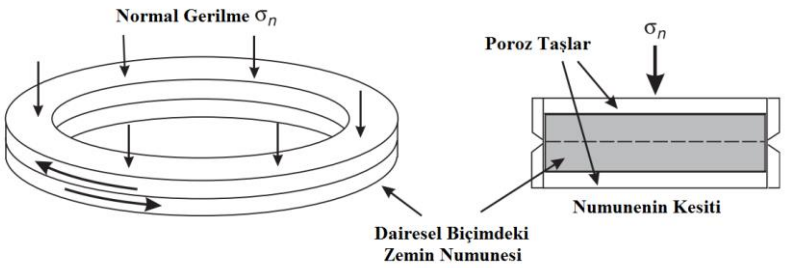


Şekil 3.7. Kumların kesme kutusu deneyi grafikleri (Bardet, 1997)

Zeminlerin kayma dayanımını kesme kutusu deneyleri ile belirlemenin artıları ve eksileri vardır. Direkt kesme kutusu deneylerini gerçekleştirmek ekonomiktir ve ince daneli zeminlerin göçme yüzeylerini belirlemede güvenilir sonuçlar vermektedir (Bardet, 1997). Özellikle kumlu zeminlerde yapılan deneylerde drenajlı dayanım elde etmede büyük rol oynamaktadır (Coduto, 2006). Bu deney yönteminin ana dezavantajları drenaj durumunun kontrol edilememesi ve kesme esnasında düşey yüklerin sabit tutulamamasıdır (Craig, 2004). Bunların yanında kesme kutusunun bir diğer dezavantajı ise zeminin en zayıf noktasında yenilmesine izin vermek yerine kesmenin daha önceden belirlenmiş bir düzlem boyunca gerçekleşmesini sağlamaktır. Bu durum zeminin en düşük dayanımını veremeyebileceğinin yanı sıra, numunede üniform olmayan yer değiştirmelere neden olur ve deney sonuçlarında hatalar oluşabilir (Coduto, 2006).

3.3.2. Halka kesme deneyi

Kalıcı kayma dayanımını bulabilmek için en güvenilir deney yöntemi ilk olarak 1971 yılında Bishop ve ekibinin tasarladığı Şekil 3.8'de taslakları görülen halka kesme aletidir. Fakat bu aletin kurulumu zor ve zaman alıcı olduğundan dolayı 1979 yılında Bromhead bu aleti geliştirip, kullanımını çok daha basitleştirmiş ve neredeyse aynı sonuçları veren yeni bir deney aleti ortaya koymuştur (Wesley, 2009). Zaman içinde birçok halka kesme deney aleti geliştirilse de Bromhead tarafından geliştirilen aletin maliyeti, ulaşılabilirliği ve kullanım kolaylığı dolayısıyla diğer aletlere kıyasla daha çok tercih edilmiştir (Stark ve Vettel, 1992).



Şekil 3.8. Bishop tarafından tasarlanan halka kesme deney aleti (Wesley, 2009)

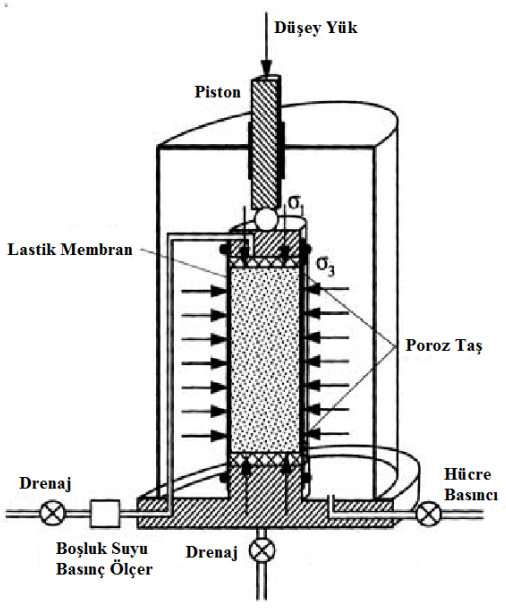
Kesme kutusu deneyleri killerde kalıcı kayma dayanımına ulaşmak için yeterli yer değiştirmeyi sağlamaz. Bu sebeple yüksek yer değiştirmelere izin veren halka kesme deney aleti geliştirilmiştir. Yapılacak olan deneylerde normal yüke maruz bırakılan halka şeklinde bir numune kullanılır. Döndürülen numunenin kayma gerilmesi, numuneyi döndürmek için gereken torktan hesaplanır (Coduto, 2006). Halka kesme deneyinde numune, içi boş iki halka içine doldurulur. Halka kesme deneyi kayma yüzeyinin sabit kalmasından dolayı bize kesme kutusundan daha büyük yer değiştirmelere ulaşmamıza olanak tanır (Bardet, 1997). Deneyler gerçekleştirilirken dönme hızı numunenin drene olabilmesini sağlayacak kadar yavaş olmalıdır (Craig, 2004).

Bromhead tarafından geliştirilen deney aleti 7 cm iç yarıçapı, 10 cm dış yarıçapı ve 0,5 cm derinliği olan halka biçimli bir tasarıma sahiptir. Drenaj alt ve üst plakalardaki porozlu yüzeyler sayesinde sağlanmaktadır. Bu alet sisteminde ön kesmeli, tek aşamalı ve çok aşamalı olmak üzere birçok deney prosedürü bulunmaktadır. Halka kesme deneylerinde numunenin çok hızlı yer değiştirme oranlarında kesilmesi işlemine ön kesme denir. Ön kesme yapılmadan önce, numunenin hızlı kesme sırasında uyarılmaması için aşırı boşluk suyu basıncının giderilmesi gerekmektedir. Ön kesme uygulanan numuneler pik vermediği için pik sonrası davranış tahminleri yapılamamaktadır. Tek aşamalı prosedürde numune istenilen efektif gerilmede yüklenir ve numune kesilir. Deney sonunda numune çıkarılarak yeni numune yerleştirilir. 200 kPa ve daha düşük efektif gerilmelerde gerçekleştirilen numunelerde daha doğru kalıcı dayanım değerleri bulunurken, daha yüksek efektif gerilmelerde kesme aşamasında konsolidasyon ve zeminin kalıp dışına taşmasından dolayı

üst başlıkta önemli oturmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle ölçülen kalıcı dayanım değerleri daha yüksek çıkabilmektedir. Çok aşamalı deneylerde ise deney süreleri azaltılabilmektedir. Çok aşamalı deneylerde numune, ilk normal gerilme altında kalıcı dayanıma ulaştıktan sonra kesme durdurulur ve normal gerilme iki katına çıkarılır. Bu aşamada kesmeye başlamadan önce numunenin tekrardan konsolide olması gerekmektedir. Bu işlemler faklı gerilme seviyelerinde birkaç kez tekrarlanır. Üst başlıkta oluşan oturmalar sınırlanan değeri aşmadığı sürece çok aşamalı deneyler kabul edilebilirdir (Stark ve Vettel, 1992).

3.3.3. Üç eksenli basınç deneyi

Üç eksenli basınç deneyleri zeminin gerilme – yer değiştirme – yük karakteristiklerini belirlemede en doğru sonuçları veren ve en kullanışlı laboratuvar deneyidir. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere silindirik zemin numunesi lastik membran içine alınır. Alttaki ve üstteki başlıklar arasına poroz diskler yerleştirilir ve drenaj sistemlerine bağlanır. Yatay gerilmeler üç eksenli hücre haznesi içerisinde oluşan basınç ile numuneye iletilirken, düşey gerilme pistonun itilmesi ile sağlanır (Bardet, 1997).



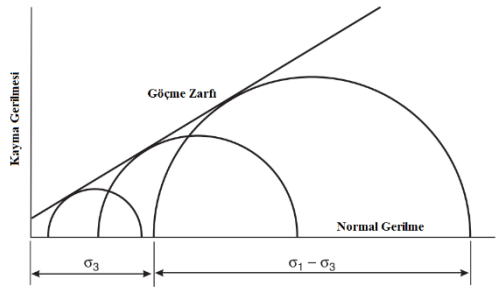
Şekil 3.9. Üç eksenli basınç deney sistemi (Bardet, 1997)

Üç eksenli basınç deneyleri, numunenin daha önceden konsolide olmasına veya daha önceden kesilmemiş olmasına göre konsolidasyonlu ya da konsolidasyonsuz olarak gerçekleştirilebilir. Konsolidasyon esnasında, numunenin sahadaki başlangıç gerilmesini taklit edebilmek için verilen gerilme kademeli olarak arttırılır. Konsolidasyon aşamasını takip eden kesme sırasında zemine uygulanılacak olan gerilmeler verilmeye başlanır. Kesme aşaması drenajlı veya drenajsız olarak yapılabilir. Drenajlı yapılacak olan deneylerde drenaj vanaları açılır ve boşluk basıncını değiştirmeden suyun drene olmasına izin verilir. Drenajsız deneylerde ise drenaj vanaları kapalı tutularak numuneden suyun çıkışına izin verilmez. Drenajsız deneylerde aşırı boşluk suyu basıncı oluştuğundan dolayı toplam ve efektif gerilme birbiriyle örtüşmez. Fakat drenajlı deneylerde boşluk basıncı oluşmayacağından, efektif ve toplam gerilmeler eşit çıkar. Drenajlı deneylerde hacim değişimini ölçebilmek için tam doygun numuneler kullanılmalıdır ve her zaman konsolide olmuş numuneleri içermelidir (Bardet, 1997).

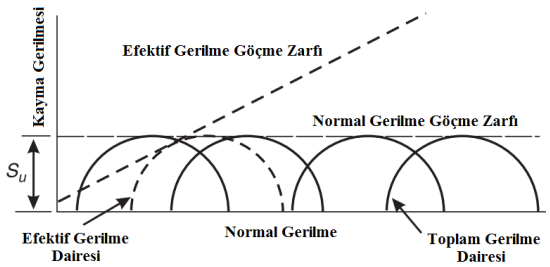
Üç eksenli basınç deneyleri için üç temel deney tipi vardır. Kondolisadyonlu ve drenajlı deneyler CD, konsolidasyonlu ve drenajsız deneyler CU, konsolidasyonsuz ve drenajsız deneyler UU olarak adlandırılır. Bu kısaltmalarda ilk harf deneyin konsolidasyon durumunu ifade ederken ikinci harf drenaj durumunu ifade eder. CD ve CU deneylerinde zemin numunesi ilk olarak başlangıç efektif gerilmelerle konsolide edilir. Konsolidasyon, sürtünme oluşturan malzemelerin elastik özellikleri ve kayma dayanımları efektif gerilmelere büyük ölçüde bağlı olduğundan dolayı deneylerde önemli bir adımdır. Konsolidasyon sırasında numuneye hidrostatik basınç etki eder ve drenaj kanalları açılarak zemin çatlaklarındaki boşlukları dolduran suyun rahatça drene olması sağlanır. Yüksek geçirgenliğe sahip iri daneli zeminlerin konsolidasyonu çok fazla zaman gerektirmezken düşük geçirgenliğe sahip ince daneli zeminlerde bu süreç daha uzun olabilmektedir (Bardet, 1997).

CD deneylerinde drenaj kanalları açık olduğundan aşırı boşluk suyu basıncı sıfıra eşit olur. İnce daneli zeminlerde ise suyun drenaj kanallarından atılıp aşırı boşluk suyu basıncını giderebilmek için eksenel yükün çok yavaş bir şekilde uygulanması gerekmektedir. CU deneyleri eksenel basınç uygulanma esnasında drenaj kanallarının kapalı olması dışında CD

deneylerine benzerlik göstermektedir. Drenajın olmaması tamamen doygun numunelerde hacim değişimlerine yol açar ve aşırı boşluk suyu basıncı ortaya çıkar. CD ve CU deneylerinde yükleme hızı, numunede oluşan boşluk suyu basıncı üniform kalacak biçimde seçilmelidir. UU deneylerinde ise konsolidasyon devre dışı bırakılır ve numune efektif gerilme değeri bilinmeden kesilir fakat basınç aşaması CU deneyleri ile aynıdır (Bardet, 1997). Drenajlı durumlarda farklı hücre basınçlarında birkaç deney yaptıktan sonra bir çember serisi çizilebilir. Bu çemberlerin tanjantı bize Şekil 3.10'daki Mohr – Coulomb göçme doğrusunun tanımını verir. Drenajsız durumlarda ise her gerilme değişiminde aynı oranda boşluk suyu basıncı meydana gelir. Bundan dolayı efektif gerilmede bir değişim gözlenmez ve oluşturulan diyagramda Şekil 3.11'de görülebileceği gibi içsel sürtünme açısı sıfıra eşit olur (Wesley, 2009). CD ve CU deneyleri sonucunda efektif kohezyon ve efektif içsel sürtünme açıları olan c' ve ϕ' değerleri elde edilirken, UU deneylerinden drenajsız kayma dayanımı olan s_u elde edilir (Coduto, 2006).



Şekil 3.10. Drenajlı deneylerde Mohr – Coulomb göçme doğrusunun gösterimi (Wesley, 2009)



Şekil 3.11. Drenajsız deneylerde Mohr – Coulomb göçme doğrusunun gösterimi (Wesley, 2009)

İri daneli zeminlerde üç eksenli basınç deneylerinden yalnızca CD ve CU deneyleri uygulanabilmektedir. CD deneylerinde farklı sıkılık değerlerinde ve çevre basınçlarında kohezyon ve içsel sürtünme açıları bulunurken, CU deneylerinde drenajsız kayma dayanımları ölçülebilmektedir. UU deneyleri ise iri daneli zeminlere uygun bir deney yöntemi değildir. Öte yandan ince daneli zeminlerde üç tip deney yöntemi de yapılabilmektedir. Kumlarda CD deneyleri ile farklı sıkılıklarda ve çevre basınçlarında içsel sürtünme açıları elde edilirken, CU ve UU deneylerinde drenajsız kayma dayanımları bulunabilmektedir (Bardet, 1997).

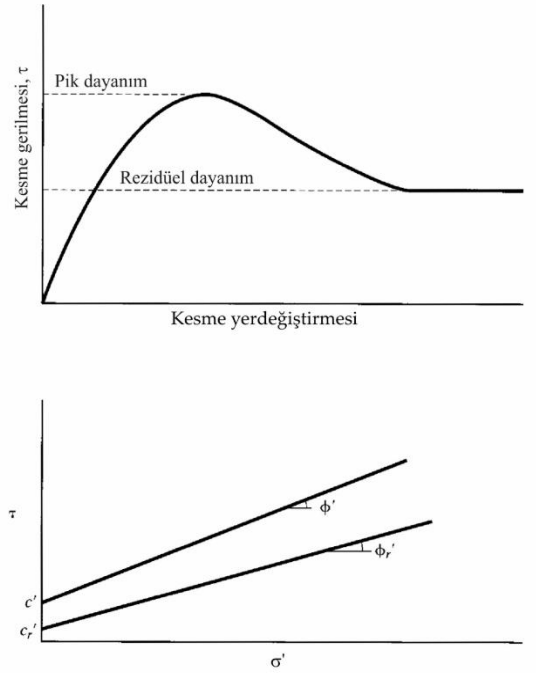
Üç eksenli basınç deneyleri, sağladığı avantajlar bakımından kayma dayanım deneyleri arasında en sık kullanılanlardan biridir. Tüm zemin tiplerine uygun olması, drenaj durumlarının kontrol edilebilir olması, düşük geçirgenlik oranına sahip doygun zeminlerin konsolide olmasına imkan tanıması ve eğer gerekirse boşluk suyu basıncının oluşturulabilir olması bu deney yönteminin avantajlarından birkaçıdır (Craig, 2004).

3.4. Kalıcı Kayma Dayanımı

Büyük deformasyonlar yada birim deformasyonlar sonucu erişilen, bir zeminin minimum kayma dayanımı kalıcı dayanım olarak adlandırılmaktadır (Holtz vd., 2015). Farklı kayma dayanım değerlerinin nerede kullanılacağı analiz edilen duruma göre değişir. Çoğu durumda karşılaşıldığı gibi önceden hareket meydana gelmemiş ve işlem sırasında geniş yer değiştirmelerin beklenmediği analizlerde pik kayma dayanım değerlerinin kullanılması uygundur. Bu tür durumlara temeller, rijit istinat duvarları, yeni veya stabil şevler örnek olarak verilebilir. Öte yandan çoktan göçmüş veya daha önceden zemin kayması yaşanmış bölgelerde bulunan şevler için analiz yapılırken kalıcı kayma dayanım değerleri kullanılmalıdır. Zeminlerin kritik düzlemlerinde kayma gerilmeleri, limit değerlerine ulaştıklarında göçme meydana gelir. Kesme uygulandıkça kesme düzlemindeki daneler birbirlerinin üzerinden yuvarlanmaya başlar. Sonuç olarak kesme kuvvetleri hem daneler arası direncin hem de bağ dirençlerinin üstesinden gelir. Bu bize pik dayanımı verir. Çoğu zeminde danelerin birbirlerinin üstünden yuvarlanması sonucu kesme düzleminde hacim artışı olacağından dolayı bu başlangıç hareketine dilatasyon da eşlik etmektedir (Carter ve

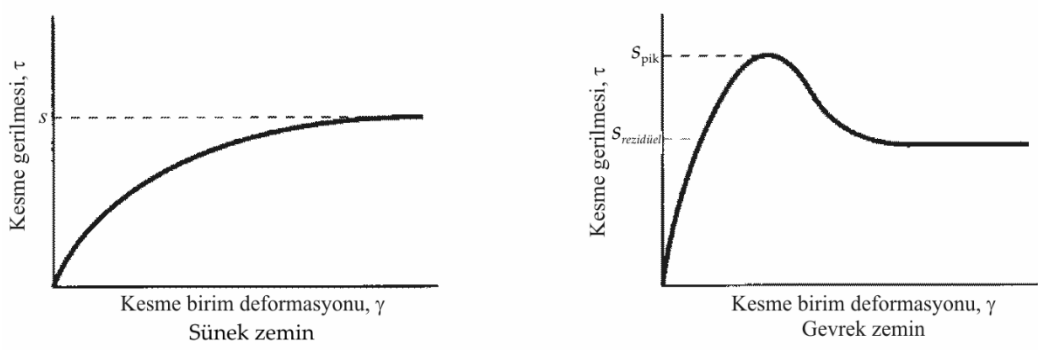
Bentley, 2016). Zeminde yassı kil danelerinin tekrardan düzene geçmesiyle göçme düzlemleri oluşur ve yassı danelerin bu hareketi sonucu göçme düzlemi düzlenerek zeminin düşük dayanımına ev sahipliği yapan kaygan yüzeyi oluşturur (Wesley, 2009). Yanal desteği olmayan numuneler kademeli bir şekilde eksenel yer değiştirmeleri artacak biçimde sıkıştırılırlar. Eksenel yük arttığında, eksenel gerilme ilk olarak artar ve maksimum bir değere kadar yükselir. Sonrasında ise düşerek kalıcı bir değere gelir. Oluşan bu gerilme – deformasyon eğrisinde pik ve kalıcı dayanım olmak üzere iki farklı parametre belirlenebilir. Pik dayanım eğride görülen en yüksek kuvvete denk gelirken, kalıcı dayanım gerilme doğrusunda uzunca bir süre aynı düzlemde seyreden kuvvete eş değerdir (Bardet, 1997).

Normal konsolide killerde genellikle çok ufak bir dilatasyon ve pik olur, bu yüzden sabit değer ve kalıcı kayma dayanımı bu değerlere benzer bir değer alabilir. Fakat çakıllı, kumlu ve aşırı konsolide killerde kuvvetler arası gözle görülür bir fark ortaya çıkar (Carter ve Bentley, 2016). Özellikle fisürlü katı killer aşırı konsolide olmaya daha meyillidir ve fisürler arasında bir süreksizlik vardır. Bu fisürlerin varlığının, kil kütlesinin dayanımını etkilediği ve bu tür şevlerin kademeli olarak göçtüğü, bunun sonucunda pik dayanımda düşüş görülerek kalıcı dayanıma ulaştıkları göz önüne serilmiştir (Wesley, 2009). Aşırı konsolide killer kalıcı dayanım göçme kayıplarına fazlaca duyarlıdır. Çünkü bu zeminler genleşme ve su artışı ile bağlantılı olarak pik kayma dayanımından sonra oluşacak ek deformasyonlara önemli ölçüde yumuşama eğilimindedir (Holtz vd., 2015). Çoğu kilde pik dayanıma ulaştıktan sonra artan deformasyonla birlikte kayma dayanımında bir düşüş görülür (Craig, 2004). Aşırı konsolide killerin yanı sıra normal konsolide killerde de kesme esnasında yapılan konsolidasyonlar sonucu zemin yapısının göçmesi ve killerin yeniden düzenlenmesinden dolayı pik sonrası bir dayanım düşüşü gözlenebilir (Mitchell ve Soga, 2005). Fakat normal konsolide killerde kalıcı dayanım değerlerinin pik dayanıma yakın olduğu bazı durumlarda daha az yumuşama eğilimi görülür (Holtz vd., 2015). Çoğu normal konsolide killer biraz sünektir ve Şekil 3.12‘de görülebileceği üzere killerin kalıcı dayanımları pik dayanımlarından daha düşüktür. Özellikle nazik dokulu hassas killerin kalıcı dayanımları pik dayanımlarından çok daha fazla az olabilir (Coduto, 2006).



Şekil 3.12. Killerin gerilme – deformasyon eğrisinde ve göçme zarfında pik ve kalıcı parametrelerin gösterilmesi (Coduto, 2006)

Kumlu bir zeminin sabit bir efektif gerilme ve sabit boşluk oranında sürekli deforme olmasına kumların kararlı durum davranışı denir. Bundan yola çıkarak kararlı durumda kayma dayanımı ve kumlar için kalıcı dayanım esasında aynı şeydir (Holtz vd., 2015). Kumlar ve killer arasında kesme esnasında davranış farklılıkları vardır. Kesme sırasında kum daneleri daha az sıkı bir duruma geçiş yaptıklarından dolayı sıkılık derecesi değiştikçe dayanımda düşüş görülmektedir. Tabi bu durum aşırı gevşek kumlar için geçerli değildir. Ayrıca kil daneleri kayarak bir göçme yüzeyi oluştururken kumlar daneler üzerinden yuvarlanarak bir göçme yüzeyi oluştururlar (Wesley, 2009). Çakıl ve kumların gerilme – deformasyon eğrileri Şekil 3.13'te görülebileceği gibi sünek veya sadece biraz gevrektir. Bu sebeple pik ve kalıcı dayanım arasındaki fark küçük ve ihmal edilebilirdir. Fakat bazı killerin eğrileri gevrek tipte olduğundan dolayı bu grafiklerde pik ve kalıcı dayanım arasındaki fark çok önemlidir (Coduto, 2006).

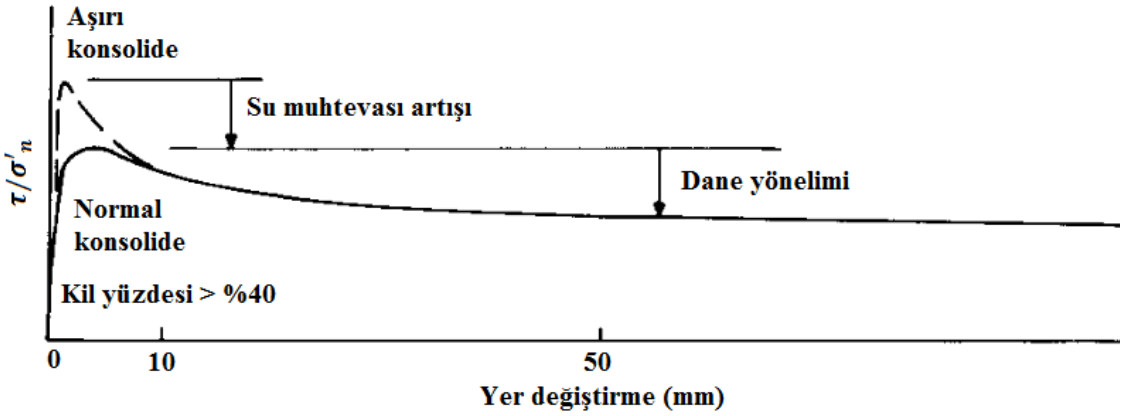


Şekil 3.13. İri daneli zeminlerde gerilme – deformasyon eğrileri (Coduto, 2006)

Yapılan deneyler sonucu kalıcı duruma getirilen zeminlerin kalıcı içsel sürtünme açıları bulunabilir. Bulunan bu değer mineralojiye, zeminin derecelenme durumuna, iri dane karakteristiklerine ve kesme hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ayrıca kesme düzleminde efektif gerilmenin de etkili olduğu drenajsız deneylerde, kalıcı durum başlangıç veya pik gerilmelerden farklılık gösterebilir. Düşük kil içeren zeminlerde drenajlı durumlarda danelerin yeniden yerleşmesinden kaynaklı olarak pik ve kalıcı dayanımlar arasındaki fark az olmaktadır (Mitchell ve Soga, 2005).

3.5. Kalıcı Kayma Dayanımının Çalışma Prensibi

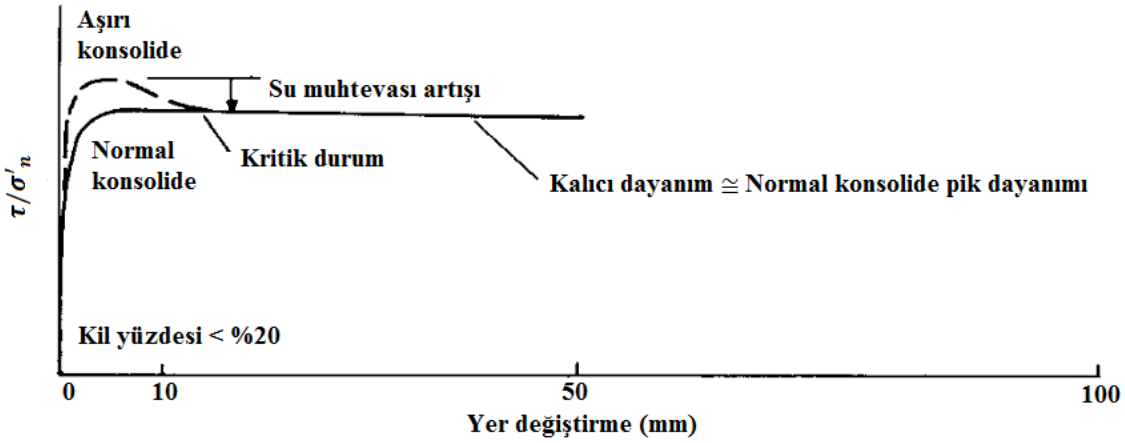
Kil yüzdesi %40'dan yüksek olan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucu kalıcı kayma dayanımının nasıl ortaya çıktığına dair bir takım bulgular elde edilmiştir. Yapılmış olan çalışmada Şekil 3.14'de görülebileceği üzere normal konsolide zeminler yer değiştirme arttıkça direkt kalıcı dayanıma ulaşırken, aşırı konsolide zeminler önce bir pik değer verip sonra kalıcı dayanıma ulaşmaktadır.



Şekil 3.14. Yüksek kil içerikli zeminlerin gerilme – yer değiştirme diyagramı (Skempton, 1985)

Aşırı konsolide killerde pik değer sonrası dayanım düşmesinin sebebi ilk olarak su muhtevasının artışı ile açıklanabilir. İkinci olarak ise kil danelerinin kesme yüzeyine paralel olarak yeniden yönelimi, zeminin kalıcı kayma dayanımına ulaşılmasını sağlayan bir diğer etkendir. Anlaşılabileceği gibi su muhtevası artışının, kil içeriği yüksek aşırı konsolide killerde kalıcı dayanım değerleri üzerine etkisi büyüktür (Bkz. Şekil 3.14). Özellikle %50 ve üzeri kil yüzdesi içeren zeminlerde, dayanım neredeyse sadece kil danelerinin kayma sürtünmelerinden ortaya çıkacağı için bu tür zeminlerde mineralojiye bağlı olarak kil danelerinin karakterleri ön plana çıkmaktadır. Su muhtevasının artışı yassı kil minerallerinin yönelimini kolaylaştıracağı için ilk aşamada dayanım değerinde bir düşüş olur. Yer değiştirme arttıkça kil mineralleri, kesme yüzeyine olan yönelimlerini bitirmiş olacağından dolayı kayma gerilmesi sabit bir değer alarak kalıcı dayanıma ulaşmaktadır (Skempton, 1985).

Kil yüzdesi %20'den daha düşük olan zeminlerde, dayanım büyük çoğunlukla silt ve kum daneleri tarafından sağlanacağı için kil minerallerinin kalıcı dayanıma olan etkisi çok düşüktür. Bu durum Şekil 3.15'te görülebilir.



Şekil 3.15. Düşük kil içerikli zeminlerin gerilme – yer değiştirme diyagramı (Skempton, 1985)

Yüksek yer değiştirmelerde dane yönelimi sona erdiğinde dayanım düşmeye başlar ve dayanım kalıcı değerde sabit bir şekilde seyreder. Düşük kil içerikli zeminlerde kalıcı dayanıma ulaşırken, yassı yüzeyli kil minerallerinin birbirleri üzerinden kayarak yeniden dağılım gerçekleştirmesi ve kalıcı dayanıma katkı sağlamaları fazla mümkün değildir. Bu tür zeminlerde, aşırı konsolide killerde su muhtevasının artması kil minerallerinin birbiri üzerinde kayarak dayanımı bir miktar düşürmesine sebebiyet verse de kalıcı dayanıma daha çok silt ve kum daneleri etki etmektedir. Normal konsolide killerde ise aşırı konsolide killerdeki gibi gözle görülebilir bir pik değer oluşmamaktadır. Bu sebeple kil içeriği düşük olan normal konsolide zeminlerde pik dayanım ile kalıcı dayanım arasındaki fark çok küçük çıkmaktadır (Skempton, 1985).

3.6. Kalıcı Kayma Dayanımının Önemi

Kayma dayanımı değerlendirmeleri çok geniş bir aralıkta değişen sebeplerden dolayı bazı hatalar içerebilir. Bu yüzden laboratuvar veya arazi deneylerinden elde edilen sonuçlara çok fazla güvenmemek gerekir. Çünkü çok dikkatli yapılan laboratuvar deneyleri bile zemin numunesinin kendisinden daha iyi olmamaktadır. Kullanılan deney ekipmanlarının numuneleri arazide meydana geldiği şekilde aynı biçimde kesememesi ve doygun olmayan numunelerin arazideki su değişimini doğru yansıtamayacağından dolayı kayma dayanımı değerlendirmeleri belli bir hata payı içerebilir (Coduto, 2006).

Skempton (1964) fisürlü katı killerde şev kaymalarının uzun süreli stabilite analizleri sonucu killerde kalıcı dayanım tanımını öne sürmüştür. Bu killerdeki kaymalar çok büyük yer değiştirmeler sonucu, hatta bazı durumlarda on yıllar alabilecek bir süreç sonrasında gözlenmiştir. Fisürlü katı killer genellikle aşırı konsolide killerdir ve rastgele süreksizlikler içerir. Bu fisürlerin varlığı kil kitlesinin dayanımını etkiler ve şevlerdeki göçmeler var olan fisürlerde oluşur. Bu durum pik dayanımda bir düşüşe neden olur ve kalıcı dayanım olarak tanımlanan bir değere ulaşır (Wesley, 2009). Bu durum göz önüne alındığında zeminde bulunan her bir nokta kendi pik dayanımına farklı zamanlarda ulaşacaktır. Zemindeki tek bir nokta bile kendi pik dayanımından daha büyük bir değerde gerilmeye maruz kalırsa bu nokta göçer ve dayanımı azalmaya başlar. Bu noktada bulunan fazla gerilme diğer noktalara aktarılarak tüm noktaların dayanımı düşmeye başlar. Eğer şev kaymıyorsa ve stabilitesini koruyabiliyorsa kayma yüzeyinde bulunan tüm noktalardaki dayanım kalıcı değere düşene kadar bu durum devam eder. Bu sebepten dolayı zeminin kayma dayanımı başlangıç değerine kıyasla daha düşük olur (Koltuk, 2005).

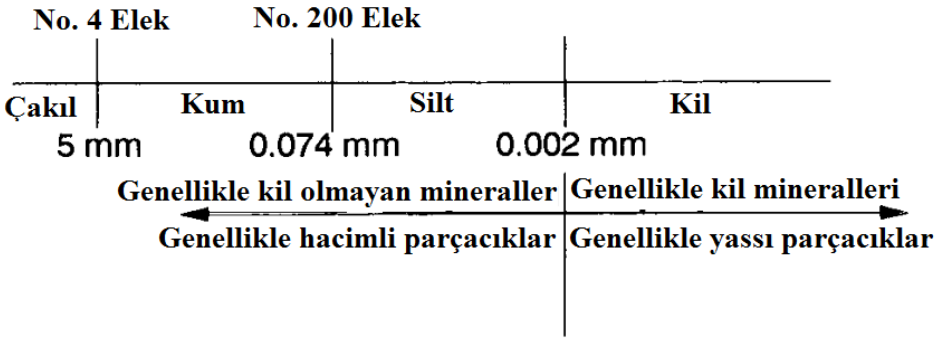
Skempton (1985) yaptığı deneyler sonucu önceden yüksek deformasyonlar oluşmuş kayma yüzeyleri bulunan şevlerdeki dayanımın kalıcı dayanım değerine eşit olduğunu, ilk defa göçen fisürsüz kil şevlerde göçme anındaki kayma dayanımının pik değere denk geldiğini ve fisürlü kil zeminlerde oluşan şevlerin pik ile kalıcı kayma dayanımının arasında bir değerde göçtüğünü belirtmiştir ve bu dayanım değerinin yoğrulmuş normal konsolide kilin pik dayayanımı olarak kullanılabileceğini önermiştir (Koltuk, 2005). Sonuç olarak ilk defa kaymaya maruz kalacak zeminlerin ve daha önceden kesmeye maruz kalmamış kil ve kil yamaçlarının genellikle kalıcı dayanım değeri ile pek bir ilgisi yoktur. Fakat daha önceden kaymış veya soliflüksiyon hareketine uğramış, katmanlı zeminlerde zemin yatağı kesmeye maruz kalmış, kayma yüzeyinde göçme meydana gelmiş bir kilin dayanımı kalıcı dayanıma yakın veya eşit olur. Bu sebeple daha önceden kesmeye maruz kalmış bir kayma yüzeyi ele alındığında kalıcı dayanımının bilinmesi mühendislik tasarımı yapılırken, uygulamayı büyük ölçüde etkilemektedir (Skempton, 1985).

3.7. Kalıcı Kayma Dayanımını Etkileyen Unsurlar

Zeminlerde kalıcı kayma dayanımını bulurken dayanımı etkileyen birçok farklı unsur vardır. Deneylerin yapılış aşamalarında birçok detay doğru dayanım sonucunu vermede etkiliyken, uygulamadan bağımsız olarak malzeme ve deney planının da bu konuda önemi büyüktür. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında en önemli faktörlerin mineraloji, efektif gerilme ve kesme hızı olduğu söylenebilir.

3.7.1. Mineralojinin etkisi

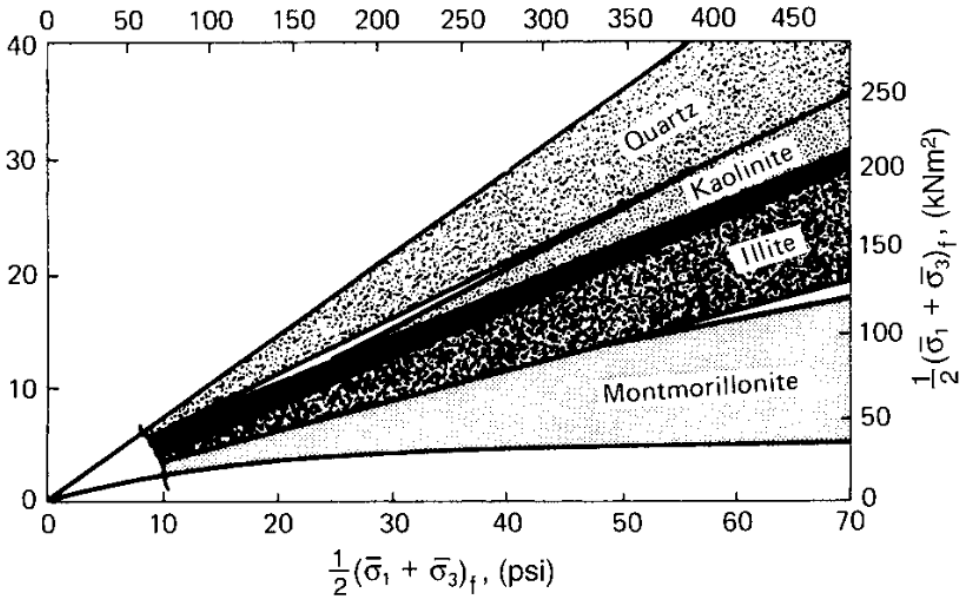
Zeminler katı parçacıklar, sıvılar ve gazların bir karışımıdır. Katı parçacıkların büyüklüğü gözle görülebilir danelerden, yalnızca mikroskop altında görülebilen danelere kadar değişken bir aralıkta olabilir. Parçacıkların şekilleri neredeyse küresel, iri, ufak, düz ve uzun olmak üzere farklı özellikler gösterebilir. Dane boyutlarını, şekillerini ve zemin parçacıklarının özelliklerini kontrol ederken birincil faktör mineralojidir. Kil hem boyut olarak, hem de mineral sınıfı olarak adlandırılabilir. Boyut olarak 0,002 mm ve altındaki küçük zemin partiküllerine kil denir. Mineralojik olarak bakıldığında ise küçük partikül boyutlarında olan, net negatif elektrik yükü bulunduran, su ile karıştırıldığında plastik özellik gösteren ve yüksek ayrışma direnci gösteren belirli kil mineralleri bu gruba dahil olur. Tüm kil mineralleri 0,002 mm'den küçük olmadığı gibi, tüm kil olmayan partiküller ise 0,002 mm'den büyük değildir. Buna rağmen zeminin içindeki kil minerallerinin genel olarak 0,002 mm'den ince malzemelerin toplamı olduğu kabulü yapılır. Şekil 3.16'da zemin içinde bulunan danelerin boyut sınıflandırması görülmektedir. (Mitchell ve Soga, 2005). Zeminin her alanını etkileyen mineraloji, kayma dayanımının belirlenmesinde de büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.16. Zemin içindeki danelerin boyut ölçeği (Mitchell ve Soga, 2005)

Kil minerallerinin ve kil olmayan minerallerin arasındaki en önemli farklılık, kil olmayan mineraller daha hacimli ve yuvarlak iken kil mineralleri daha yassı ve kimi durumlarda iğnemsi bir şekilde bulunurlar (Mitchell ve Soga, 2005). Parçacıkların şekilleri de kesme esnasında kayma yüzeyinin oluşumuyla doğrudan ilgilidir. Eğer kesmeye maruz bırakılan zemin çoğunlukla yassı daneler barındırıyorsa, bu daneler göçme düzlemine paralel bir şekilde dizilim gösterirler ve dayanımın düşmesiyle kalıcı değere ulaşır. Fakat yassı daneler parçacıklar arası yüksek sürtünme gösterirse bahsedilen dizilim durumu oluşmayabilir. Bu tür durumlarda veya zeminin yüksek oranda iri dane bulundurduğu durumlarda kalıcı dayanıma danelerin birbiri üzerinden yuvarlanıp yer değiştirmesiyle ulaşılır (Craig, 2004). Kil içeriği arttıkça kalıcı içsel sürtünme açısı düşer. Bunun sebebi zeminde kilin artmasıyla silt ve kum danelerinin yer değiştirme katkılarının azalması ve kil minerallerinin düşük olan içsel sürtünme açılarının baskınlaşmasıdır (Mitchell ve Soga, 2005).

Şekil 3.17'de gösterilmiş olan çalışmada minerallerin kayma dayanımlarına olan etkisi görülebilir. Efektif gerilme göçme zarflarını kapsayan alanlarda pik dayanım esas alınarak saf kil mineralleri ve kuvars ele alınmıştır. Efektif gerilmenin artmasıyla kayma gerilmesinin de arttığı örnekte, kil olmayan kuvars mineralinin içsel sürtünme açısı en büyük çıkmıştır. İçsel sürtünme açı değeri düşecek biçimde sıralanırsa kaolinit, illit ve montmorillonit, kuvarsı takip etmiştir. Kullanılmış olan minerallerin göçme doğrularının değişimlerinin nedeni yapıları, katyon emilimleri, pH ve aşırı konsolidasyon oranları gibi faktörlere bağlanabilir (Mitchell ve Soga, 2005).



Şekil 3.17. Minerallerin efektif gerilme göçme doğrularındaki değişimi (Mitchell ve Soga, 2005)

Kil minerallerinde ölçülen en yüksek içsel sürtünme açıları, kohezyonsuz zeminlerin kalıcı değerlerinin önemli ölçüde altında kalmaktadır (Mitchell ve Soga, 2005). Kaolin ve çamur taşı ele alındığında yüksek aktiviteye sahip kil minerallerinde zeminin kalıcı dayanımının kesme yer değiştirme hızı arttıkça gözle görülür bir biçimde arttığı, kalıcı dayanımın büyük ölçüde killer arası sürtünmeden ve plastisite indisinden etkilendiği görülmüştür (Suzuki vd., 2002). Ayrıca kaolin içerikli zeminlerin, montmorillonit içerikli zeminlere göre kalıcı kayma dayanımlarında daha yüksek düşüş oranları gösterdiği saptanmıştır (Tiwari vd., 2020).

3.7.2. Efektif normal gerilmenin etkisi

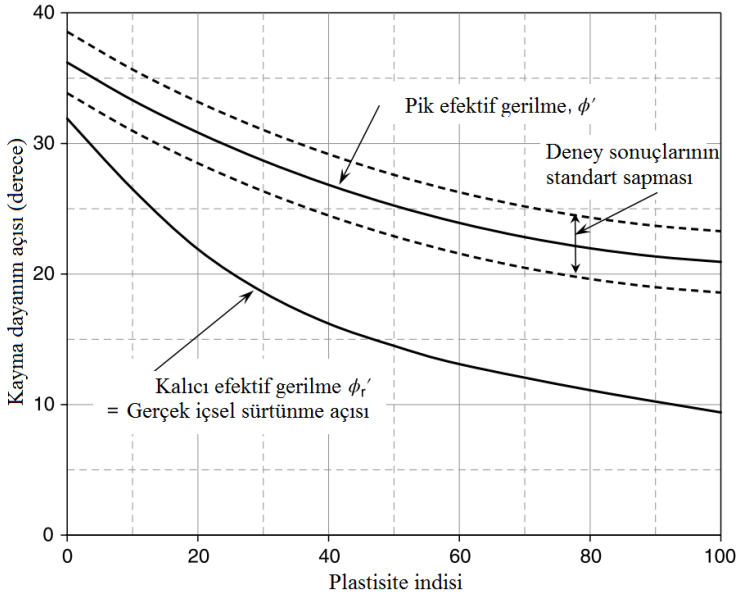
Zemin iskeletindeki daneler arası kuvvet iletiminin önemi 1923 yılında Terzaghi tarafından tanımlanmıştır ve efektif gerilme ilkesi olarak adlandırılmıştır. Bu ilke yalnızca tamamen doygun zeminlerde söz konusu olmakta ve üç farklı gerilme ile ilişkisi açıklanmaktadır. Toplam normal gerilme, zemin kütlesinde herhangi bir düzlemde birim alana etki eden kuvvetin düzlem boyunca aktarılmasıdır. Boşluk suyu basıncı, dane

partiküllerinin arasındaki boşlukları dolduran suyun oluşturduğu basınçtır. Efektif normal gerilme ise düzlemde yalnızca zemin iskeleti üzerinde iletilen gerilme türüdür (Craig, 2004). Toplam normal gerilmeden boşluk suyu basıncı çıkarılınca efektif normal gerilmenin elde edildiği bilindiğine göre bu durum Denklem 3.7'de görülen ilişkideki gibi gösterilebilir;

$$\sigma' = \sigma - u \tag{3.7}$$

Temeller, oturdukları zemine kayma gerilmeleri ve basınç gerilmeleri olarak etki eder. Kayma gerilmeleri zemin iskeleti tarafından taşınmalıdır fakat doygun zeminlerde basınç gerilmeleri, başlangıçta çoğunlukla boşluk suyu basıncının yükselmesi sonucu taşınır. Bu durum efektif gerilmeyi biraz değiştirir ve temel yüklemesinin, kayma dayanımının yükselmesine sebebiyet vermediği anlamına gelir. Aşırı boşluk suyu basıncı yayıldıkça zemin konsolide olur ve efektif gerilmenin düşmesine, bunun sonucunda kayma dayanımının yükselmesine yol açar (Carter ve Bentley, 2016).

Stabilite hesaplamalarını efektif gerilme açısından incelemek önemlidir. Bu duruma özellikle şev stabilite hesaplamalarında çok daha dikkat edilmelidir. Bu hesaplamalarda, kesme kutusundan, üç eksenli deneylerden veya konsolidasyonlu – drenajsız üç eksenli deneylerden elde edilen zemin dayanım parametreleri kullanılır. Yapılmış olan bir araştırma Şekil 3.18'de gösterilmiştir ve örselenmiş killer üzerinde, drenajlı kayma dayanımı – plastisite indisi ve kalıcı kayma dayanımı – plastisite indisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Plastisite indisi ve kayma dayanımı zeminin kil mineral içeriğini yansıttığından dolayı, bahsi geçen ilişkilerin varlığı yükselmiştir. Kil mineral içeriği arttıkça plastisite indisi yükselmiş ve kayma dayanımı düşmüştür. Efektif gerilme açısından killerin dayanımı sürtünmeye bağlı olduğundan kohezyon gözlenmemektedir. Bu durumdan örselenmiş doygun killerde söz edilebilir fakat kısmi doygun zeminlerde menisküs etkisi daneleri bir araya toplayacağından dolayı daneler arası gerilme oluşur ve çok küçük kohezyon değerleri görülebilir (Carter ve Bentley, 2016).



Şekil 3.18. Kayma dayanımının efektif açısı ve plastisite indisi arasındaki bağıntı (Carter ve Bentley, 2016)

İnce daneli zeminlerde efektif kohezyon ve efektif içsel sürtünme açısı değerleri için net bir şey söylemek mümkün değildir fakat çeşitli zeminlerde, beklenen muhtemel değerler ön görülebilir. Örneğin zemin ne kadar sertse, efektif kohezyon değeri bir o kadar yüksek olur. Bir diğer kayma dayanım parametresi olan efektif içsel sürtünme açısı, düşük plastisiteli silt ve killerde en yüksek değerini alır ve plastisite arttıkça düşmeye başlar (Wesley, 2009).

3.7.3. Kesme hızının etkisi

Sahada bulunan ilk defa kaymaya maruz kalacak zeminlerden daha önce kayma yüzeyleri var olan zeminlere kadar tüm stabilite problemlerinde kayma hızı çok büyük önem arz etmektedir. Zeminler heyelan oluşması durumunda yavaş kayma hızlarında kesilebilir veya deprem anında çok yüksek hızlarda kaymaya maruz kalabilir. Kayma hızının önceden tahmin edilebilmesi, oluşabilecek stabilite problemlerinin önüne geçilip, bu problemlerin sağlıklı bir şekilde çözümlenebilmesi için geoteknik mühendisliğinde çok önemlidir.

Yüksek plastisiteli zeminlerde kalıcı kayma dayanımı bulunurken düşük kesme hızlarının etkisi daha büyüktür ve pik dayanım ile kalıcı dayanım değerleri arasındaki fark daha büyük olmaktadır (Bhat vd., 2014). Yüksek kesme hızlarının ise kalıcı dayanıma ulaşmak için daha yüksek yer değiştirmelere ihtiyaç duyduğu, kesme hızı yükseldikçe sürtünme dayanımının ve kayma dayanımının düştüğü sonucuna ulaşılmıştır (Tiwari vd., 2011). Kesme hızı arttıkça yüksek boşluk suyu basınçları oluştuğundan dolayı zeminlerin kalıcı kayma dayanımları düşmektedir (Tiwari vd., 2020). Boşluk suyu basıncının oluşumu kimi durumlarda kesme hızından bağımsız olduğu için dolaylı olarak efektif normal gerilmede kesme hızından bağımsız olmaktadır. Ölçülmüş olan kalıcı kayma dayanımlarının, aynı kesme hızı aşamaları arasında farklı olduğu belirtilmiştir. İllit ve bentonit karışımlı numunelerde efektif kalıcı içsel sürtünme açısının kesme hızından etkilendiği, ayrıca tüm kesme hızlarında efektif kalıcı içsel sürtünme açılarının sabit bir değer aldığı gözlenmiştir (Saito vd., 2006).

Kaolin söz konusu olduğunda kesme yer değiştirme hızı arttıkça, pik kesme dayanımının normal gerilmeye olan oranı, 0,025 rad/dak hızının üstüne çıkıldığında düşmektedir. 0,0005 – 0,025 rad/dak hızları arasında ise sabit bir değer almaktadır. Çamur taşı ele alındığında ise 0,005 rad/dak hızının üstüne çıkıldığında pik kesme dayanımının normal gerilmeye olan oranı, kesme yer değiştirme hızı arttıkça düşmektedir. Bu durum kayma yüzeyine yakın olan yerlerde aşırı boşluk suyu basıncının oluşmasıyla açıklanmaktadır (Suzuki vd., 2002).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

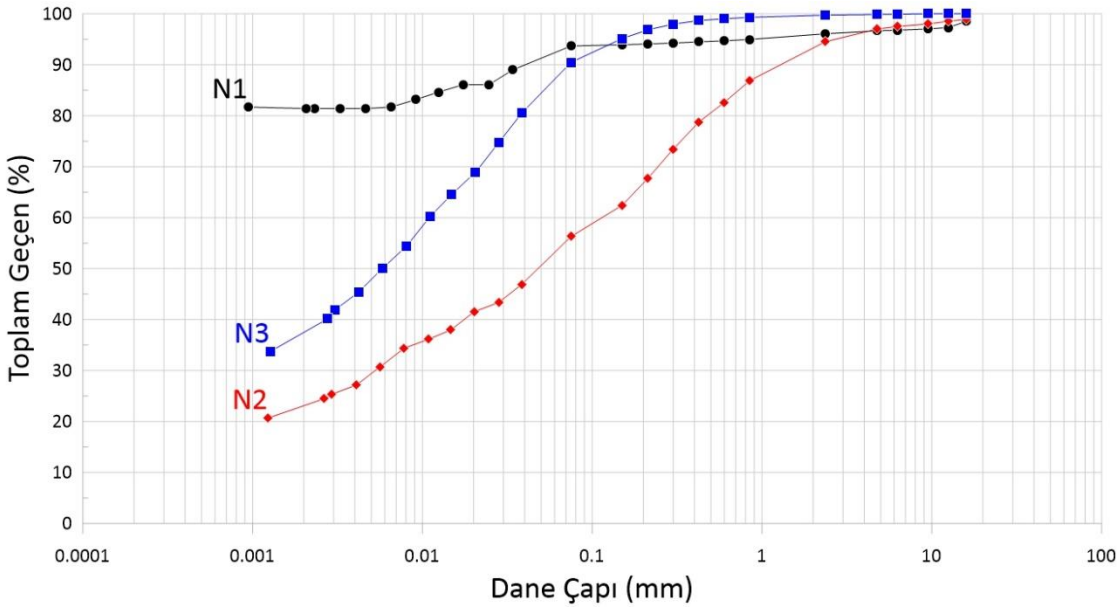
Bu çalışmada İstanbul, Çanakkale ve Eskişehir illerinden alınan kil içerikli üç adet numune üzerinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri yapılmıştır. Numuneler sırasıyla İstanbul, Çanakkale ve Eskişehir numuneleri olmak üzere N1, N2 ve N3 olarak adlandırılmıştır. Çalışma kapsamında tüm numunelerin karakteristik özelliklerini belirlemek adına tanımlama deneyleri yapılmıştır. Örselenmiş olan numunelerden N1, düşük normal gerilmelerde şişme özelliği gösterdiğinden dolayı, şişme hesabını göz ardı edebilmek adına 200 kPa, 250 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edilirken, N2 ile N3 numuneleri 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyonlarını tamamlayan örselenmiş numuneler tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde 0,02 mm/dak, 0,1 mm/dak ve 1 mm/dak hızlarında, halka kesme deneylerinde ise aynı hızların halka kesme makinesine adapte edilmiş halleri olan 0,027 der/dak, 0,135 der/dak ve 1,35 der/dak hızlarında kesilmiştir. Gerçekleştirilmiş olan deney serileri plastik limit su muhtevaları, optimum su muhtevaları ve optimum+3 su muhtevaları esas alınacak şekilde, yüksek ve düşük olmak üzere iki ayrı su muhtevasında ele alınmıştır. N1 ve N3 numunelerinde plastik su muhtevaları ve optimum+3 su muhtevaları kullanılırken, N2 numunesinde optimum+3 su muhtevası plastik limit su muhtevasına denk geldiğinden dolayı plastik limit su muhtevası ve optimum su muhtevası kullanılmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere seçilen bu muhtevalardan, her numune kendi içinde değerlendirilecek biçimde yüksek ve düşük su muhtevaları belirlenmiştir ve başlangıç su muhtevaları olarak ele alınmıştır.

Genel olarak bu çalışmada numune özelliklerinin, kesme hızının, başlangıç su muhtevasının ve makineler arası çalışma prensibi farklılıklarının kalıcı kayma dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

4.1. Materyal

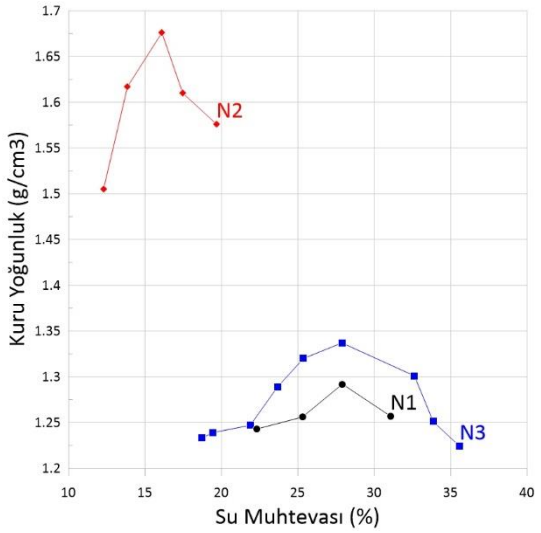
Üç farklı şehirden alınan kil içerikli ve örselenmiş N1, N2 ve N3 numuneleri üzerinde tanımlama deneyleri yapılmıştır. Numunelerin geoteknik özelliklerini belirleyebilmek adına yapılan tanımlama deneyleri kapsamı içerisinde ıslak elek analizi, hidrometre analizi, özgül ağırlık deneyleri, kıvam limitleri deneyleri ve kompaksiyon deneyleri bulunmaktadır. Yapılmış olan deneyler sonucu numunelerin geoteknik özellikleri bulunmuştur ve numuneler birleştirilmiş zemin sınıflandırması sistemine göre gruplandırılmıştır.

Islak elek ve hidrometre analizlerinde numuneler 0,075 mm açıklıklı 200 no'lu elekte yıkanarak ince danelerinden ayrıştırılmıştır. Elek üzerinde kalan numuneler elek analizinde kullanılırken, elek altında kalan ince daneler hidrometre deneylerinde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Elek analizinde numuneler, farklı açıklıklı birçok elekten elenerek iri dane dağılımı belirlenmiştir. İnce dane dağılımını görebilmek adına ise 151H tipi zemin hidrometresi kullanılmıştır ve 24 saat içerisinde okunan veriler sonucu zeminlerin dane boyu dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen bu grafik Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Numunelerin dane boyu dağılım grafikleri

Ayrıca numunelere kıvam limitleri, özgül ağırlık deneyleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Bunların sonucunda likit limit, plastik limit, plastisite indisi, özgül ağırlık ve maksimum kuru yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Yapılmış olan deneyler neticesinde tüm numuneler birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi ile uygun olacak şekilde isimlendirilmiştir. Kompaksiyon eğrileri Şekil 4.2'de verilmiştir ve elde edilen bu veriler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Numunelerin kompaksiyon eğrileri

Çizelge 4.1. Numunelerin tanımlama deney sonuçları

Numune Adı	Likit Limit (w_{LL})	Plastik Limit (w_{PL})	Plastisite İndisi (I_P)	Dane Özgül Ağırlığı (γ_S)	Optimum Su Muhtevası (W_{opt})	Kil Yüzdesi (K.Y.)	Zemin Sınıfı
N1 - İstanbul	84.78	36.22	48.56	2.78	27.91	81.00	CH
N2 - Çanakkale	36.65	19.37	17.28	2.67	16.10	23.00	CL (Kumlu)
N3 - Eskişehir	52.61	26.41	26.20	2.65	27.88	37.00	CH

Deneyler sonucu bulunan su muhtevalarında, numunelerde kullanılacak olan iki farklı su muhtevasının seçimleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Elde edilen su muhtevalarından yüksek ve düşük su muhtevaları olarak ayrılan iki farklı değer, tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde ve halka kesme deneylerinde kullanılmıştır. Kullanılacak olan su muhtevaları başlangıç su muhtevaları olup, kesme esnasında tüm numuneler suya doygun hale getirilecek şekilde su haznesi tamamen su ile doldurulmuştur ve konsolidasyon aşamaları bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneylerde kullanılan su muhtevaları

Numune adı	Plastik Limit (w_P)	Optimum Su Muhtevası (W_{opt})	Optimum+3 Su Muhtevası ($W_{opt}+3$)	Yüksek Alınan Su Muhtevası (w)	Düşük Alınan Su Muhtevası (w)
N1 - İstanbul	36.22	27.91	30.91	36.22	30.91
N2 - Çanakkale	19.37	16.10	19.10	19.37	16.10
N3 - Eskişehir	26.41	27.88	30.88	30.88	26.41

4.2. Yöntem

Kalıcı kayma dayanımı bulunurken, aynı numune üzerinde farklı makinelerde gerçekleştirilen deneylerde farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Yapılan bu çalışmanın amaçlarından biriside bu farklılığın araştırılması olduğundan dolayı, diğer tüm değişkenler aynı kalacak şekilde deneyler iki farklı makine üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kalıcı kayma dayanımı bulunurken en çok tercih edilen makinelerden birisi olan tekrarlı direkt kesme kutusu deney aleti ile kalıcı kayma dayanımı bulunurken en güvenilir makinelerden birisi olan halka kesme deney aleti bu çalışmada kullanılmıştır.

4.2.1. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi

Zeminlerin kayma dayanımının bulunmasında kullanılan en eski yöntemlerden birisi tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleridir. Bu çalışmada Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan ve Şekil 4.3'te gösterilen ELE International marka dijital kesme kutusu makinesi kullanılmıştır. Numune hazırlanıp makineye yerleştirildikten sonra DS7 programı ile gerekli parametreler sisteme girilmiştir ve deneyler tamamlanmıştır. N1 numunesi 200 kPa, 250 kPa ve 300 kPa, N2 ve N3 numuneleri ise 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyon işlemi bittikten sonra tüm numuneler 0,02 mm/dak, 0,1 mm/dak ve 1 mm/dak hızlarında kesilerek kesme hızının kalıcı kayma dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneyler çift tekrar olacak biçimde makine geriye alınıp tekrar kesilerek kalıcı kayma dayanım değerine ulaşıldığı varsayılmıştır. Yapılan deneyler sonucu pik ve kalıcı kayma dayanımları bulunarak numunelerin göçme zarfları elde edilmiştir.



Şekil 4.3. ELE International marka kesme kutusu deney aleti

4.2.1.1. Numunelerin hazırlanması

Etüvde kurutulan numuneler 0,475 mm açıklıklı 40 no'lu elekten elendikten sonra çalışılacak olan başlangıç su muhtevasına getirilmiştir. Denklem 4.1'de verilmiş olan $m_{ıslak}$ formülünden, 20 mm yüksekliğindeki ve 63 mm çapındaki kesme kutusu numune haznesine ne kadar numune gireceği hesaplanmıştır.

$$m_{ıslak} = \delta_s * (1 + w) * V \tag{4.1}$$

Bulunmuş olan numune ağırlığı kadar numune alındıktan sonra, Şekil 4.4'te gösterilen kesme kutusu numune sıkıştırma kalıbında numuneler uygun boyutlarda sıkıştırılmışlardır. Bu işlem yapılırken numunenin kalıba yapışıp şekil bozuklukları oluşumunun önüne geçmek için kalıp çok ince bir şekilde yağlanmıştır ve numunenin homojen olarak dağılmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4.4. Kesme kutusu numune sıkıştırma kalıbı

Numuneler kalıptan dikkatli bir biçimde çıkartıldıktan sonra tekrar tartılıp, olması gerektiği ağırlık değeri ile karşılaştırılmıştır ve herhangi bir yüzey deformasyonunun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Numunelerin mevcut su muhtevalarını kaybetmemeleri için, numuneler sıkıştırıldıktan sonra dikkatli bir şekilde su geçirmez malzeme ile sarılıp, desikatörlerde bekletilmişlerdir. Şekil 4.5'te gösterilen deneye uygun numuneler kesme aşamasında kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Kesme kutusu deney numunesi

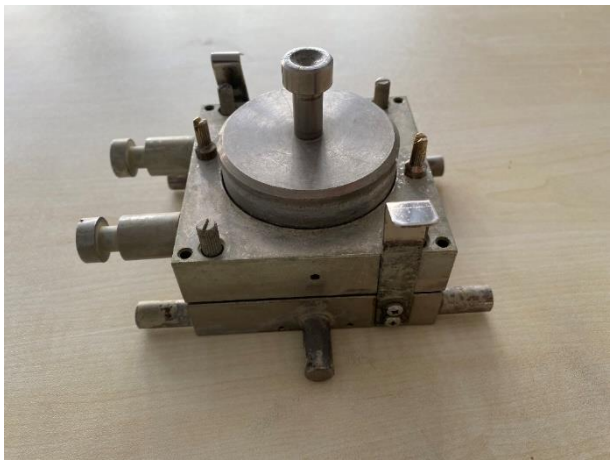
4.2.1.2. Deney aletinin hazırlanması ve deney aşaması

Deneye başlamadan önce ilk olarak numuneler kesme kutusu numune haznesine yerleştirilir. Şekil 4.6'da gösterilmiş olan haznenin öncelikle kesme yüzeyini oluşturan dört adet vidası gevşetilir. Bunun sebebi haznenin alt ve üst başlıkları arasında boşluk kalmamasını sağlamak ve kesme esnasında buradan numune çıkışını önlemektir. Fakat kesme işlemine başlamadan önce bu vidalar alt başlığa temas edecek biçimde hafifçe sıkıştırılmalıdır ve bu sayede oluşacak olan kesme yüzeyinde alt ve üst başlıklarının sürtünmesinden doğacak olan kuvvet zorlamalarının önüne geçilmelidir.



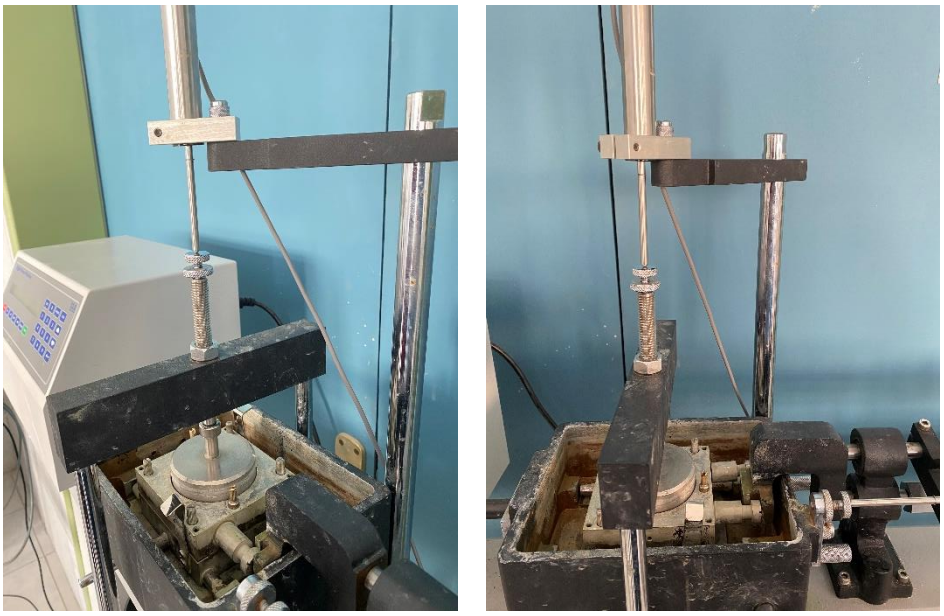
Şekil 4.6. Kesme kutusu numune haznesi

Alt ve üst başlık birbirleri üzerine oturtulduktan sonra yanlarda bulunan sabitleme vidaları ile birbirlerine sabitlenir ve konsolidasyon aşamasında herhangi bir kaymanın olmaması sağlanmış olur. Daha sonra sırası ile çizgili drenaj taşı, pürüzsüz poroz taş, pürüzlü poroz taş, filtre kağıdı, hazırlanmış olan numune, filtre kağıdı, pürüzlü poroz taş, pürüzsüz poroz taş ve üst drenaj başlığı haznenin içerisine yerleştirilir. Burada dikkat edilecek olan husus pürüzlü poroz taşların pürüzlü yüzeylerinin numuneye bakmasıdır çünkü bu sayede konsolidasyon esnasında suyun düz bir yüzeyde sıkışmayarak daha kolay drene olabilmesini sağlamaktadır. Deneye hazır bir kesme kutusu numune haznesi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Kesme kutusu deneyine hazır bir kesme kutusu numune haznesi

Hazırlanmış olan kesme kutusu numune haznesi, kesme kutusu makinesindeki su haznesinin olduğu yere numuneye zarar gelmeyecek biçimde yerleştirilir. Deneyde kullanılacak olan normal gerilmeye denk gelen ağırlık miktarı yük koluna yerleştirilir ve yük kolu boşa alınır. Yük kolu boşa alındıktan sonra, yükün numuneye aktarılmasını sağlayan yükleme askısı drenaj başlığına denk getirilir ve vidası numuneye baskı uygulamayacak biçimde sıkıştırılır. Üstüne düşey deformasyon okuyucu ortalanarak yerleştirilir ve Şekil 4.8'deki gibi deney sistemi hazırlanmış olur.



a b

Şekil 4.8. Kesme deneyine hazırlanmış sistem: a) yandan görünüş b) önden görünüş

Deneye başlamadan önce Şekil 4.9'da görülen dijital ekranda, deneyde kullanılacak olan kesme hızı girilir ve kesme kutusu numune haznesinin yerleştirildiği su haznesi doldurularak deneye hazır hale getirilir.



Şekil 4.9. Kesme kutusu makinesi ekranı

Bu aşamada öncelikle DS7 programında gerekli veriler sisteme işlenir. Bilgi giriş aşaması bittikten sonra konsolidasyon aşamasına gelinir ve programda konsolidasyon aşamasına geçiş komutu verildikten sonra kesme kutusu makinesinde yük kolu vanası çevrilerek yerleştirilmiş olan ağırlıkların numuneye etki etmesi sağlanır. Program üzerinden konsolidasyon eğrisi kontrol edilir ve numune konsolide olduktan sonra konsolidasyon DS7 programında tamamlanır.

Numune konsolide edildikten sonra kesme aşamasına geçilir. DS7 programında veriler girildikten sonra makinedeki kesme hızı ile programdaki kesme hızı yanlışlık olmaması adına son kez kontrol edilir. Verilerin doğruluğundan emin olduktan sonra haznenin alt ve üst başlıklarını sabitleyen vidalar çıkartılır ve programda kesme komutu verilir. Geri sayımdan sonra makinenin üzerindeki komut ekranında "RUN" düğmesine basılarak kesme başlatılır. Makine 12 mm yatay deformasyon yaptıktan sonra otomatik olarak durur ve programda birinci kesme aşaması sonlandırılır. İkinci kesimi yapabilmek için makinedeki komut ekranında geri alma düğmesine basılarak numune kesmeden önceki haline getirilir ve kesme aşamasındaki aynı adımlar tekrarlanarak ikinci kesme işlemi uygulanır. Numune tekrardan 12 mm yatay deformasyon yaptıktan sonra kesme aşaması biter ve programda son veriler girildikten sonra numunenin kesme işlemi son bulur.

Kesilen numune, düşey deformasyon okuyucu ve yük kolu boşa alınarak su haznesinden çıkartılır. Kesme kutusu numune haznesinin içerisinden çıkarılan numune tüm poroz taşlardan ve filtre kağıtlarından ayrılarak ıslak ağırlığı tartılır. Etüvde kurumaya bırakılan numuneni kuru ağırlığı bulunarak deney sonu su muhtevası hesaplanır. Kesilmiş olan bir numune Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kesme aşamasından sonraki numune yüzeyi

Kesilmiş olan her numunenin analizi DS7 programı üzerinden gerçekleştirilir. Program tarafından otomatik olarak verilerin okunduğu ham dosya bulunarak programda bu veriler işlenir. İstenilen veriler programa girildikten sonra gerilme – yatay deformasyon grafiği oluşturulur ve bu grafikler üzerinden numunenin pik ve kalıcı dayanım değerleri belirlenir. Ham dosya işlendikten sonra işlenmiş dosya oluşur ve bu dosya üzerinden veriler yazdırılarak kullanılabilir. Aynı numune üzerinde farklı gerilmelerde deneyler gerçekleştirildikten sonra grup raporu oluşturulur ve belirlenmiş olan dayanım değerleri göz önüne alınarak numunenin göçme zarfı çizilir.

4.2.1.3. DS7 programı

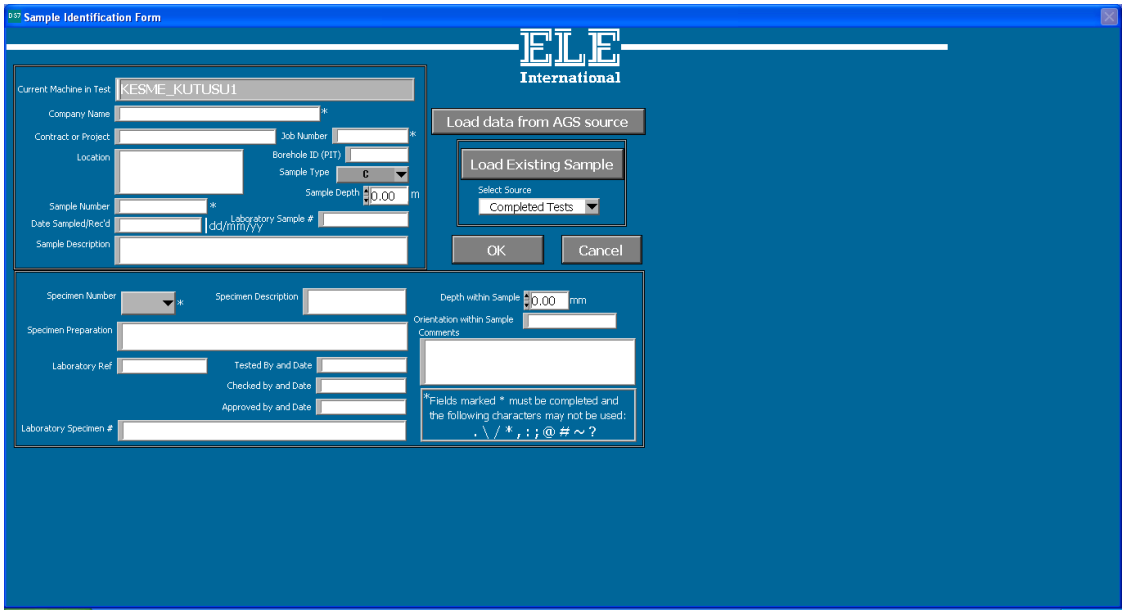
Kesme kutusu deneyleri yapılırken verilerin girişi ve deneyin sağlanması adına DS7 programı kullanılmıştır. Program kapsamında numune verilerinin girişi, deney aşamaları arasındaki sürecin yönetimi ve elde edilen verilerin işlenmesi vardır. DS7 programında yapılan işlemler, ekran görüntüleri aracılığıyla anlatılmıştır. Programın giriş ara yüzü Şekil 4.11 (a)'da gösterilmiştir. Giriş kısmında "New Test" butonu yeni bir deney programı başlatır, "Monitor Test" butonu devam eden deneyin durumunu gösterir ve "Analysis & Reports" butonu ise bitmiş olan deneyleri analiz etmek için kullanılır. Yeni bir deney başlatmak için "New Test" butonuna tıklanır ve Şekil 4.11 (b)'de gösterilen, programa bağlı deney makinelerinin hangisinde deney yapılmak isteniyorsa o seçilir.



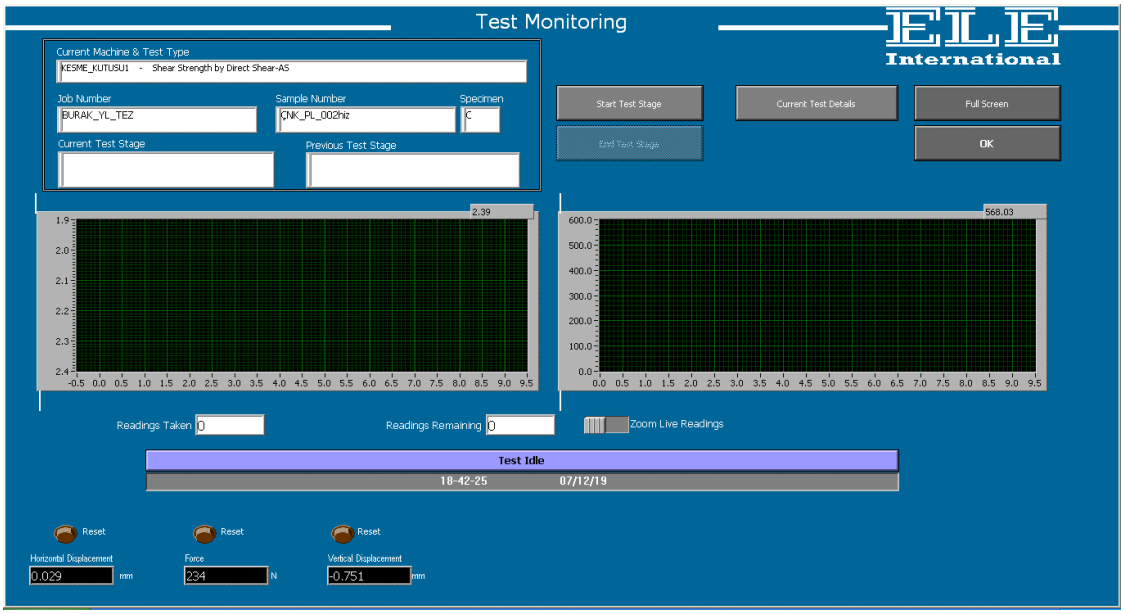
Şekil 4.11. DS7 programı: a) ara yüz b) deney makinesi seçim ekranı

Bu çalışmada kullanılmak üzere kesme kutusu makinesi seçilmiştir. Şekil 4.12 (a) ekranında * ile işaretlenmiş doldurulması zorunlu alanlar doldurulmalıdır. Doldurulacak olan alanlar klasör isimlerini ve deney numaralandırılmalarını sağladıkları için kullanıcı kendi anlayabileceği biçimde bu kısımları isimlendirmelidir. Zorunlu alanlar doldurulduktan

sonra Şekil 4.12 (b)'de oluşan ekran üzerinden deney veri girişleri ve deney yönetimi yapılabilmektedir.



a

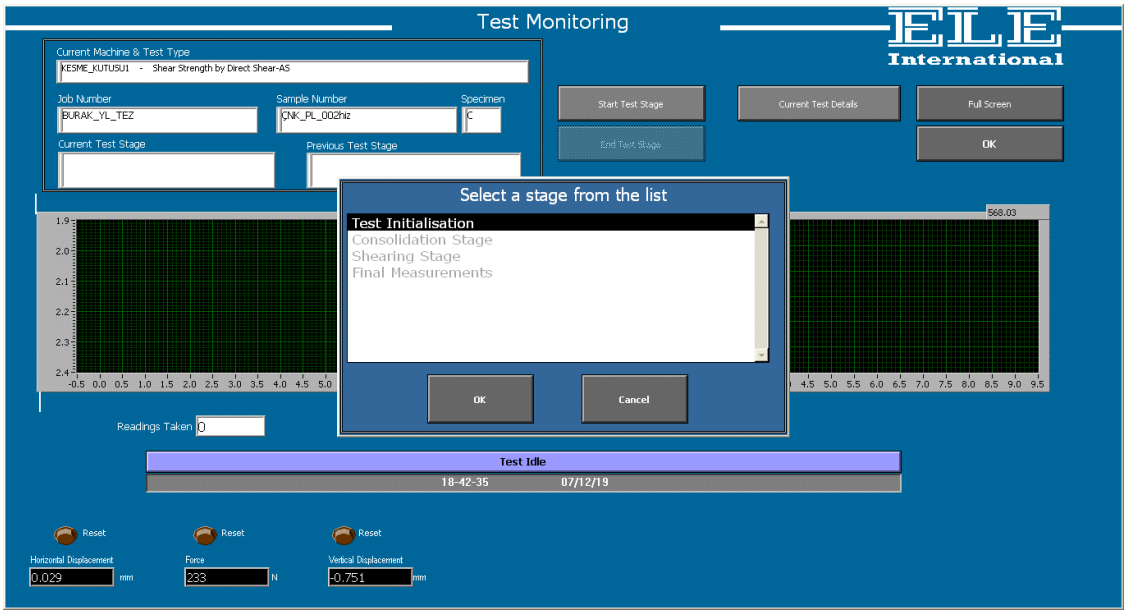


b

Şekil 4.12. DS7 deney klasörü oluşturma: a) isimlendirme paneli b) deney paneli

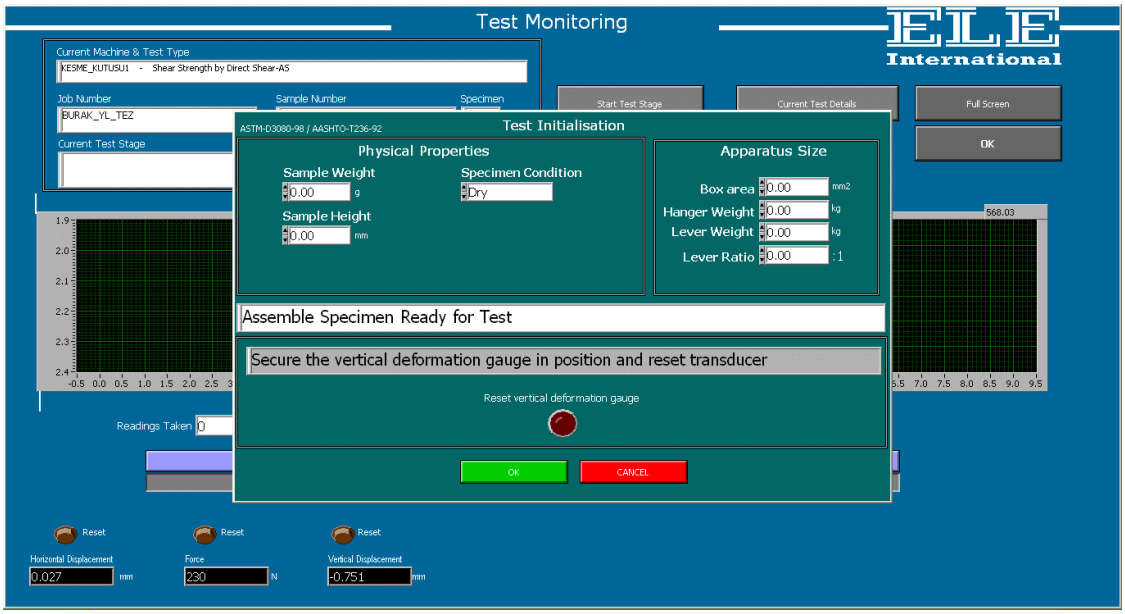
Deney panelinde "Start Test Stage" butonundan deneyde gerçekleştirilecek olan Şekil 4.13'te görülen tüm aşamalar yönetilmektedir. Her aşama öncesinde "Start Test Stage"

butonundan deneye başlanmalı, aşama bitince ise “End Test Stage” butonundan işlem sonlandırılmalıdır.



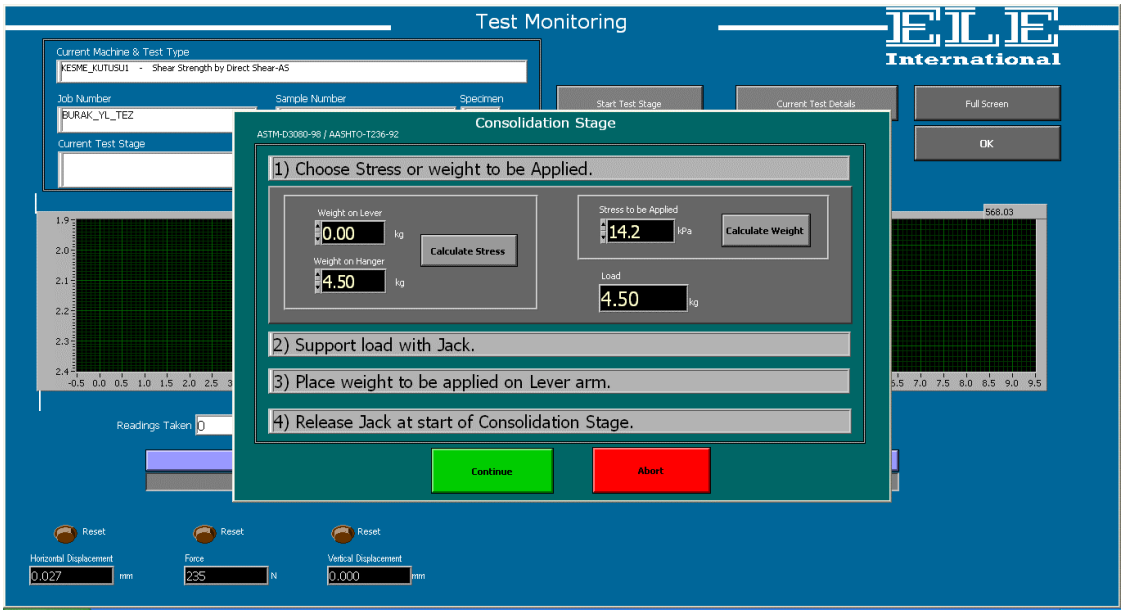
Şekil 4.13. DS7 programında bulunan kesme kutusu makinesi deney aşamaları

“Test Initalisation” butonundan deney sisteminin özelliklerinin girişi yapılmaktadır. Şekil 4.14’te görüldüğü üzere bu pencerede girilecek olan veriler numunenin ağırlığı, numunenin yüksekliği, deney koşullarının kuru veya su altında olup olmadığı, kesme kutusunun numune bazında alanı, yük kolunun yükleme askısının ağırlığı, yük kolunun ağırlığı ve yük koluna koyulan ağırlıkların hangi oranda aktarıldığıdır. Gerekli veriler girildikten sonra pencerenin altındaki düşey deformasyonu sıfırlama butonuna basılmalıdır. Böylece konsolidasyon aşamasında numunenin düşey deformasyon değişimi sağlıklı bir şekilde okunabilmektedir.



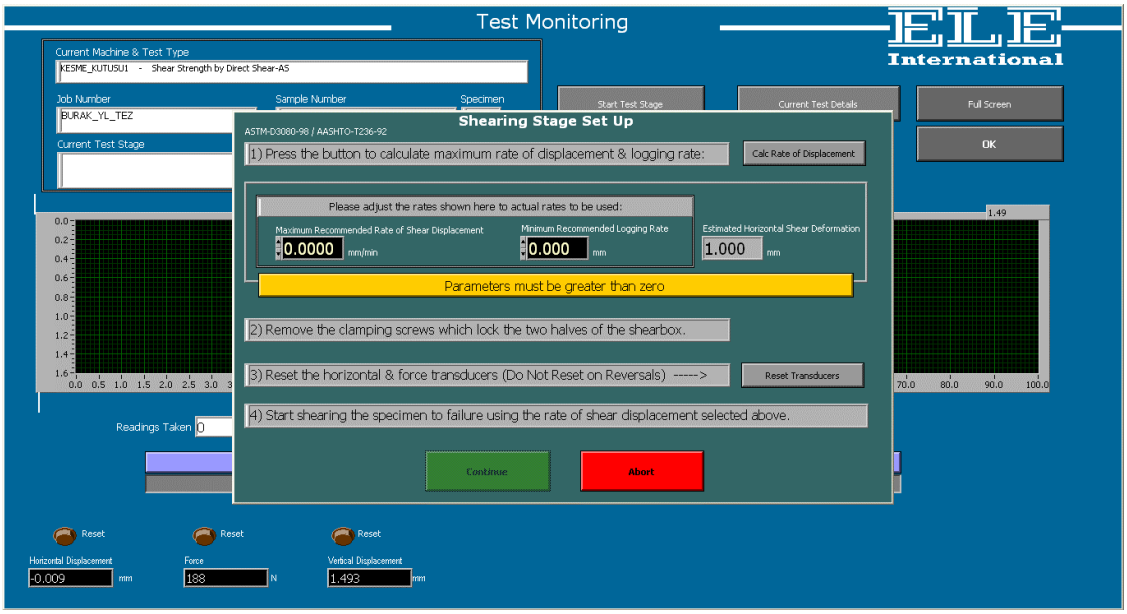
Şekil 4.14. Deney başlangıç bilgilerinin girildiği ekran

Deneyin başlangıç bilgileri girildikten sonra tekrardan “Start Test Stage” butonuna basılır ve bu sefer konsolidasyon aşaması seçilir. Şekil 4.15’te görülen konsolidasyon bilgilerinin girildiği pencere açılır. Bu pencerede gerilme cinsinden veya ağırlık cinsinden veri girişi yapılabilir. Eğer kullanılacak olan gerilme değerinde ne kadar ağırlık kullanılacağı bilinmiyor ise gerilme değeri “Stress to be Applied” kısmına yazılır ve “Calculate Weight” butonuna basılarak koyulacak olan ağırlık hesaplanır. Bir diğer yapılabilecek işlem ise, yük koluna koyulmuş olan ağırlık değerini “Weight on Lever” kısmına yazarak “Calculate Stress” butonuna tıkladıktan sonra numuneye etki edecek olan gerilme değerini görmektir. Bu işlemler yapılıp devam ettikten sonra program, kullanıcıya 5 saniyelik geri sayım yapar ve bu sürenin sonunda yük kolunu tutan vana çevrilerek yükün numuneye etki etmesi sağlanmalıdır.



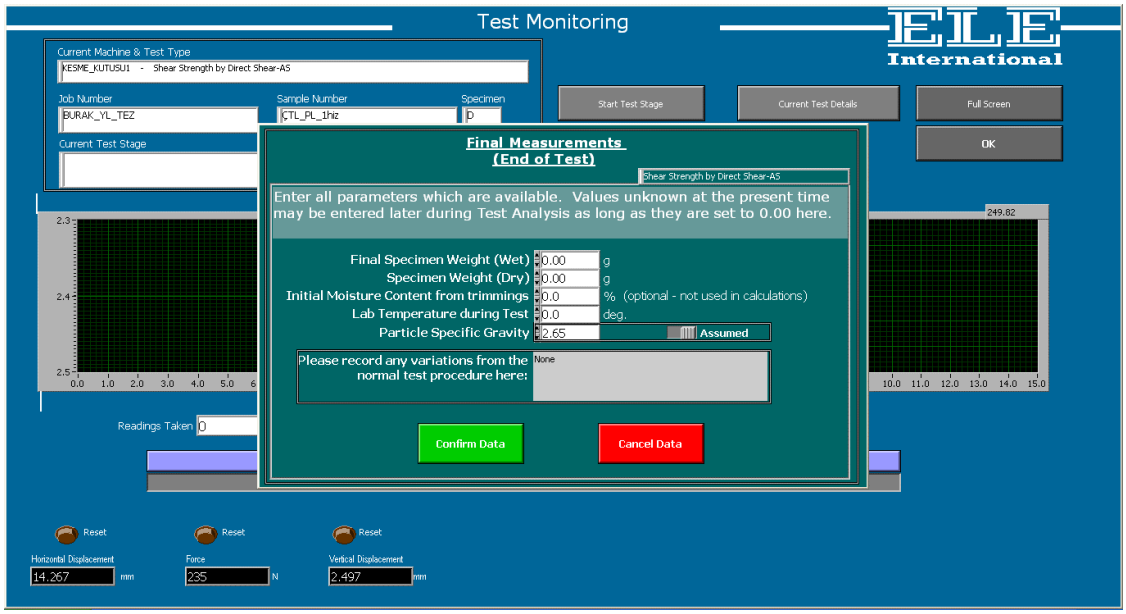
Şekil 4.15. Konsolidasyon aşaması program penceresi

Konsolidasyon aşaması programda oluşan konsolidasyon eğrisinden takip edilmelidir. Konsolidasyonun bittiğine karar verildiğinde “End Test Stage” butonuna basılarak bu aşama sona erdirilmelidir. Kesme adımına geçmek için tekrardan “Start Test Stage” butonuna basılır ve kesme aşaması seçilir. Şekil 4.16’da görülen ekranda, kullanılacak olan kesme hızı ve veri okuma aralığı değerleri girilerek program kesme aşamasına hazırlanır. Kesmeye başlamadan önce “Reset Transducers” butonuna tıklayarak kuvvet ve yatay deformasyon sıfırlanmalıdır. Sıfırlanmadığı takdirde okunacak olan veriler yanlış olacaktır ve elde edilen grafik hatalı çıkacaktır. Gerekli kontroller yapıldıktan ve devam ettikten sonra makine tekrardan geri sayıma başlar ve geri sayımın sonunda kesme işlemini başlatmak için makine üzerindeki dijital ekranda bulunan “RUN” tuşuna basılmalıdır. Çoklu kesme işlemleri için bu adımlar tekrarlanmalıdır.



Şekil 4.16. Kesme aşaması program penceresi

Kesme aşaması bittikten sonra yine “Start Test Stage” butonundan deneyi bitirmek için “Final Measurements” penceresi açılır. Şekil 4.17’de görülen pencerede gerekli alanlar doldurularak deney sonlandırılır.



Şekil 4.17. Deney sonlandırma penceresi

Bitmiş olan deneyler, DS7 programının ana ara yüzündeki “Analysis & Reports” butonundan analiz edilir. Ham dosyanın kaydedildiği klasör bulunarak analiz edilen deneylerde, grafik üzerinde pik ve kalıcı değerler okunur. Bir numune üzerinde farklı gerilmelerde deney serisi gerçekleştirildiğinde ise her numune tek başına analiz edilir, daha sonrasında aynı gruptaki numunelerin sonuç raporları bir arada seçilerek grup raporu yazdırılır. Oluşturulmuş olan bu grup raporu sonucu numunenin göçme zarfı çizilir ve kayma dayanım parametreleri bulunur.

4.2.2. Halka kesme deneyi

Zeminlerde kalıcı kayma dayanımı bulunurken en güvenilir yöntem halka kesme deneyidir. Kalıcı kayma dayanımı bulunurken gerekli olan çok büyük deformasyonları sağlayan halka kesme deneyi, zeminlerin kalıcı dayanım parametrelerinin bulunmasında sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışmada Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında bulunan Bromhead tipi, VJ Tech marka VJT5600A model halka kesme deney aleti kullanılmıştır. Kullanılmış olan halka kesme makinesi Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Bromhead tipi VJ Tech marka halka kesme deney aleti

Kullanılacak olan numuneler hazırlandıktan sonra N1 numunesi 200 kPa, 250 kPa ve 300 kPa, N2 ve N3 numuneleri ise 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edilmiştir. Konsolidasyon işleminden sonra, tekrarlı direkt kesme kutusu makinesi ile halka kesme makinesi arasındaki parametre farklarını inceleyebilmek adına, Denklem 4.2'de verilmiş olan formül yardımıyla gerekli dönüşümler yapılmış ve tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kullanılmış olan kesme hızları halka kesme deneylerine adapte edilmiştir.

$$V_{halka} = \frac{360° * V_{kesme}}{2 * \pi * r} \tag{4.2}$$

Bu formülde daire çevresi formülünden yararlanılmış ve mm cinsinden olan tekrarlı direkt kesme kutusu makinesinde kullanılan kesme hızı, derece cinsinden olan halka kesme makinesinde kullanılan kesme hızına dönüştürülmüştür. Formüldeki dairenin yarıçapı olarak yerleştirilen numunenin orta noktası esas alınmıştır. Buna dayanarak halka kesme deneylerinde 0,027 der/dak, 0,135 der/dak ve 1,35 der/dak kesme hızları kullanılmıştır. Her bir numune 50 mm deformasyon yapacak şekilde kesilip kalıcı kayma dayanımına ulaştırılmıştır.

4.2.2.1. Numunelerin hazırlanması

Etüvde kurutulan numuneler 0,475 mm açıklıklı 40 no'lu elekten elendikten sonra çalışılacak olan başlangıç su muhtevasına getirilmiştir. Numunelerin dane boyut özelliklerinin tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kullanılan numuneler ile aynı olması açısından, kullanılan elek açıklığı aynı seçilmiştir. Numune tamamen homojen bir şekilde başlangıç su muhtevasına getirildikten sonra Şekil 4.19 (a)'da gösterilen, yüksekliği 5 mm, iç yarıçapı 35 mm ve dış yarıçapı 50 mm olan halka biçimindeki numune kalıbına sıkıştırma yöntemi ile yerleştirilmiştir. Yerleştirilmiş olan numunenin, kalıp dışına taşan kısımları tıraşlanarak Şekil 4.19 (b)'de görüldüğü gibi düz bir zemin yüzeyi elde edilmiştir.

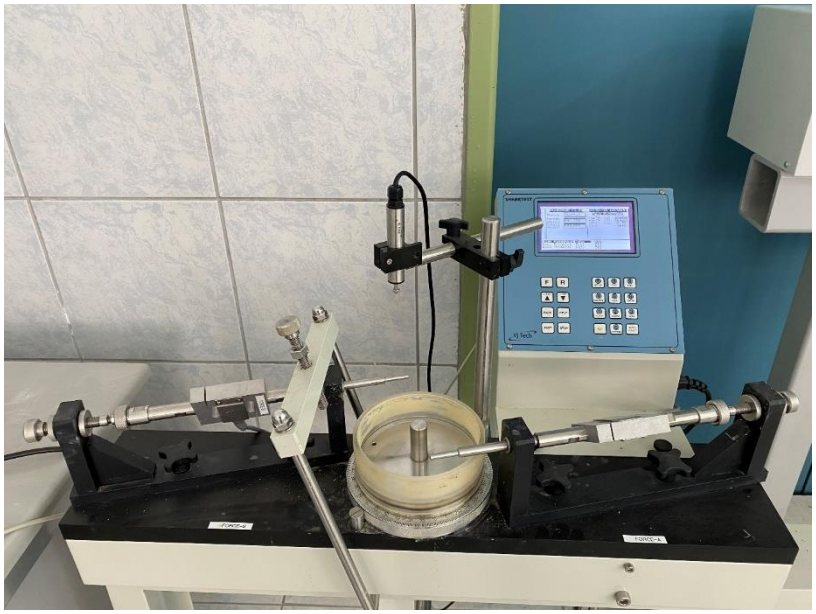


a b

Şekil 4.19. Halka kesme aleti numune kalıbı: a) boş kalıp b) numune yerleştirilmiş kalıp

4.2.2.2. Deney aletinin hazırlanması ve deney aşaması

Deney başlarken ilk olarak numune kalıbına yerleştirilmiş olan numune, halka kesme makinesinin su haznesi bölümüne yerleştirilir. Bunun için kalıbın kenarlarında bulunan iki adet vida boşluğuna kaldırma vidaları takılır ve bu vidalardan tutularak numune kalıbı su haznesinin içerisine yerleştirilir. Şekil 4.20'de numunenin yerleştirildiği su haznesi ve kesme aparatları görülmektedir.



Şekil 4.20. Halka kesme makinesi su haznesi ve kesme aparatları

Kesme işlemi sırasında numunenin dönmesini engellemek için, numune kalıbının kenarlarında bulunan diğer iki adet vida boşluğuna ise sabitleme vidaları takılarak kalıbın su haznesine sabitlenmesi sağlanır. Numune kalıbının üst başlığı, numunede herhangi bir kesme yüzeyi oluşturmayacak bir biçimde dikey doğrultuda dikkatlice numunenin üzerine yerleştirilir. Yükleme koluna gerekli gerilmeyi oluşturacak ağırlıklar koyulduktan sonra yükleme kolu boşa alınır, yükleme askısı numune kalıbının üst başlığına oturacak biçimde yerleştirilir ve numuneye yük etki ettirmeden hafifçe sıkılır. Düşey deformasyon okuyucu yükleme askısının ortasına yerleştirilir ve itici kolların kuvvet alıp almadığı dijital ekranda kontrol edilir. Makinede bulunan dijital ekranda, deneyde kullanılacak olan kesme hızının girişi yapılır. Su haznesinin çevresinde bulunan derece göstergesi 0 dereceye getirilip su haznesi doldurulduktan sonra Şekil 4.21'de görüldüğü üzere deney sistemi hazırlanmış olur.



Şekil 4.21. Deneye hazır bir halka kesme makinesi

Deney aşamalarının yönetimini sağlayan Clisp Studio programında makinenin ve deney bütünündeki bütün aşamalarının veri girişleri yapılır. Oluşturulmuş olan deney planında, numuneye etki edecek gerilmenin konsolidasyon veri okuması başlatılır ve aynı

anda makinedeki yük kolu vanası çevrilerek numuneye yükün etki etmesi sağlanır. Program üzerinden konsolidasyon eğrisi gözlemlenerek konsolidasyon aşamasının bittiği görüldüğünde konsolidasyona son verilir.

Kesme aşamasında Clisp Studio programında oluşturulan deney planında, numuneye etki edecek gerilmenin kesme aşaması başlatılır. Veri girişlerinde belirlenen koşullar sağlandığında numunenin kesme aşaması otomatik olarak biter ve kesme aşaması sonlandırılmış olur. Yükleme kolu boşa çıkartıldıktan sonra düşey deformasyon okuyucu ve yükleme askısı kenara alınır. Üst başlığından ve sabitleme vidalarından kurtarılan numune kalıbı su haznesinden çıkarılır. Numune kalıbının içinden olabildiğince hassas bir şekilde numune çıkarılır ve deney sonu su muhtevasının hesaplanabilmesi için etüve kaldırılır. Kesilmiş olan bir numune Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

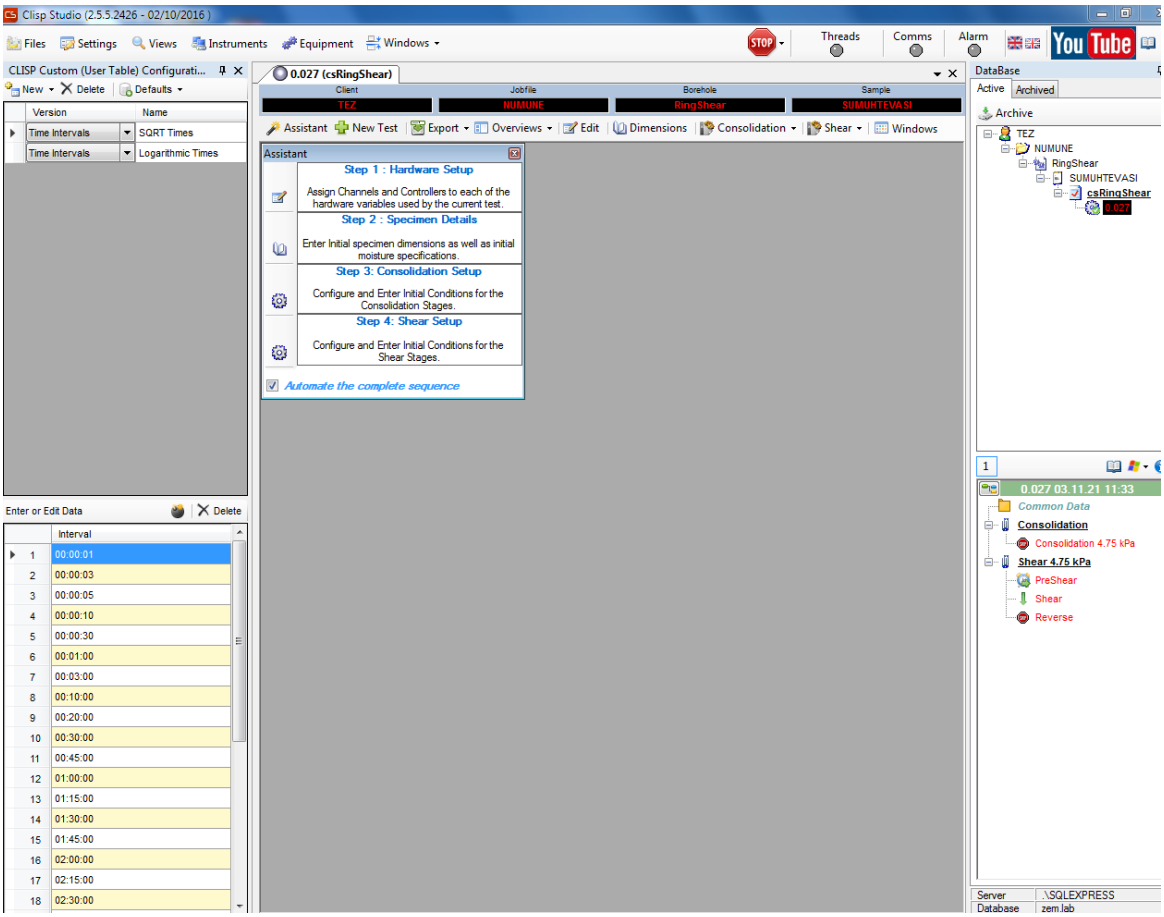


Şekil 4.22. Halka kesme makinesinde kesilmiş bir numune

Farklı gerilmeler altında kesme işlemi uygulanmış bir deney serisi gerçekleştirildiğinde Clisp Studio programı üzerinden gerilme – yer değiştirme grafikleri incelenir ve buradan elde edilmiş olan kalıcı kayma dayanım değerleri esas alınarak numunenin göçme zarfı çizilir. Böylece deneyleri yapılmış olan numunelerin kalıcı kayma dayanım parametreleri elde edilir.

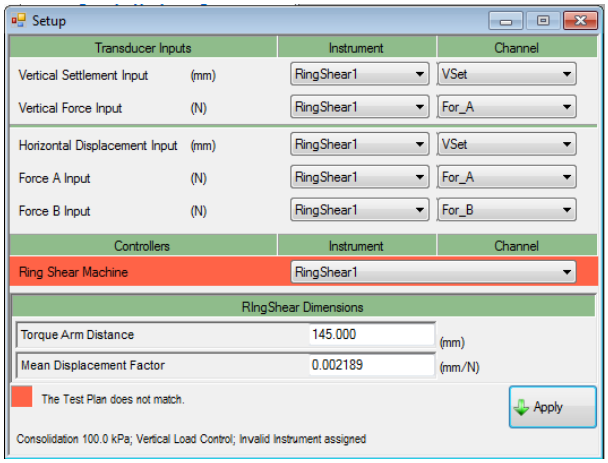
4.2.2.3. Clisp Studio programı

Halka kesme deneyleri gerçekleştirilirken Clisp Studio programı kullanılmıştır. Deney aşamaları arasında her türlü komutun program üzerinden gerçekleştirildiği Clisp Studio, ekran görüntüleri yardımı ile anlatılmıştır. İlk olarak deney klasörü oluşturmak adına Şekil 4.23'de sağ tarafta görülen "Active" bölmesi aracılığı ile kullanıcının anlayabileceği isimlendirmeler yapılarak yeni deney klasörü açılır. Son aşamada yeni deney planı oluşturulurken BS 1377 – 7 : 1990 ve ASTM D6467 – 13 standartlarından deneyde esas alınacak olan standart seçilir. Deney ve numune verilerinin girildiği, genel deney planının kontrolünün gerçekleştiği ara yüz gösterilmiştir (Bkz. Şekil 4.23).



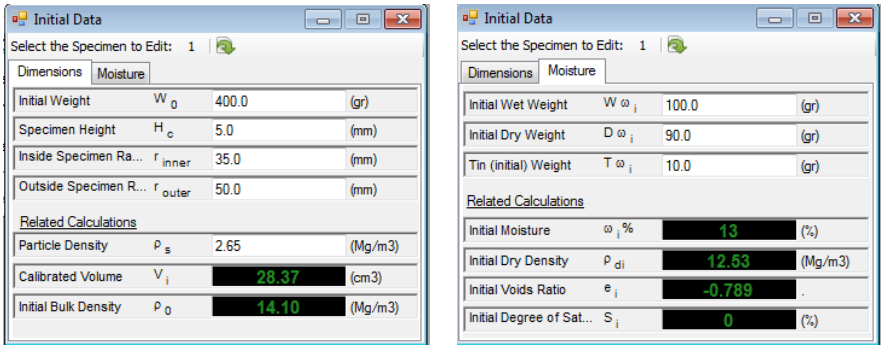
Şekil 4.23. Clisp Studio programı ara yüzü

Deneye başlamadan önce program üzerinden tüm verilerin girişi yapılır. “Hardware Setup” adımında makine verileri girilir. Kullanılacak olan makine, düşey deformasyon okuyucu girdileri ve itici kol girdileri Şekil 4.24’de görüldüğü şekilde bu aşamada gerçekleştirilir.



Şekil 4.24. Makine verilerinin programa girildiği ekran

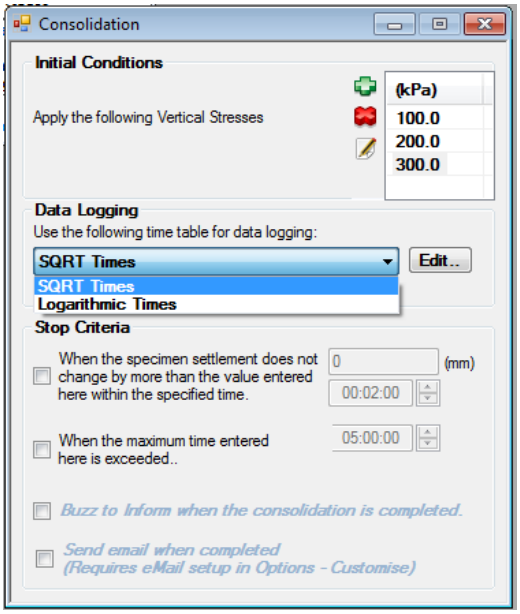
“Specimen Details” adımında “Dimensions” sekmesine numunenin özgül ağırlığı, “Moisture” sekmesine ise yerleştirilen numunenin ıslak ve kuru ağırlığı girilir. Su muhtevasının doğruluğu yine bu aşamada otomatik olarak hesaplanan başlangıç muhteva satırına bakılarak kontrol edilir. Verilerin girildiği ekranlar Şekil 4.25 (a) ve Şekil 4.25 (b)’de verilmiştir.



a b

Şekil 4.25. Numune bilgilerinin girildiği ekran: a) özgül ağırlık ekranı b) su muhtevası ekranı

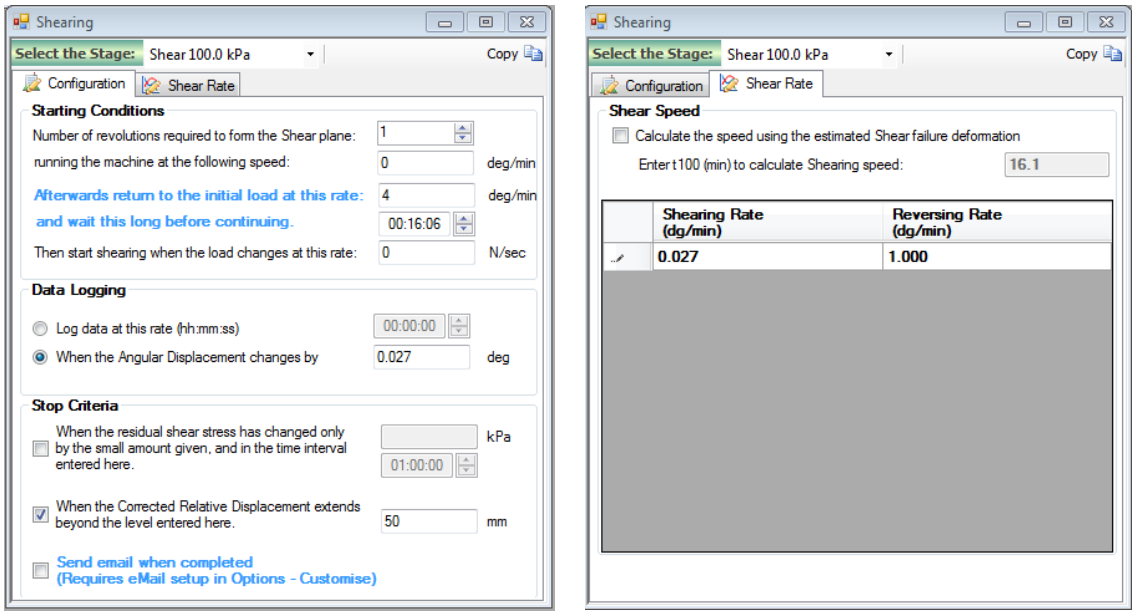
"Consolidation Setup" adımında, deneyin konsolidasyon aşamasında kullanılacak olan verilerin girişi yapılır. İlk olarak Şekil 4.26'da görülen başlangıç koşulları bölmesinde, numuneye etki edecek olan gerilme sayısı eklenip çıkarılarak isimlendirilir. Numune konsolide olurken oluşturulacak olan grafiğin, zamanın karesi veya logaritmik olarak çizileceği belirlenir. Konsolidasyon aşamasının bitişi ise farklı yollar ile gerçekleşebilir. Belirlenen bir deformasyondan daha büyük bir değişim olmazsa veya belirlenen sürenin sonuna gelirse program otomatik olarak konsolidasyonu sonlandırır. Fakat herhangi bir sonlandırma kriteri belirlenmez ise kullanıcı, konsolidasyon esnasında eş zamanlı olarak oluşturulan grafikten hareketle konsolidasyonu kendisi de bitirebilir.



Şekil 4.26. Konsolidasyon verilerinin girildiği ekran

"Shear Setup" adımında ise deneyin kesme aşamasında esas alınacak verilerin girdileri olur. Şekil 4.27 (a) ve Şekil 4.27 (b)'de görüldüğü üzere kesme aşaması verilerinin girildiği iki ayrı sekme vardır. "Configuration" sekmesinde, numuneye hızlı kesme işlemi uygulanacaksa başlangıç koşulları belirlenir, uygulanmayacaksa herhangi bir kesme hızı girilmez. Veri okuma aralığı değeri girildikten sonra kesme aşamasının bitişini belirlemek üzere bir durdurma kriteri seçilir. Kesme aşamasının otomatik olarak sonlandırılması için, kalıcı kayma dayanımının belirlenmiş olan bir gerilme değeri aralığında değişmemeye başlaması veya kesme işleminin belirlenmiş bir deformasyon seviyesine ulaşması

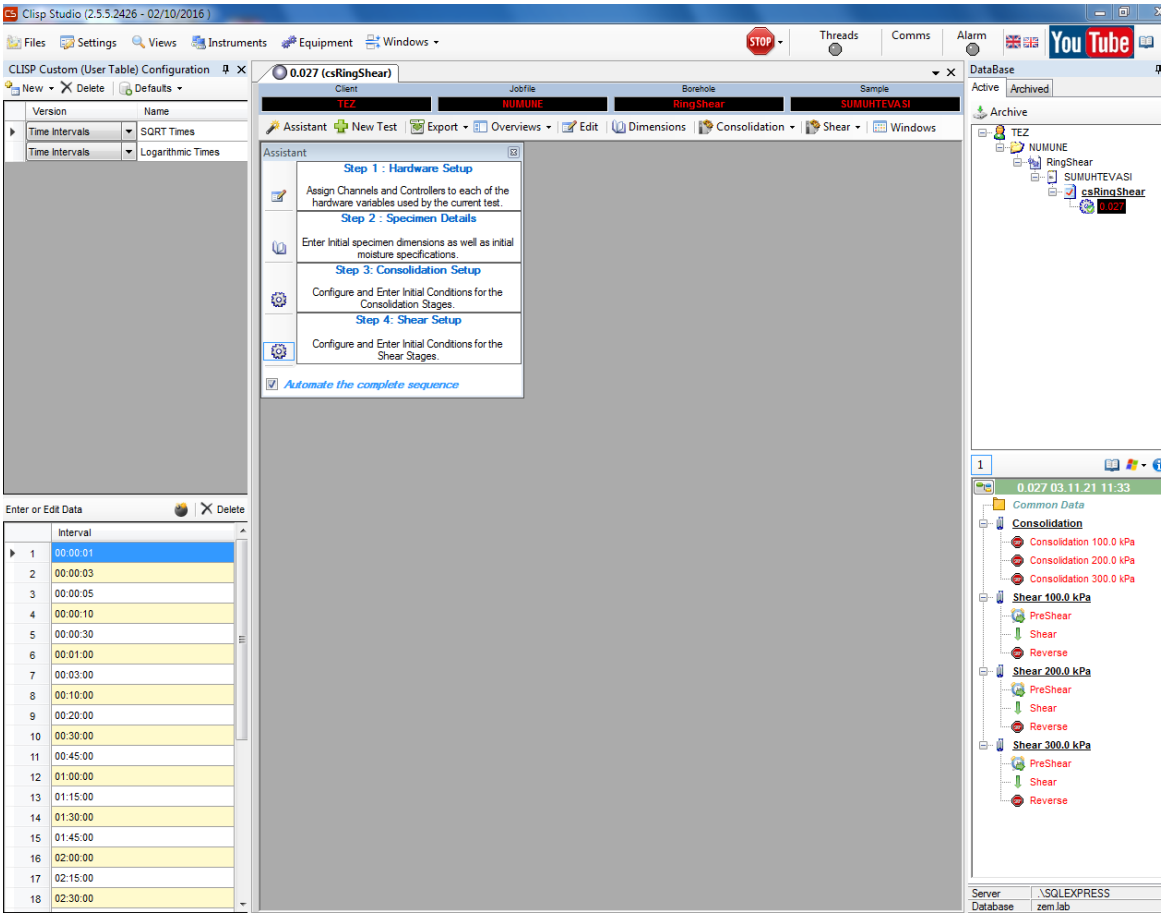
gerekmektedir. “Shear Rate” sekmesinde ise deneyde kullanılacak olan kesme hızı girilir. Eğer numuneye hızlı kesme işlemi uygulanacaksa, geri dönme hızının programa girişi de bu aşamada yapılır. Oluşturulmuş olan bütün gerilme planlarında bu verilerin girilmiş olması gereklidir. Bir gerilme planında veriler girildikten sonra sağ üstte bulunan kopyalama butonuna basıldığında daha önceden eklenmiş olan gerilme planlarına kesme verileri kopyalanmış olur.



a b

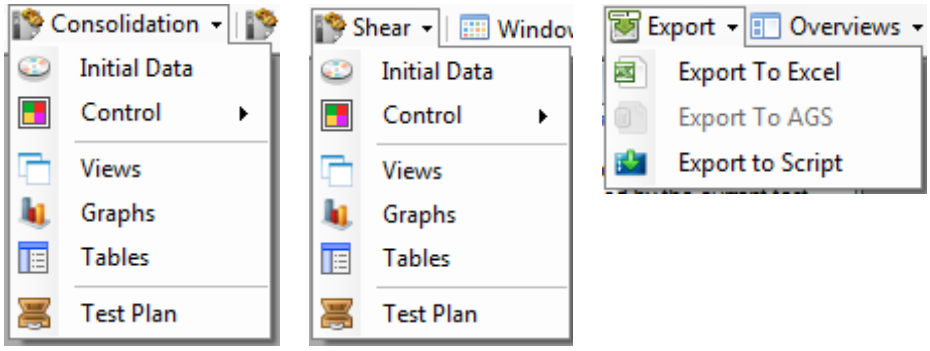
Şekil 4.27. Kesme verilerinin girildiği ekran: a) konfigürasyon ekranı b) kesme hızı ekranı

Deney planı oluşturulup bütün veriler girildikten sonra oluşan ara yüz Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Deneyde gerçekleştirilen bütün aşamalar sağ taraftaki planda bulunmaktadır ve gerçekleştirilecek olan aşamanın üstüne sağ tıklayarak plan başlatılabilir, durdurulabilir ve silinebilir.



Şekil 4.28. Veri girdileri yapılmış deney planının ara yüzü

Deneyde başlatılan aşamalarda eş zamanlı olarak veri görüntülenmesi yapılabilir. Konsolidasyon esnasında yukarıda bulunan “Consolidation” sekmesine basarak Şekil 4.29 (a)’da gösterilen canlı okuma, konsolidasyon grafiği ve konsolidasyon tablosu görüntülenebilir. Konsolidasyon grafiği Casagrande (t50) veya Taylor (t90) modelleri esas alınarak oluşturulabilir. Kesme aşamasında ise “Shear” sekmesi altında Şekil 4.29 (b)’de görüldüğü üzere canlı okuma, gerilme – yer değiştirme grafiği ve kesme tablosu kontrol edilebilir. Bir numune farklı gerilmeler altında kesildikten sonra, yine aynı sekme altında göçme zarfı çizilebilir. Bütün veriler bir dosya altında alınmak istenirse Şekil 4.29 (c)’de görülen “Export” sekmesi sayesinde verilerin dışa aktarımı gerçekleştirilebilmektedir.



a b c

Şekil 4.29. Deney aşamalarının sekmeleri: a) konsolidasyon sekmesi b) kesme ekmesi c) veri dışa aktarım sekmesi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir önceki bölümde karakteristik özellikleri belirtilmiş olan numunelerin tekrarlı direkt kesme kutusu deney sonuçları ve halka kesme deney sonuçları bu bölümde verilmiştir. Bulunmuş olan kayma dayanım parametreleri, numunenin geoteknik özellikleri, kullanılmış olan kesme hızları ve başlangıç su muhtevaları ele alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca tekrarlı direkt kesme kutusu makinesinde yapılan deneyler ile halka kesme makinesinde yapılan deneylerden, deney koşulları aynı şartlarda gerçekleştirilmiş olanlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın amacı, makinelerin çalışma prensiplerine göre daha sağlıklı sonuçları veren deney yönteminin değerlendirilmesidir.

Yapılmış olan çalışma kapsamında üç adat kil içerikli zemin üzerinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri yapılmıştır. Deney yöntemlerinin karşılaştırılmasında herhangi bir koşul farklılığı olmaması amacıyla aynı deney şartları yaratılmış ve numuneler üzerinde aynı işlemler uygulanmıştır. Numuneler deneylere hazırlanırken başlangıç su muhtevalarında plastik limit su muhtevaları, optimum su muhtevaları ve optimum+3 su muhtevaları esas alınmıştır. Göz önünde bulundurulan bu muhtevalardan uygun olan iki su muhtevası seçilerek, numuneler yüksek ve düşük su muhtevası olmak üzere iki farklı başlangıç su muhtevasında hazırlanmıştır. Her iki deney yönteminde de N1 numunesi 200 kPa, 250 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edilirken, N2 ve N3 numuneleri 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide olmuştur.

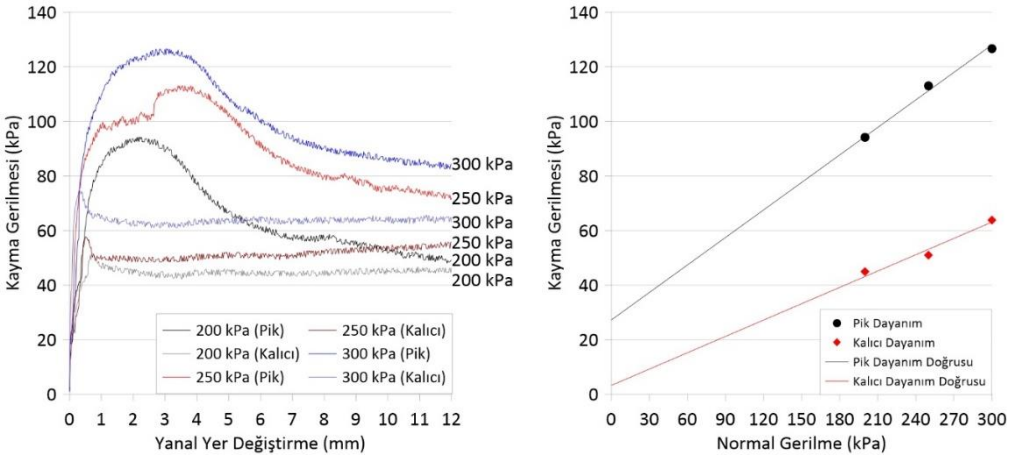
Bu çalışmanın amaçlarından biriside kesme hızının kayma dayanım parametreleri üzerine olan etkisi olduğundan dolayı, numuneler kesilirken yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç ayrı kesme hızı belirlenmiştir. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde numuneler 0,02 mm/dak, 0,1 mm/dak ve 1 mm/dak hızlarında kesmeye maruz bırakılmıştır. Halka kesme deneylerinde derece birimi kullanıldığından dolayı, tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kullanılan hızlar gerekli dönüşümler yapılarak halka kesme deneylerine adapte edilmiştir. Böylece halka kesme deneylerinde 0,027 der/dak, 0,135 der/dak ve 1,35

der/dak kesme hızları kullanılmıştır. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde numuneler üzerinde, her bir kesim 12 mm deformasyon oluşturacak biçimde çift kesim uygulanmıştır. Toplamda 24 mm deformasyon yapan numunelerin kalıcı kayma dayanımlarına ulaştığı varsayılmıştır. Halka kesme deneylerinde ise numuneler 50 mm deformasyona ulaşana kadar kesilip kalıcı kayma dayanımları elde edilmiştir. Deneylerde herhangi bir normal gerilmede, deney serisine uyumsuz bir sonuç görüldüğünde öncelikle deney tekrarlanmış, hala uyumsuzluk belirlendiyse bu değer deney bütününden çıkarılmıştır.

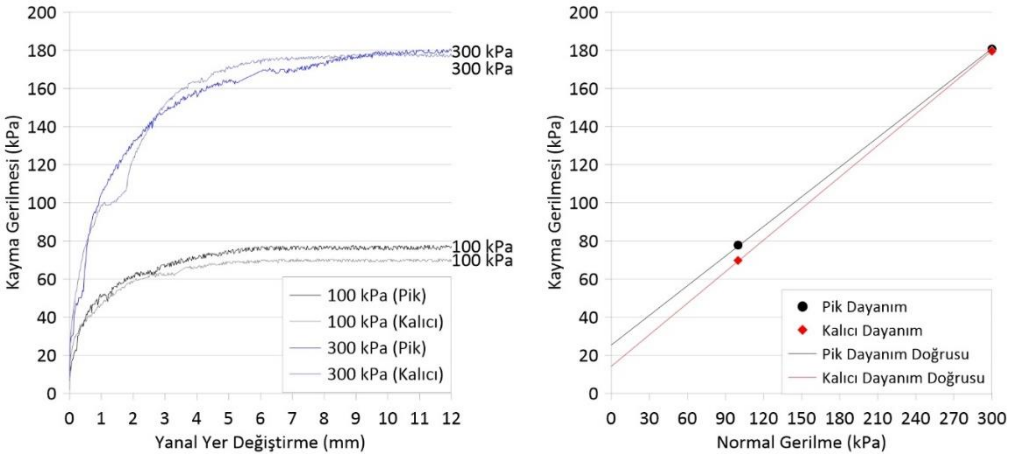
Yapılmış olan tüm bu deneyler sonucunda tüm numunelerin farklı değişkenler altında göçme zarfları belirlenip kayma dayanım parametreleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

5.1. Tekrarlı Direkt Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları

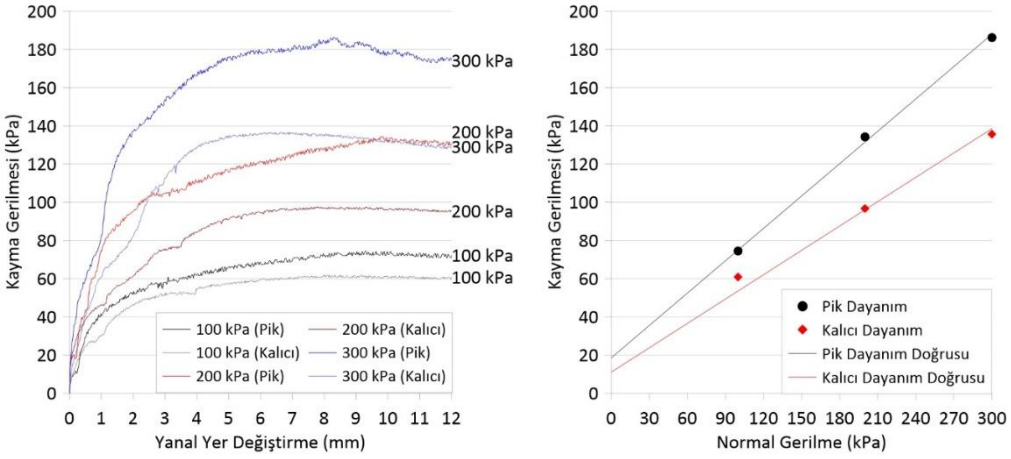
Numunelerin farklı değişkenlere olan tepkilerinin görülebilmesi için her bir grafik, başlangıç su muhtevası tipleri ve kesme hızları aynı olan farklı numunelerin deney serilerini içermektedir. Bu bağlamda oluşturulan gerilme – yer değiştirme grafikleri ile göçme zarfları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da görülebilir.



a

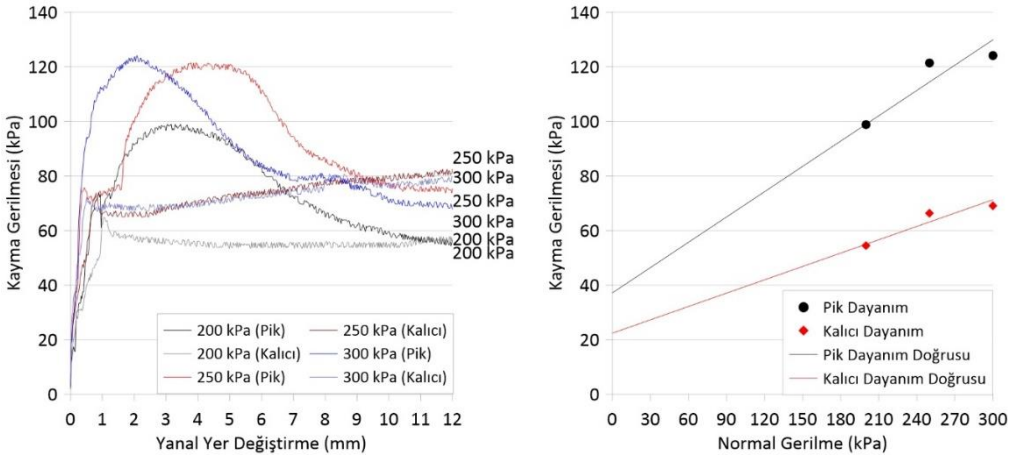


b

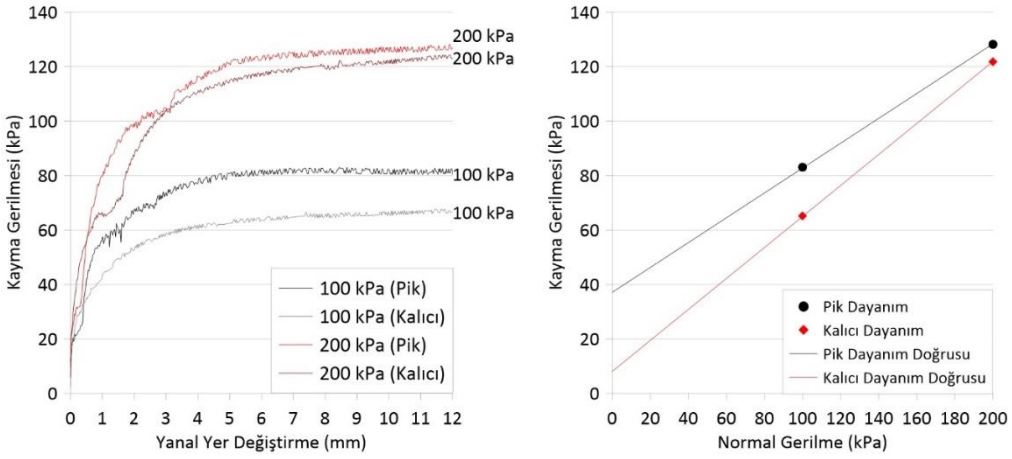


c

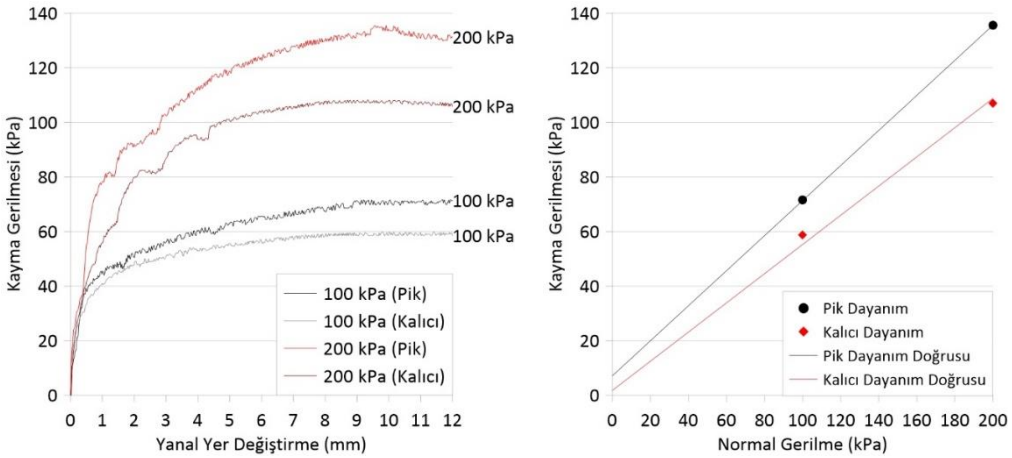
Şekil 5.1. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0,02 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

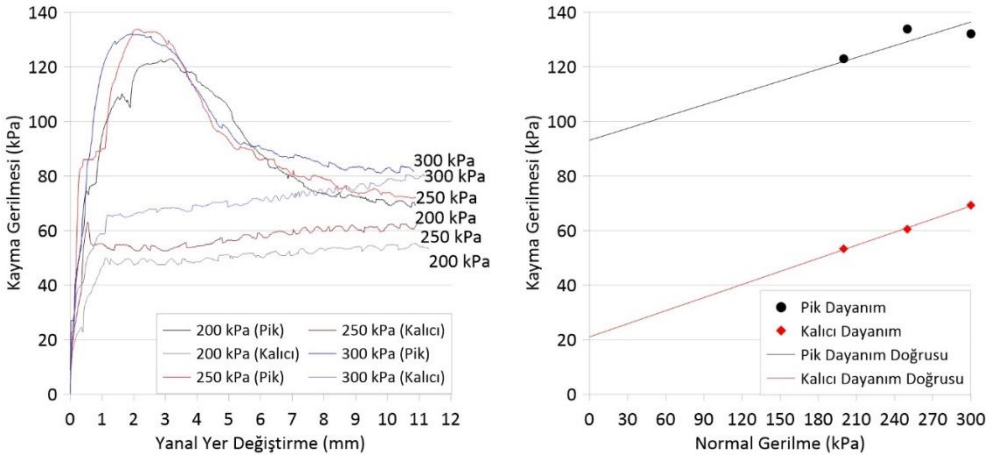


b

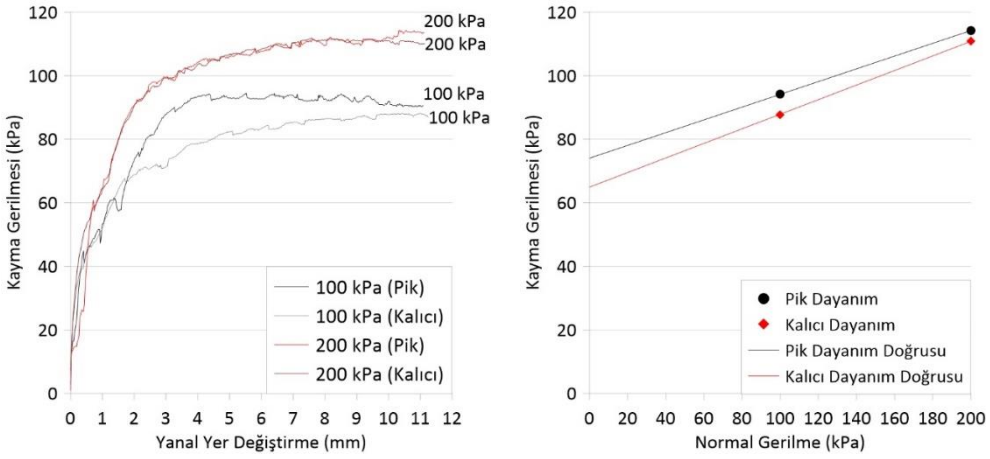


c

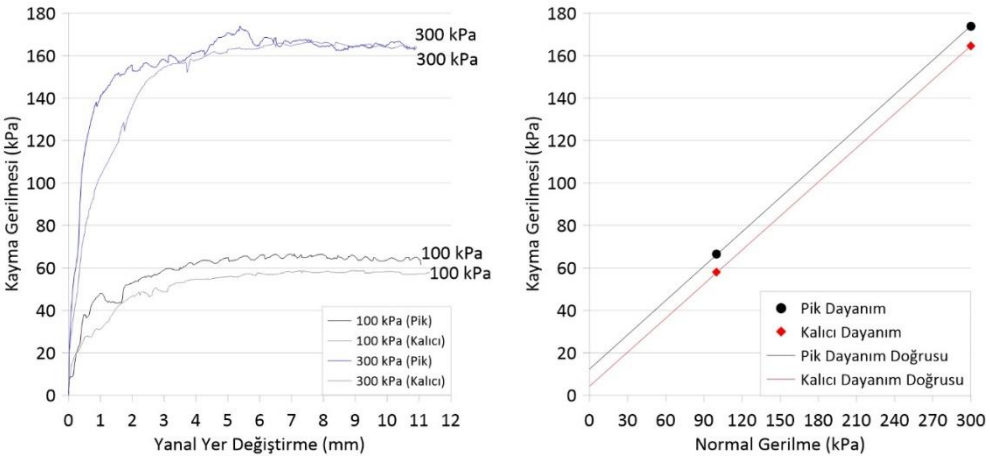
Şekil 5.2. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0,1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

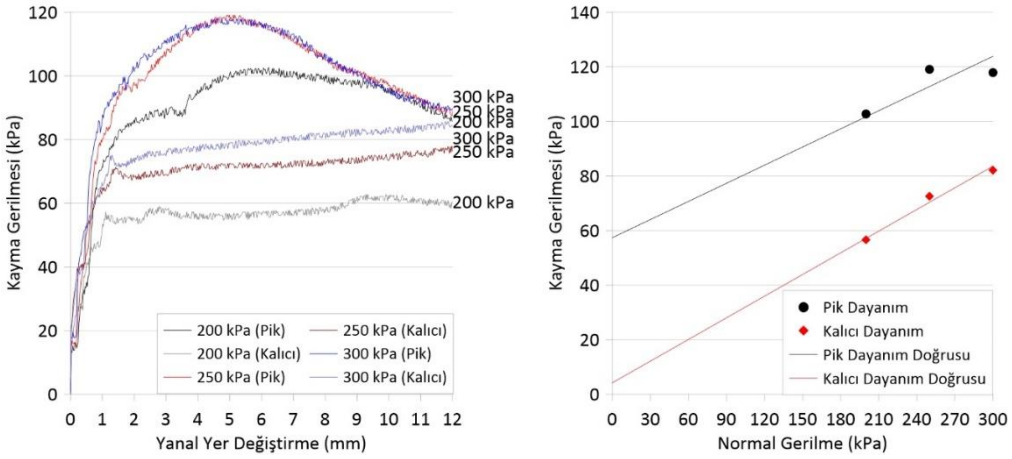


b

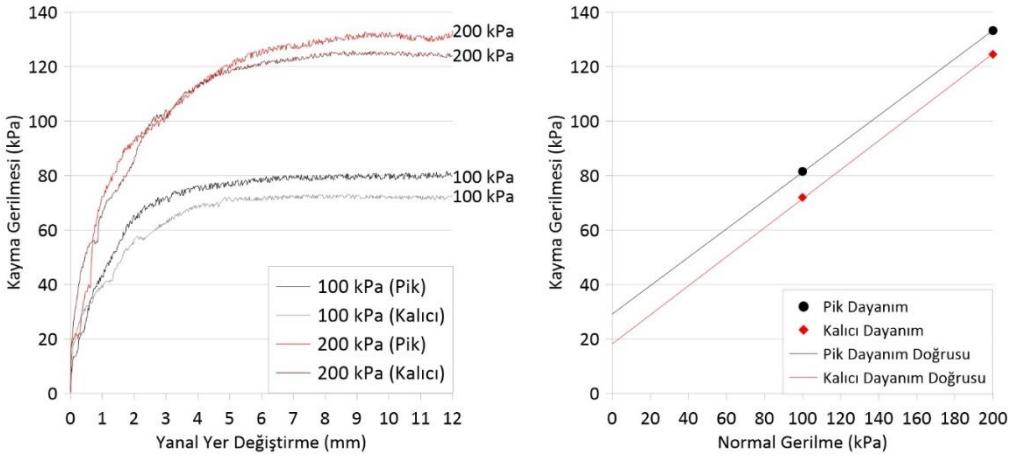


c

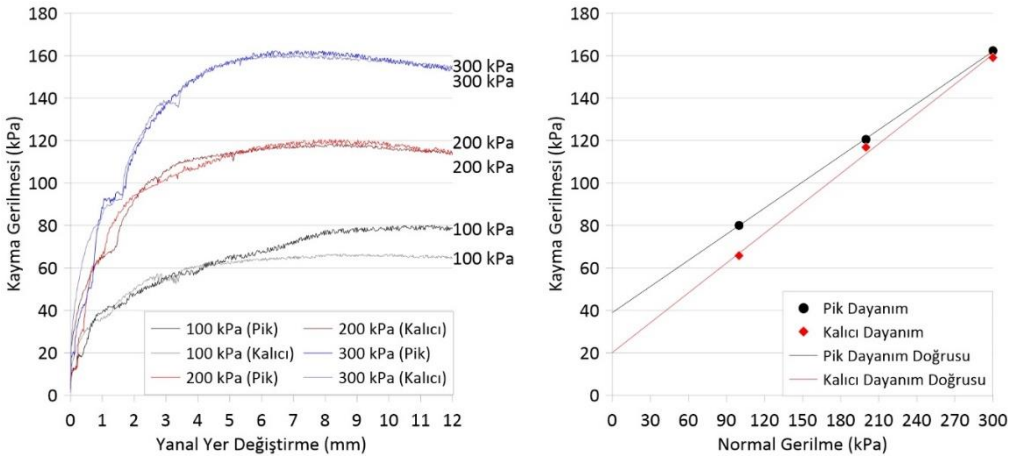
Şekil 5.3. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

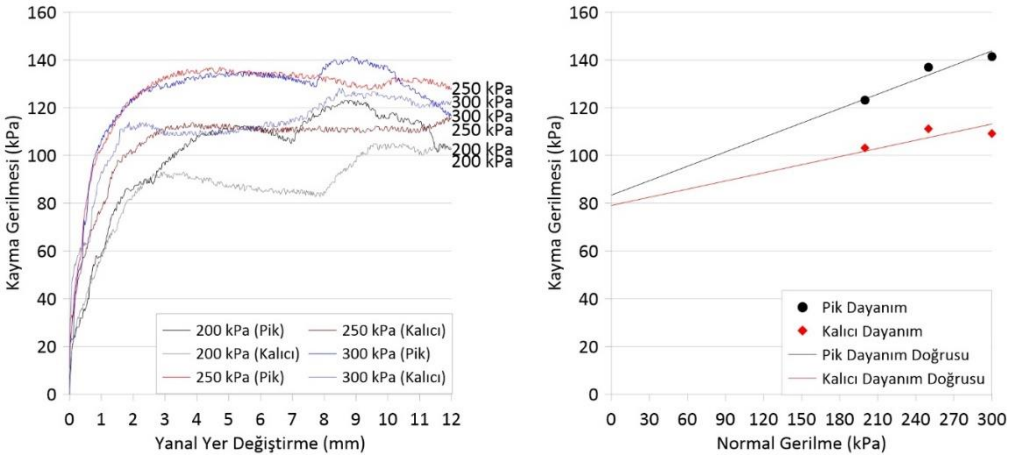


b

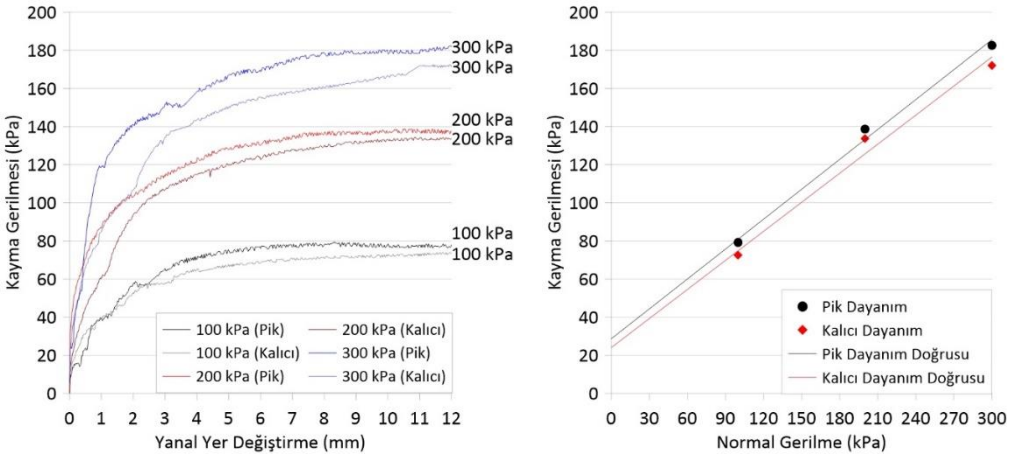


c

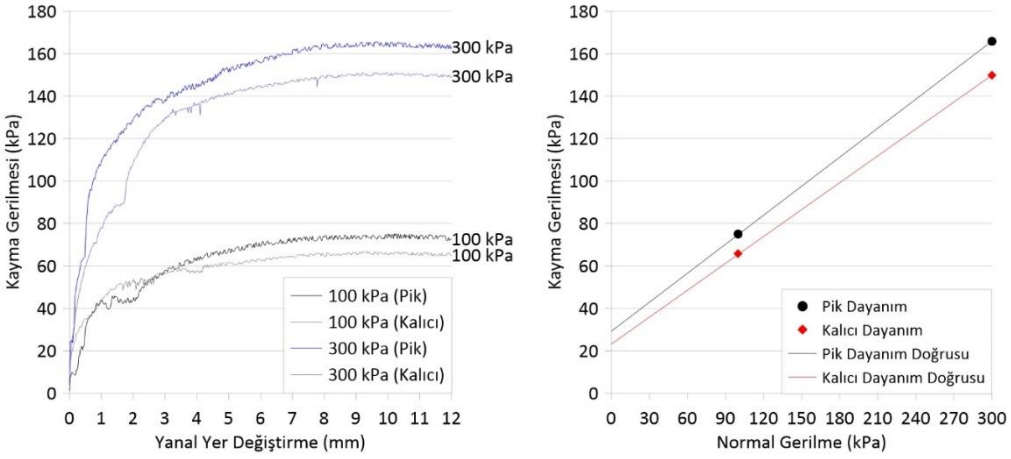
Şekil 5.4. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0,02 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

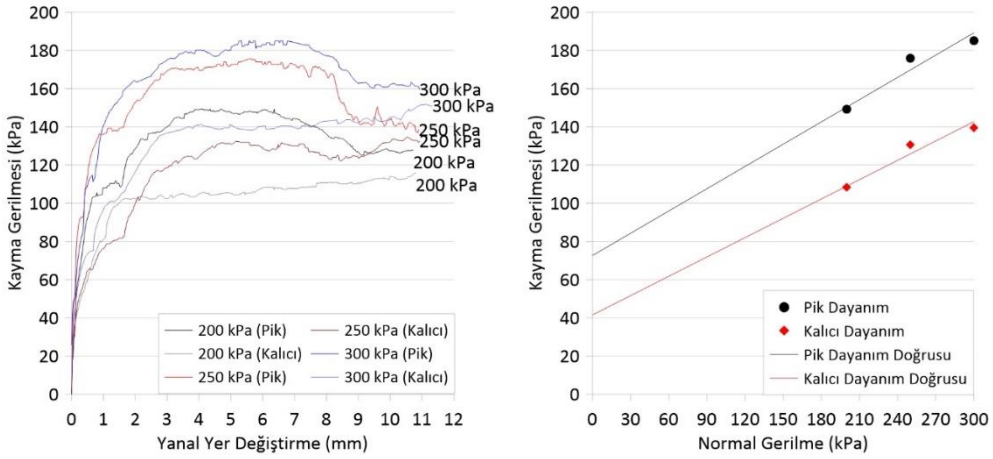


b

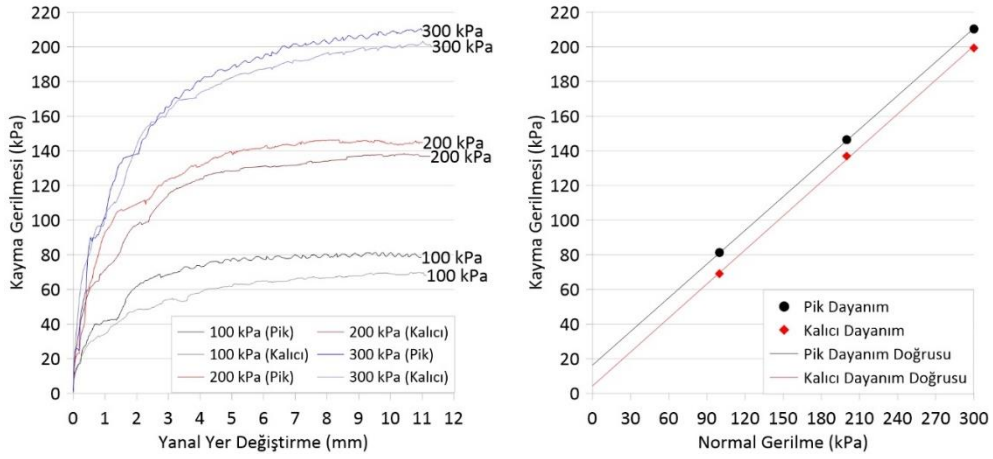


c

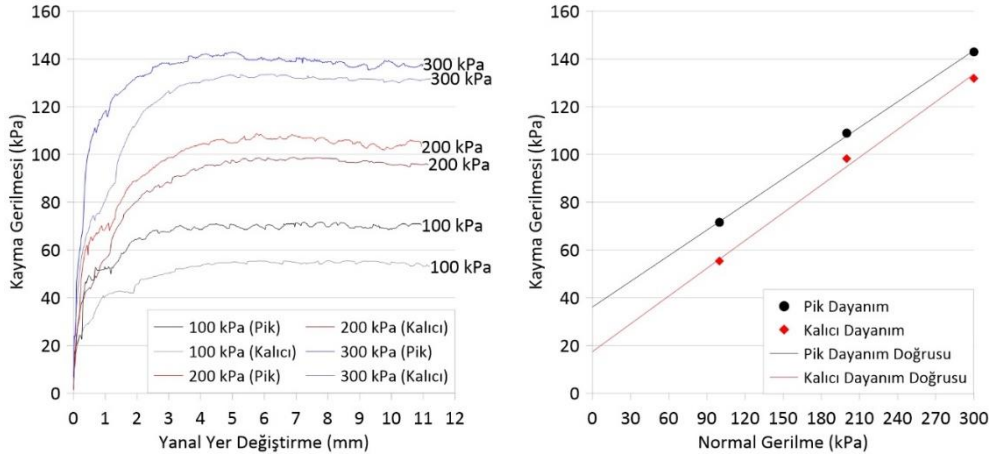
Şekil 5.5. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0,1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a



b



c

Şekil 5.6. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 1 mm/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3

Tekrarlı direkt kesme kutusu makinesinde yapılan bütün deneylerin sonuçları Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Yüksek su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri

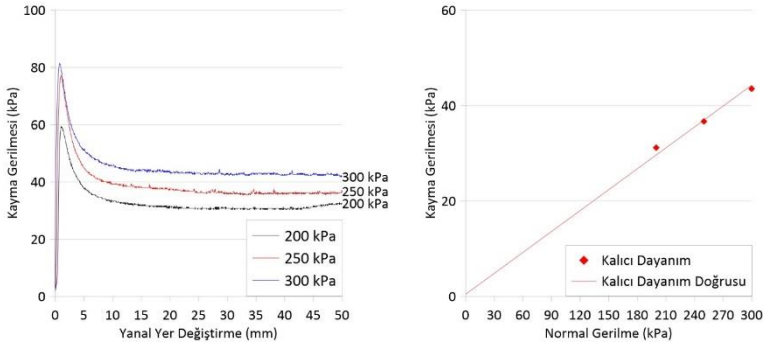
Numune Adı	Kesme Hızı	c_r	ϕ_r
N1 - İstanbul	0,02	3,24	11,29
	0,10	22,38	9,26
	1,00	21,03	9,08
N2 - Çanakkale	0,02	14,21	28,89
	0,10	8,09	29,64
	1,00	64,93	12,93
N3 - Eskişehir	0,02	11,08	23,03
	0,10	1,76	28,15
	1,00	4,24	28,14

Çizelge 5.2. Düşük su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri

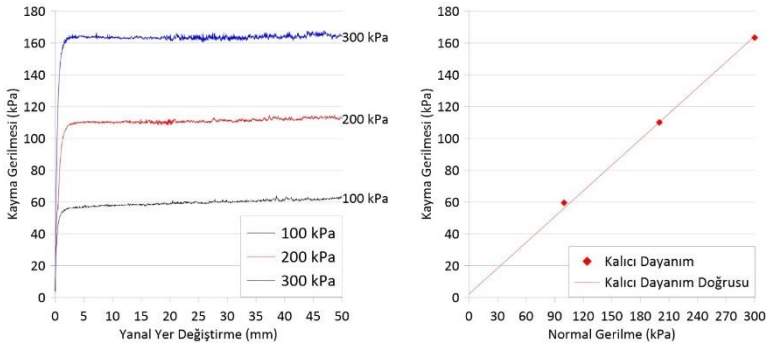
Numune Adı	Kesme Hızı	c_r	ϕ_r
N1 - İstanbul	0,02	4,20	14,83
	0,10	79,10	6,48
	1,00	41,52	18,64
N2 - Çanakkale	0,02	18,21	28,05
	0,10	24,06	26,94
	1,00	4,27	33,19
N3 - Eskişehir	0,02	20,12	25,10
	0,10	23,18	22,90
	1,00	17,46	21,18

5.2. Halka Kesme Deneyi Sonuçları

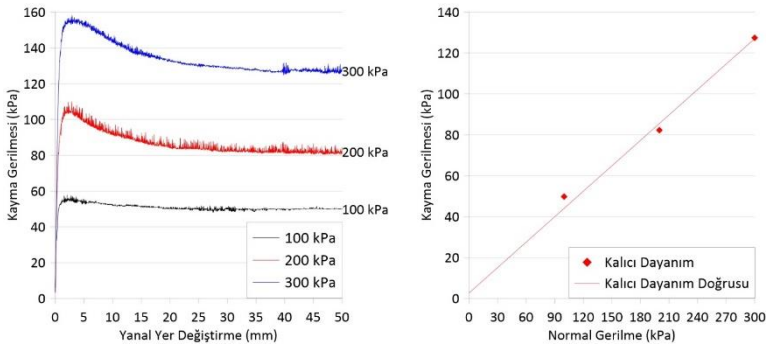
Numunelerin farklı değişkenlere olan tepkilerinin görülebilmesi için her bir grafik, başlangıç su muhtevası tipleri ve kesme hızları aynı olan farklı numunelerin deney serilerini içermektedir. Bu bağlamda oluşturulan gerilme – yer değiştirme grafikleri ile göçme zarfları Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de görülebilir.



a

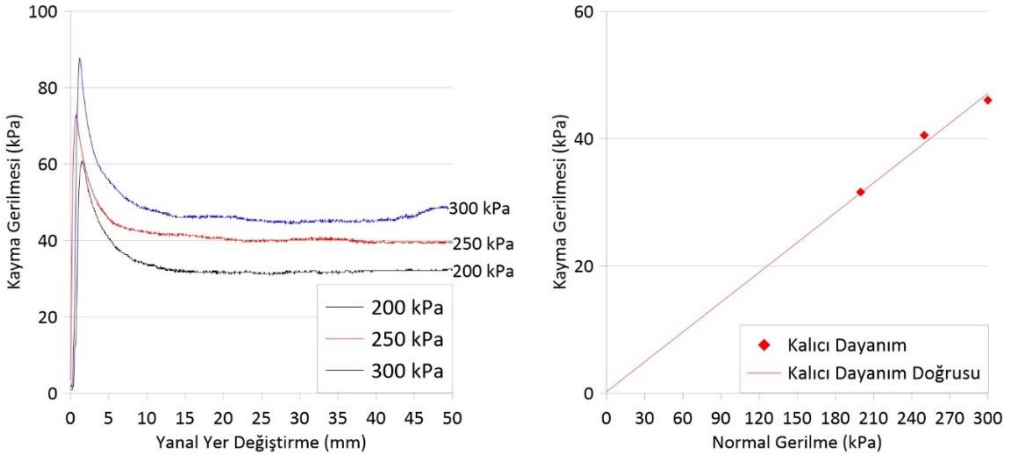


b

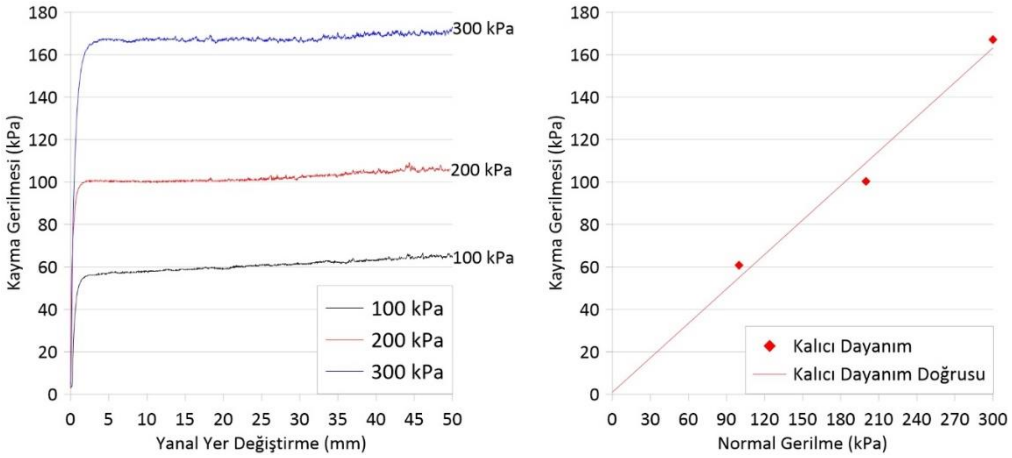


c

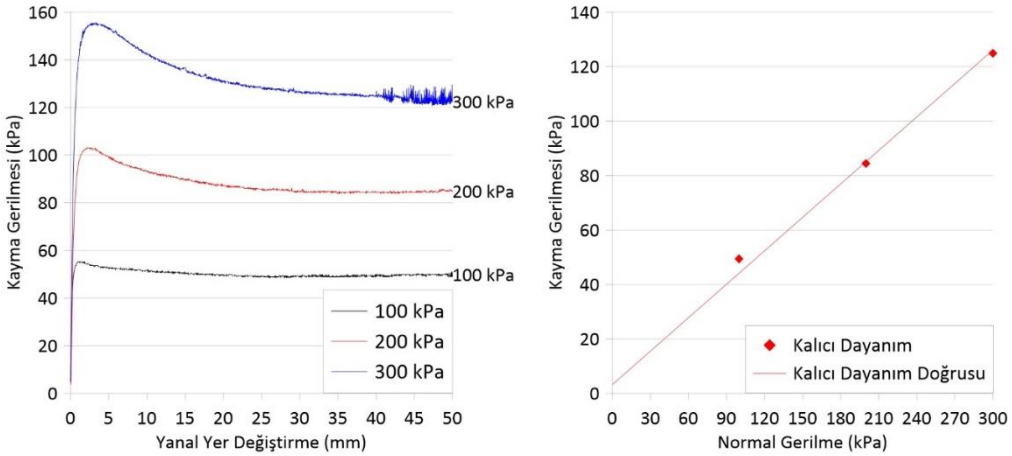
Şekil 5.7. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0,027 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

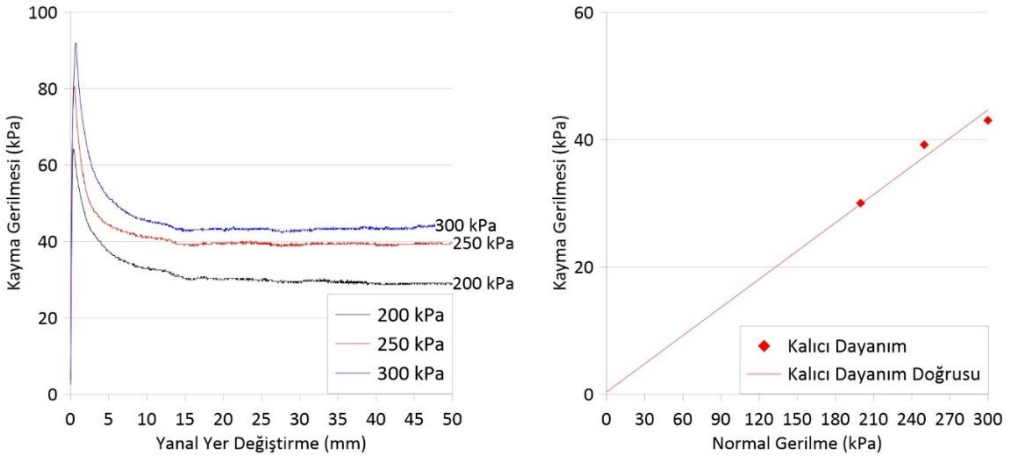


b

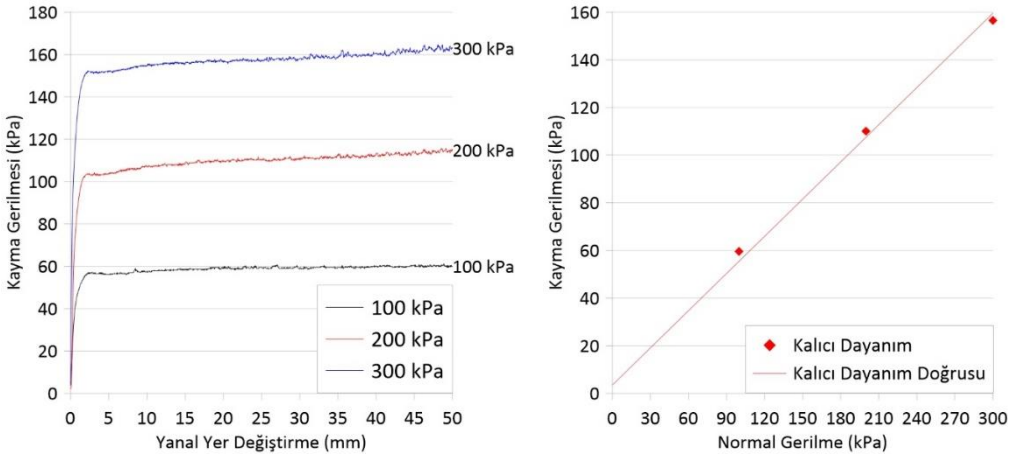


c

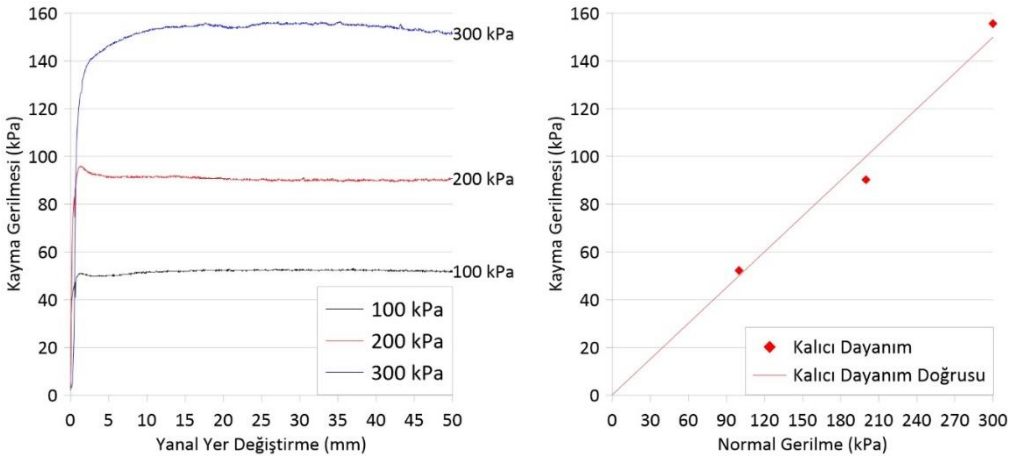
Şekil 5.8. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 0,135 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

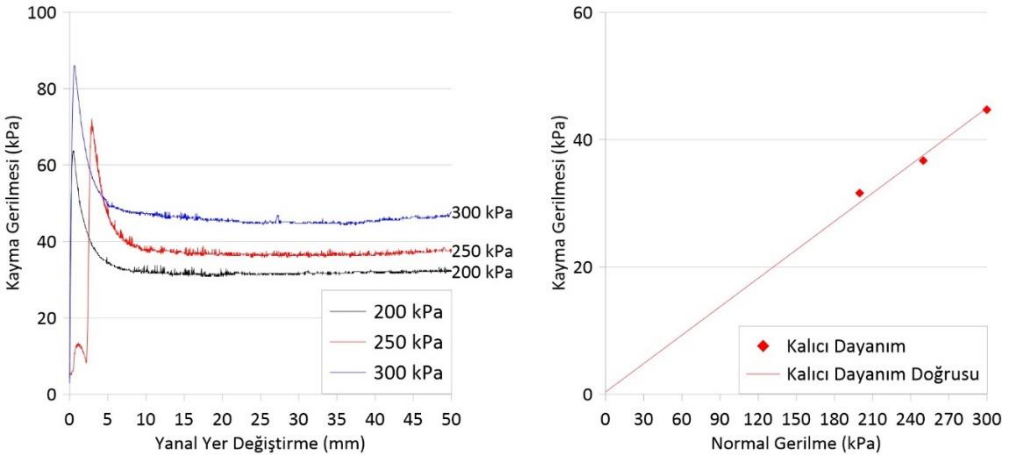


b

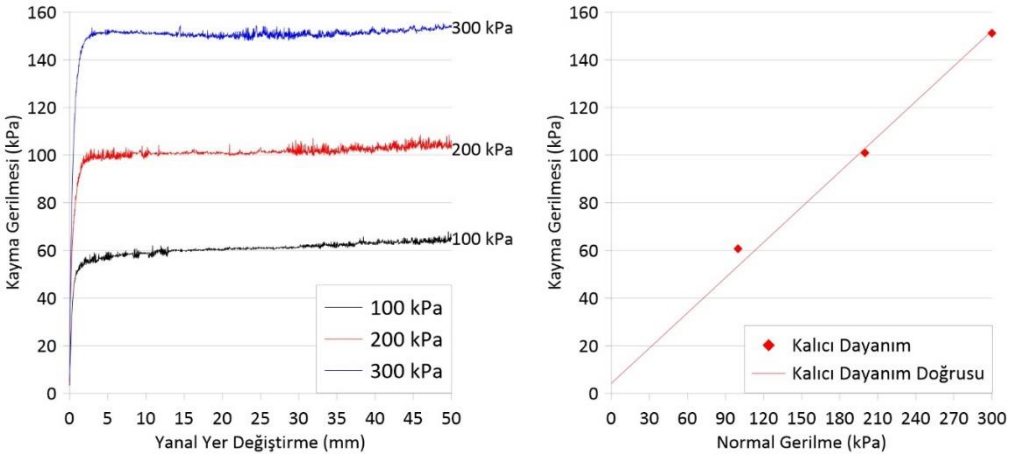


c

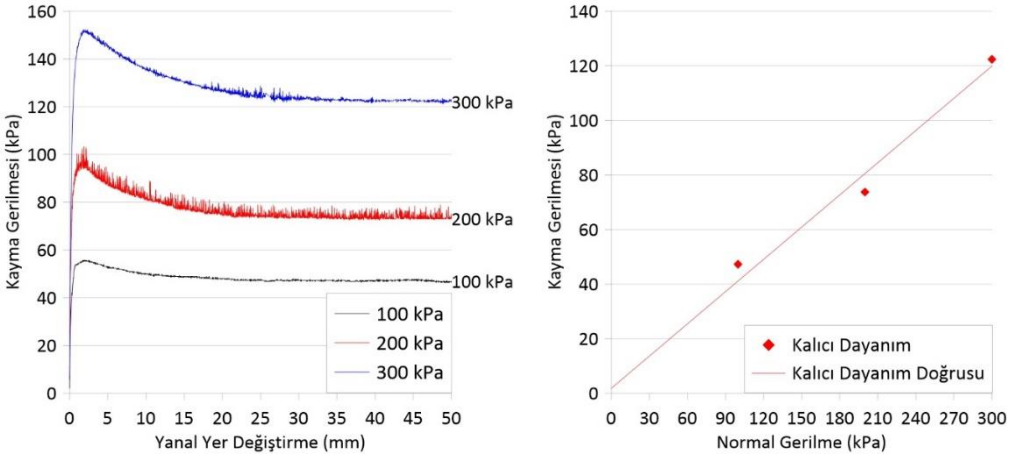
Şekil 5.9. Yüksek su muhtevasında hazırlanan ve 1,35 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

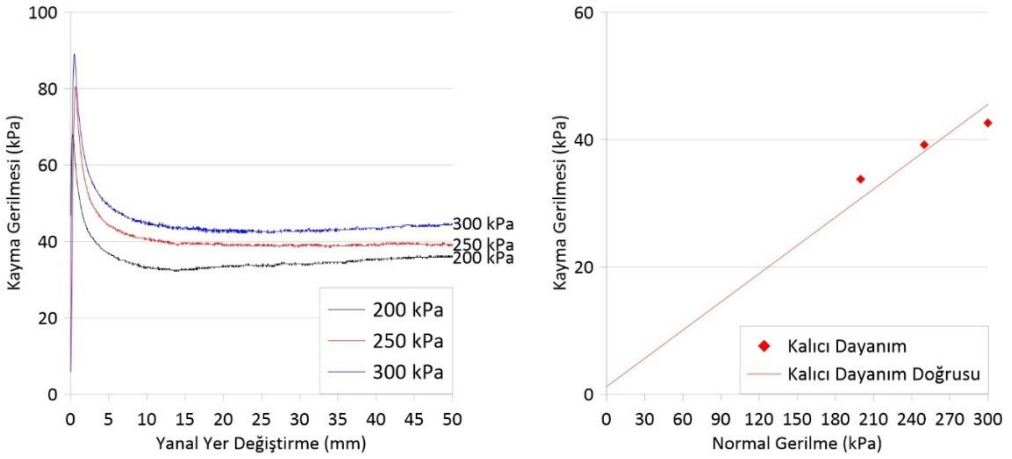


b

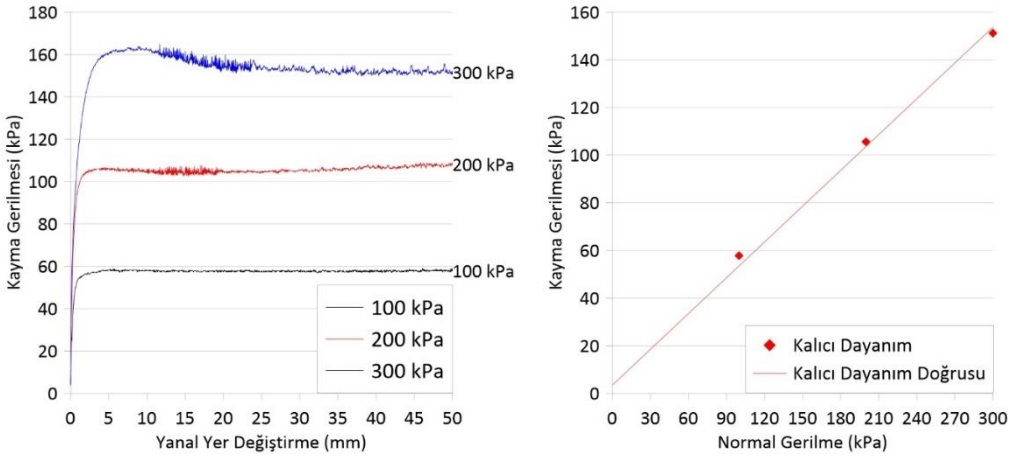


c

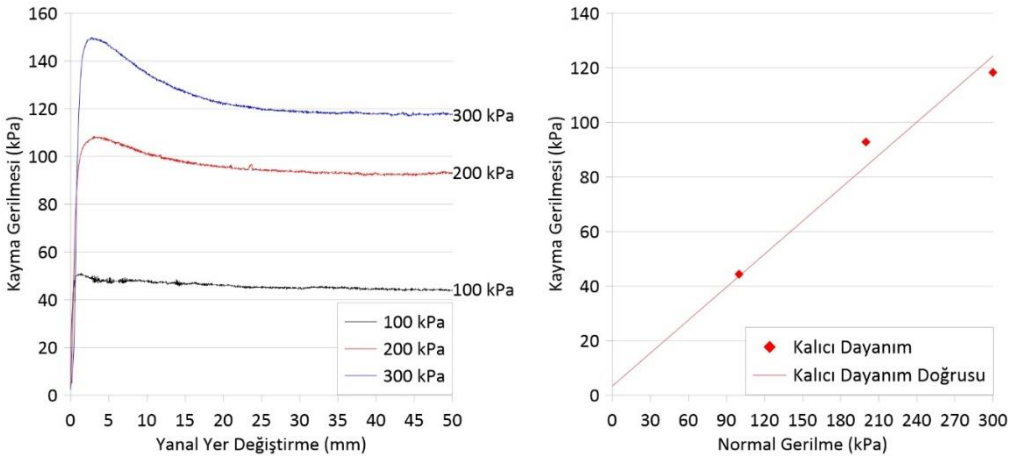
Şekil 5.10. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0,027 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a

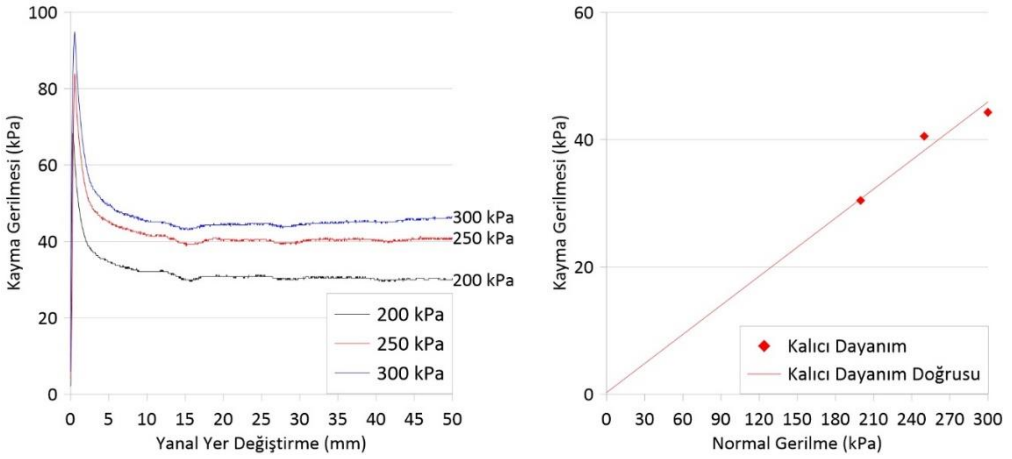


b

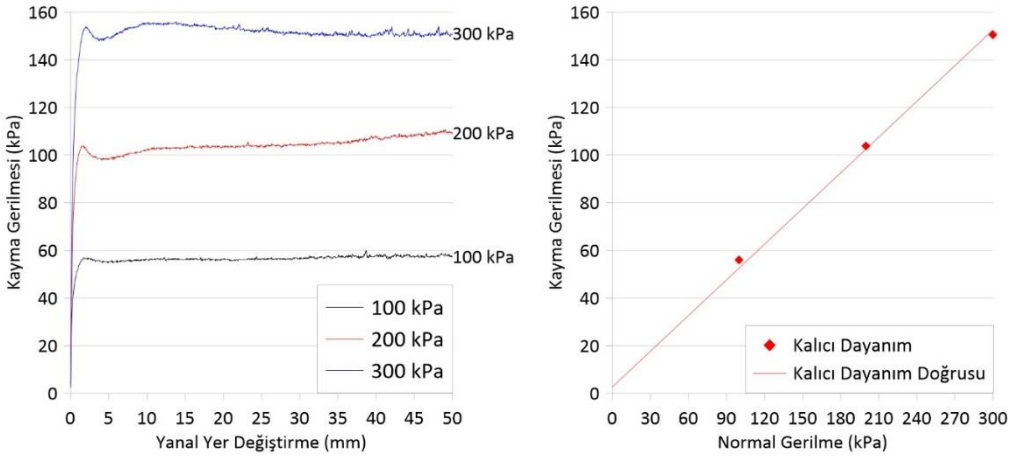


c

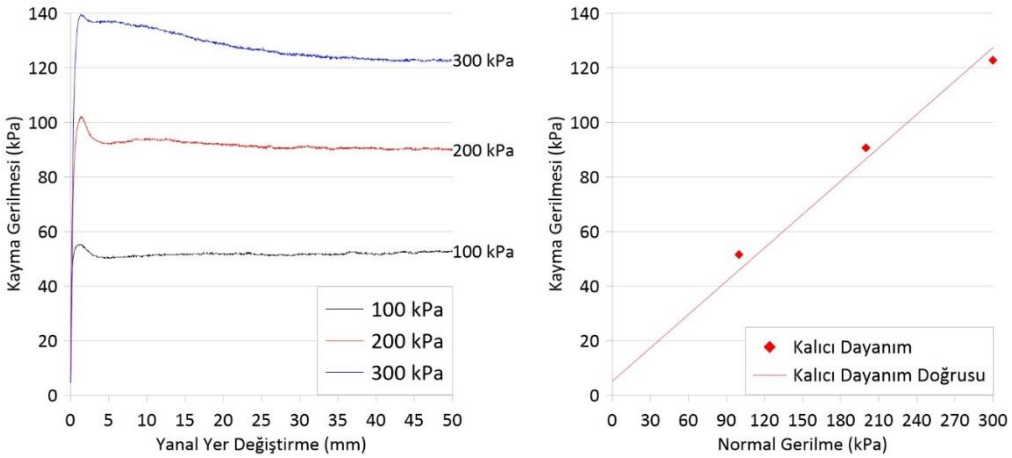
Şekil 5.11. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 0,135 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3



a



b



c

Şekil 5.12. Düşük su muhtevasında hazırlanan ve 1,35 der/dak kesme hızında yapılan deney sonuçları: a) N1 b) N2 c) N3

Halka kesme makinesinde yapılan bütün deneylerin sonuçları Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'de sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Yüksek su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri

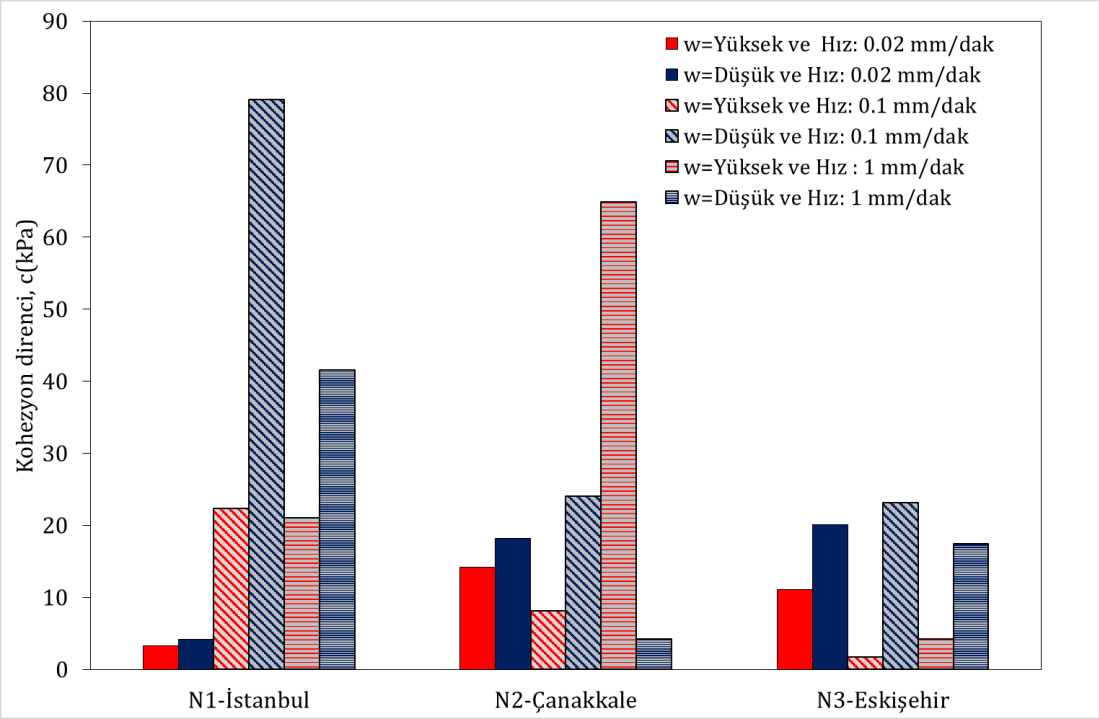
Numune Adı	Kesme Hızı	c_r	ϕ_r
N1 - İstanbul	0,027	0,46	8,31
	0,135	0,24	8,88
	1,350	0,35	8,40
N2 - Çanakkale	0,027	2,15	28,39
	0,135	0,94	28,41
	1,350	3,49	27,49
N3 - Eskişehir	0,027	2,67	22,52
	0,135	3,22	22,28
	1,350	0,21	26,52

Çizelge 5.4. Düşük su muhtevasında hazırlanan numunelerin kesme hızına bağlı kalıcı dayanım parametreleri

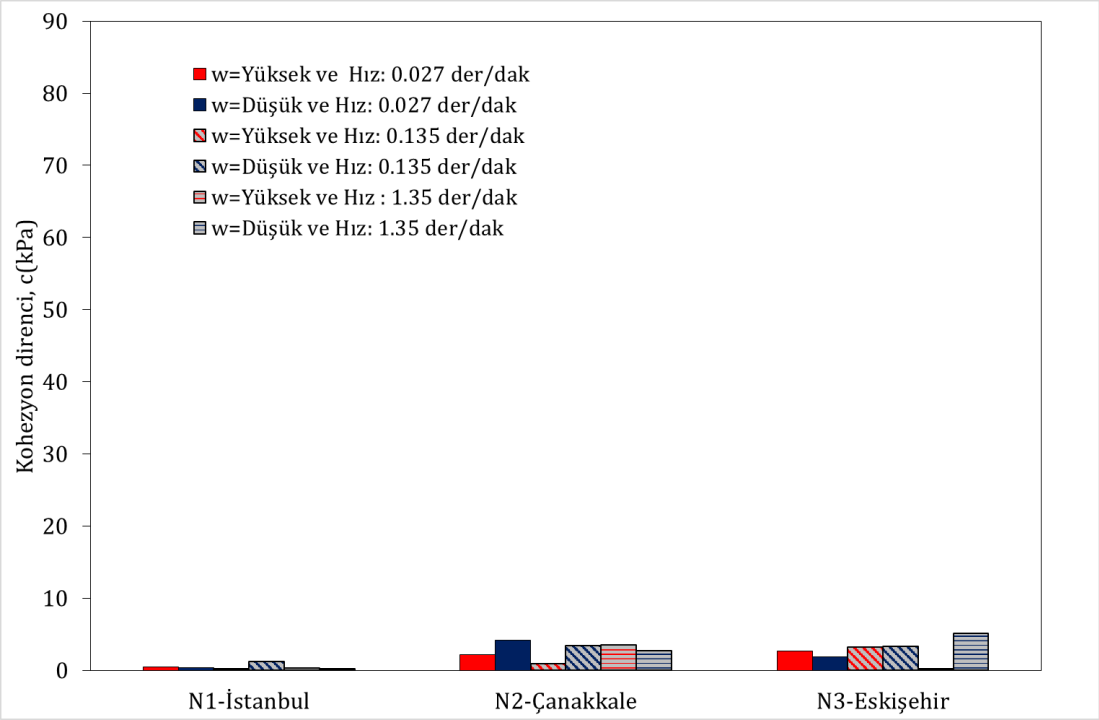
Numune Adı	Kesme Hızı	c_r	ϕ_r
N1 - İstanbul	0,027	0,36	8,46
	0,135	1,20	8,41
	1,350	0,26	8,65
N2 - Çanakkale	0,027	4,19	26,26
	0,135	3,45	26,61
	1,350	2,70	26,54
N3 - Eskişehir	0,027	1,82	21,49
	0,135	3,36	21,95
	1,350	5,11	22,18

5.3. Deney Yöntemlerinin Karşılaştırılması

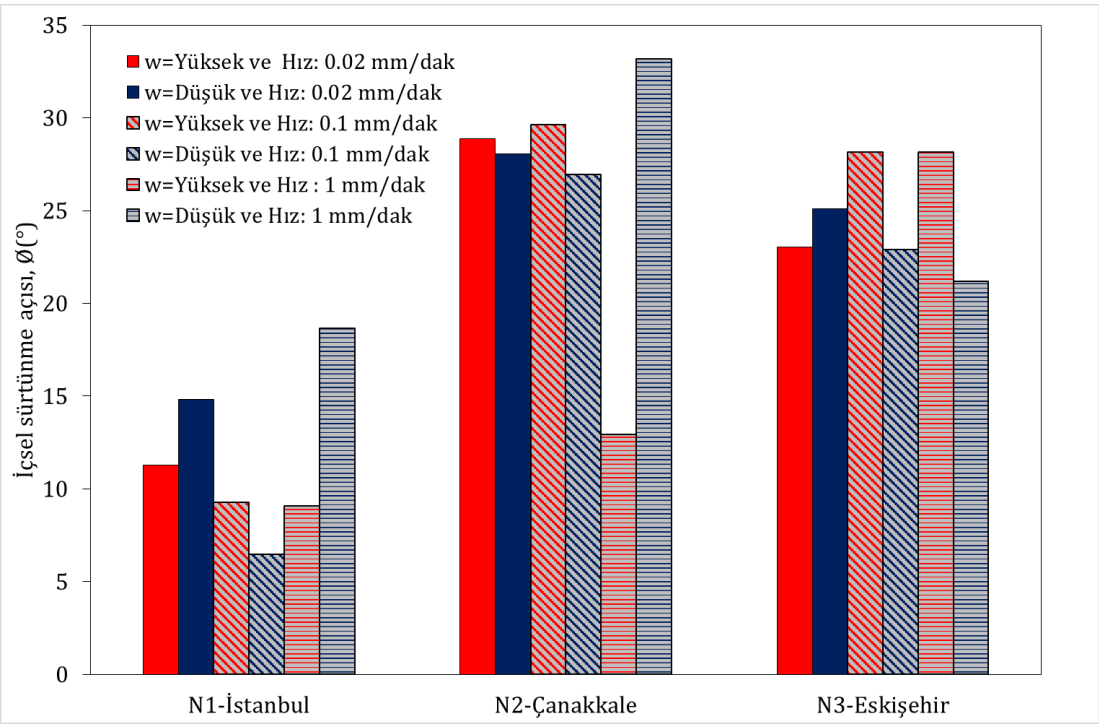
Kalıcı kayma dayanımları bulunurken tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ile halka kesme deneyleri kullanılmıştır. Yapılmış olan deneyler sonucunda her iki makinenin çalışma prensiplerinden hareketle farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Bulunmuş olan kalıcı kayma dayanım parametrelerinden kohezyon ve içsel sürtünme açılarının daha kolay değerlendirilebilmesi için Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 oluşturulmuştur.



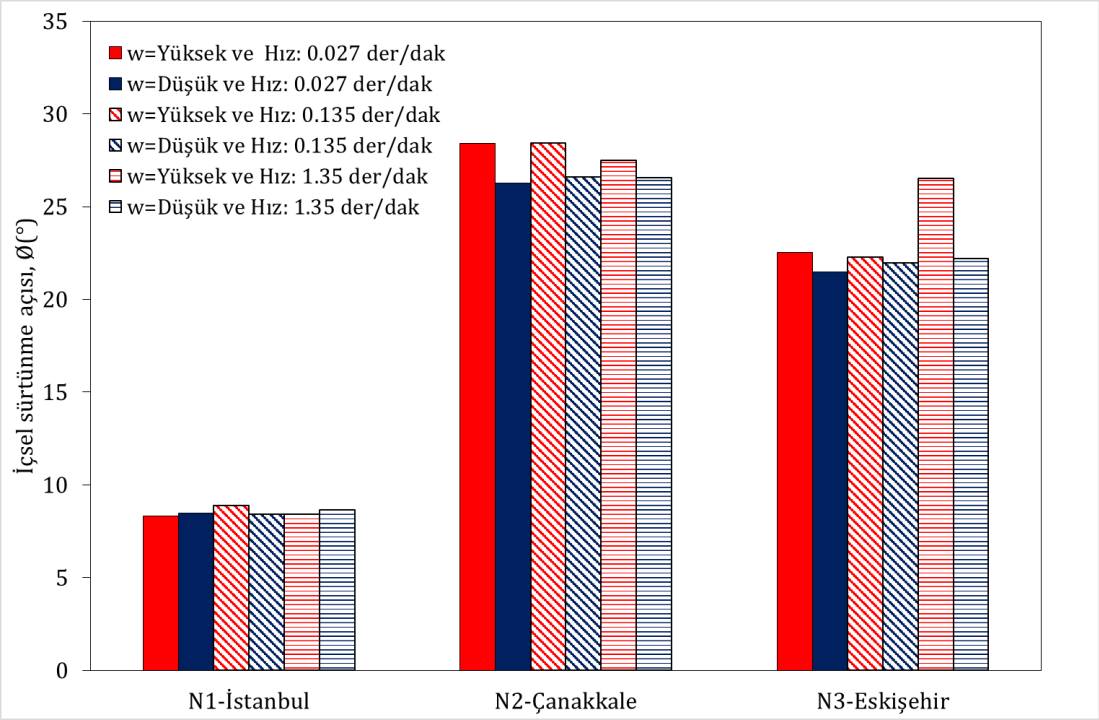
Şekil 5.13. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kohezyon direncinin su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi



Şekil 5.14. Halka kesme deneylerinde kohezyon direncinin su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi



Şekil 5.15. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kalıcı içsel sürtünme açısının su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi



Şekil 5.16. Halka kesme deneylerinde kalıcı içsel sürtünme açısının su muhtevası ve kesme hızına göre değişimi

Kalıcı kohezyon değerlerinin sıfır veya sıfıra yakın bir değer alması gerekmektedir. Pratikte kohezyon değerlerinin sıfır olamayacağı bilindiğinden dolayı kalıcı kayma dayanım parametreleri belirlenirken kohezyon değeri olabildiğinde sıfıra yaklaşmalıdır. Deneylerden hareketle oluşturulan grafikler incelendiğinde bu şartı halka kesme deneyleri rahatlıkla sağlarken, tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kohezyon değerlerinde sıfıra yakın çıkanların olmasının yanı sıra çok yüksek kohezyon değerleri görüldüğü de olmuştur. Halka kesme deneylerinde kohezyon değerlerinde herhangi bir sıkıntı görülmemiştir. Fakat tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde büyük bir çoğunlukla başlangıç su muhtevası düştükçe kohezyon değerinde artış olmuştur.

Halka kesme deneylerinde kalıcı içsel sürtünme açıları incelendiğinde her numune kendi başlangıç su muhtevaları içinde değerlendirildiğinde tüm hızlarda bir istisna dışında 1°'den daha küçük sapmalar gözlenmiştir. Halka kesme deneylerindeki tüm kalıcı içsel sürtünme açısı değerleri göz önüne alındığında, yine tek bir istisna dışında aradaki fark 2,5°'yi geçmemektedir. Bu istisnai durum tek bir numunenin, tek bir başlangıç su

muhtevasında yüksek hızla gerçekleştirilen bir deney serisi olduğundan dolayı deney hızının kalıcı içsel sürtünme açısında bir sapmaya neden olduğu düşünülmektedir.

Fakat tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde bulunan kalıcı içsel sürtünme açıları incelendiğinde ise tutarlı sonuçlar elde edilememiştir. Kohezyon değerleri çok değişken olduğundan, kalıcı içsel sürtünme açıları arasındaki farklar büyük gelmektedir. Başlangıç su muhtevaları ve kesme hızları ele alınmadan tüm numuneler kendi arasında incelendiğinde, kohezyon değeri yaklaşık gelen deney serilerinde bulunan kalıcı içsel sürtünme açıları da yakın çıkmıştır. Kohezyonları çok yüksek çıkan deney serileri göz önüne alınmazsa, her numune kendi içinde değerlendirilmek üzere tüm deney serileri hesaba katıldığında kalıcı içsel sürtünme açıları arasındaki fark 4°'den az olmaktadır. Ortaya çıkan bu tutarsızlığın sebebinin kesme tekrarının yeterli gelmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

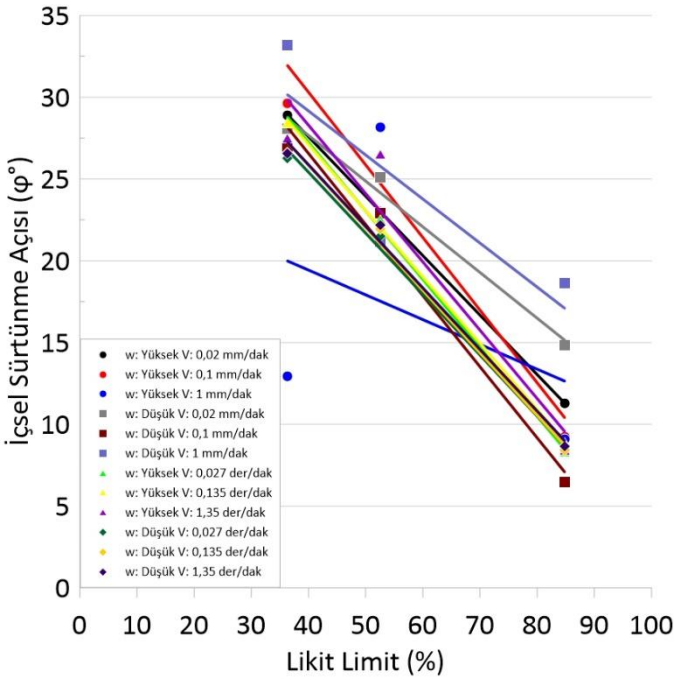
Bulunmuş olan kalıcı içsel sürtünme açıları her iki makine bazında karşılaştırıldığında ise halka kesme deneylerinde bulunan kalıcı içsel sürtünme açıları çok büyük bir çoğunlukla daha düşük çıkmıştır. Genel bir eğilimden söz edilememesinin sebebi ise bahsedilmiş olan kohezyon değerlerinin bir sonucu olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan iki adet kalıcı kayma parametrelerini belirleyen makine incelendiğinde bir sonuca ulaşılmıştır. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyinde oluşan büyük kohezyon değerleri, kalıcı içsel sürtünme açılarındaki tutarsızlıklar ve bu tür uyuşmazlıkların önüne geçebilmek adına her numunede kaç kesme tekrarının yapılması gerektiğinin bilenememesi bu deney yöntemini halka kesme deney yöntemine kıyasla daha az kullanışlı yapmaktadır. Öte yandan halka kesme deneyinin kolaylığı ve çok fazla işlem gerektirmeden sağlıklı sonuçlar vermesi bu deney yöntemini öne çıkarmaktadır.

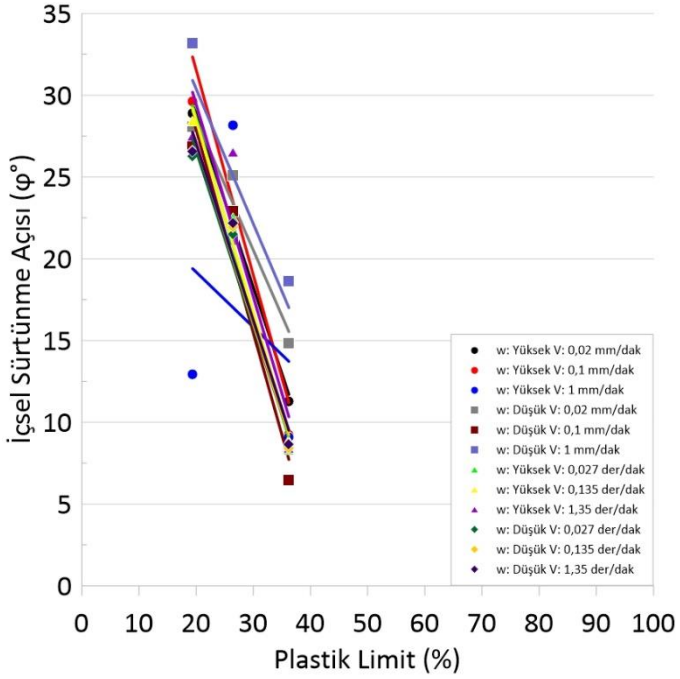
5.4. Deney Numunelerinin Karakteristik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Zeminin kayma dayanımlarını belirlerken kullanılan numunenin geoteknik özellikleri büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde, elde edilen içsel sürtünme açıları numunelerin likit limitleri, plastik limitleri, plastisite indisileri ve kil yüzdeleri ile karşılaştırılmıştır. Drenajlı kalıcı dayanım korelasyonlarında likit limit, kil mineralojisini ve kil danelerinin özelliklerini yansıtmaktadır (Stark ve Eid, 1994). Bu nedenle likit limit, kalıcı kayma dayanımının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

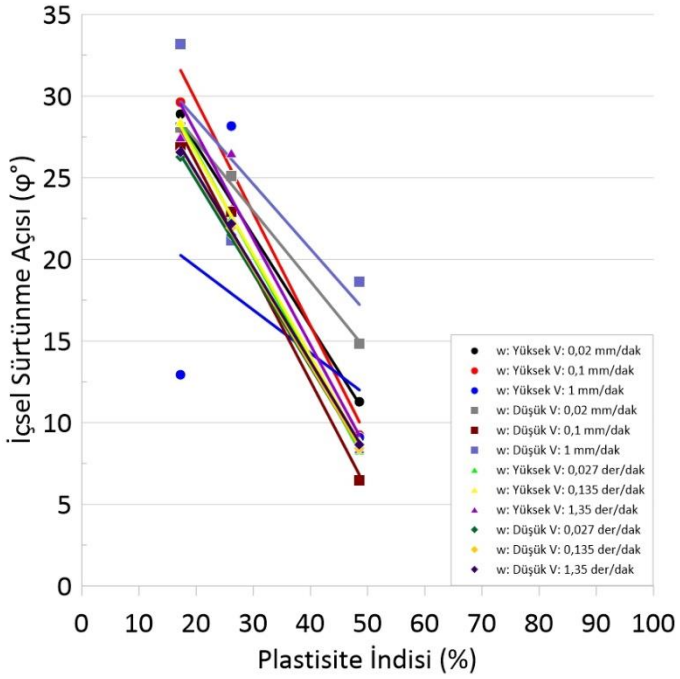
Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de görüldüğü üzere numuneler hangi makinede çalışılırsa çalışılsın, başlangıç su muhtevaları ve kesme hızları ne olursa olsun limit limitin, plastik limitin, plastisite indisinin ve kil yüzdesinin artmasıyla içsel sürtünme açıları düşüş göstermiştir.



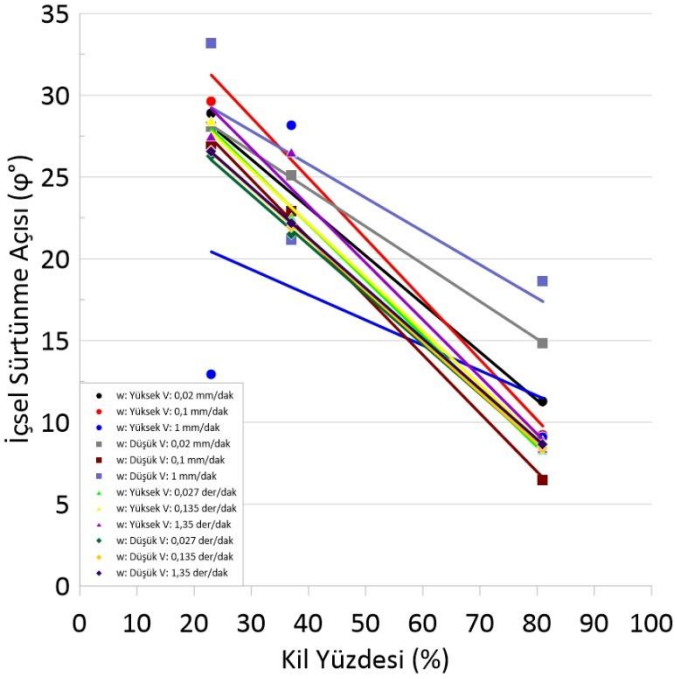
Şekil 5.17. Likit limit – içsel sürtünme açısı ilişkisi



Şekil 5.18. Plastik limit – içsel sürtünme açısı ilişkisi



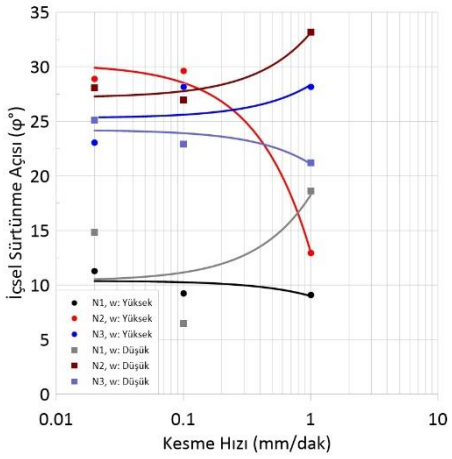
Şekil 5.19. Plastisite indisi – içsel sürtünme açısı ilişkisi



Şekil 5.20. Kil yüzdesi – içsel sürtünme açısı ilişkisi

5.5. Kesme Hızının Kayma Parametrelerine Etkisi

Deneylerden elde edilen içsel sürtünme açıları, logaritmik ölçekte kesme hızı ile kıyaslanmıştır. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinden elde edilen veriler sayesinde oluşturulan grafik Şekil 5.21'de sunulmuştur.



Şekil 5.21. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi kesme hızı – içsel sürtünme açısı ilişkisi

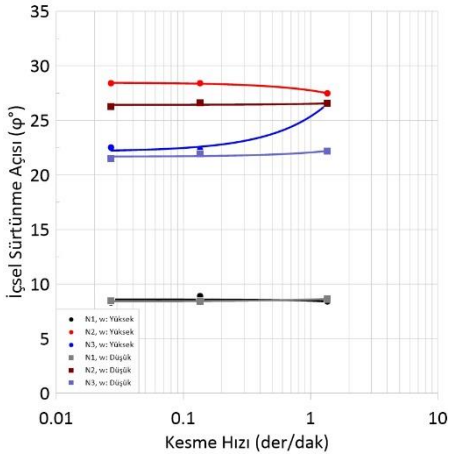
Grafikte de görüldüğü üzere yüksek kil içerikli N1 numunesi yüksek başlangıç su muhtevasında hazırlandığında kesme hızının artması ile içsel sürtünme açısı yaklaşık olarak 1,5° azalmıştır. Düşük başlangıç su muhtevasında ise kesme hızı artınca içsel sürtünme açısı önce bir düşüş yaşamış fakat sonradan tekrar yükselerek genel olarak yukarı yönlü bir eğilim göstermiştir. Ancak bu yönelimin sebebinin ortaya çıkan yüksek kohezyonlardan kaynaklanabileceği göz önüne alınmalıdır çünkü elde edilmiş olan en düşük ve en yüksek içsel sürtünme açıları arasındaki fark neredeyse 12,5°'dir.

N2 numunesi ele alındığında, yüksek başlangıç su muhtevasında düşük ve orta hızlar arasında 1°'den daha küçük bir fark çıkarken yüksek kesme hızında bu fark fazlasıyla artarak genel eğilimi düşüşe geçirmiştir. Yüksek kesme hızında oluşan yüksek kohezyon değeri değerlendirildiğinde, kohezyonun yüksek çıkmasının sebebinin kesme hızından dolayı oluşabileceği incelenmelidir. Düşük başlangıç su muhtevasında düşük ve orta kesme hızlarından elde edilen içsel sürtünme açıları arasında 1,5°'ye bile ulaşmayan bir fark varken, yüksek kesme hızı dahil edildiğinde bu fark neredeyse 6,5°'ye ulaşmaktadır.

Son olarak N3 numunesi incelendiğinde yüksek başlangıç su muhtevasında hazırlanan numunelerde, kesme hızı arttıkça içsel sürtünme açıları arasındaki fark yaklaşık olarak 5° olmaktadır. Düşük su muhtevasında hazırlanan numunelerde ise kesme hızı arttıkça içsel sürtünme açısı kademeli olarak azalmakta ve aradaki fark yaklaşık 4°'ye kadar değişmektedir.

Genel olarak bakıldığında, kohezyon değerleri her deney serisinde tam olarak sıfıra yaklaşmadığından dolayı sonuçlar arasında ortak bir eğilim gözlenememiştir. Fakat her numune kendi içinde incelendiği zaman kohezyon değeri birbirine yakın olan deney serilerinde, kesme hızları ne olursa olsun, elde edilen içsel sürtünme açıları arasında çok büyük farklar görülmemektedir. Buradan da deneyler gerçekleştirilirken numunenin kohezyon değeri her deney serisinde sıfıra yaklaştırılıp, deney serilerinin hepsinde eş bir kohezyon değerine ulaşılırsa içsel sürtünme açıları arasındaki farkların azalıp sağlıklı bir eğilim gözlenebileceği sonucu çıkarılmaktadır.

Halka kesme deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açılarının kesme hızı ile olan etkileşim grafiği logaritmik ölçekte hazırlanmış ve Şekil 5.22'de gösterilmiştir.

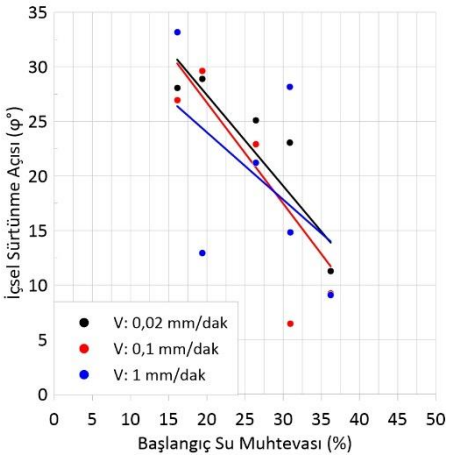


Şekil 5.22. Halka kesme deneyi kesme hızı – içsel sürtünme açısı ilişkisi

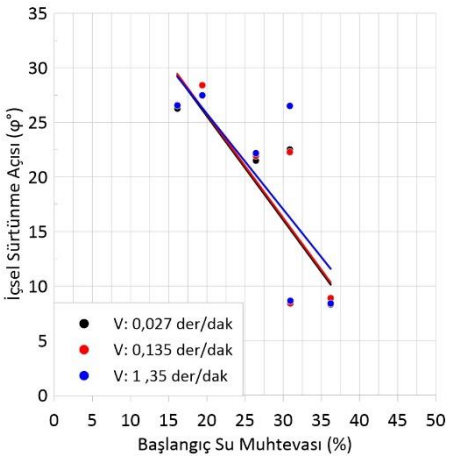
Halka kesme deneylerinde daha stabil sonuçlar çıktığı grafikte açıkta görülmektedir. N1 numunesinde gerçekleştirilen tüm deney serileri göz önüne alındığında, içsel sürtünme açıları arasındaki fark 1°'yi geçmemektedir. N2 numunesi incelendiğinde aynı muhtevalar içinde, içsel sürtünme açıları 1°'den fazla değişim göstermezken tüm deney serileri incelendiğinde bu fark neredeyse 2,5°'ye ulaşmaktadır. N3 numunesinde yüksek su muhtevasında hazırlanıp yüksek hızda kesilen deney serisini göz ardı edersek, geriye kalan tüm deney serileri ele alındığında içsel sürtünme açıları arasındaki fark yaklaşık 1°'ye denk gelmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki halka kesme deneylerinde kesme hızının içsel sürtünme açıları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gibi, burada bulunan sonuçlar daha sağlıklı ve güvenilirdir.

5.6. Su İçeriğinin Kayma Parametrelerine Etkisi

İçsel sürtünme açılarının kesme hızları esas alınarak başlangıç su muhtevaları ile olan etkileşimini gösteren Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 oluşturulmuştur.



Şekil 5.23. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyi başlangıç su muhtevası – içsel sürtünme açısı ilişkisi



Şekil 5.24. Halka kesme deneyi başlangıç su muhtevası – içsel sürtünme açısı ilişkisi

Şekillerden de anlaşılabileceği üzere artan başlangıç su muhtevası ile birlikte hem tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde hem de halka kesme deneylerinde içsel sürtünme açıları düşmüştür. Tekrarlı direkt kesme kutusu verilerinde daha düzensiz bir dağılım olduğundan dolayı çizilen teğetler birbiri ile örtüşmese de halka kesme verilerinde teğetlerin örtüşmesi deney yöntemleri arasındaki farkı bir kez daha gözler önüne sermektedir. Buna rağmen tüm deney serilerinde başlangıç su muhtevasının artması ile içsel sürtünme açılarının düşmesi, savunulan bu görüşü desteklemektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Zeminlerin kalıcı dayanım parametrelerinin belirlenmesi inşaat mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Daha önceden kayma hareketinin meydana geldiği şevler ile fisürlü ve sert kil içerikli şevlerin stabilite tahkiklerinde kalıcı dayanım parametreleri büyük önem arz etmektedir. Aşırı konsolide killerde ve sıkı kumlarda dayanım değeri önce bir pik yapmakta, daha sonra artan kayma deformasyonları ile kayma gerilmesi azalarak sabit bir değer almaktadır. Sabit kalan bu dayanım değeri, kalıcı kayma dayanımı olarak adlandırılmaktadır ve bu değer mineraloji, efektif gerilme ve kesme hızı gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Kalıcı kayma dayanım parametreleri belirlenirken tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri en sık kullanılan deney yöntemlerindendir. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinin ekonomik ve makineye ulaşılabilirliğin kolay olması açısından bu deney yöntemi sıkça tercih edilmektedir. Fakat kesme kutusunda kaymaya maruz bırakılan numunenin en zayıf noktasında yenilmesini sağlamak yerine belirli bir düzlem boyunca kesilmesi, bu deney yönteminde en doğru sonuca ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Öte yandan çoğu zemin büyük deformasyonlar sonucu kalıcı dayanıma ulaştığından dolayı, neredeyse sınırsız deformasyon avantajı sunan halka kesme deneyi daha güvenilir değerler sunmaktadır. Halka kesme deneylerinin uygulama kolaylığı ve vermiş olduğu sağlıklı sonuçlar, halka kesme deneyini daha tercih edilebilir kılmaktadır.

Yapılmış olan bu çalışmada üç adet kil içerikli zemin numunesi üzerinde tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri ve halka kesme deneyleri yapılmıştır. Örselenmiş olan numuneler, yüksek ve düşük olmak üzere iki farklı başlangıç su muhtevasında hazırlanmıştır. Numune özelliklerine göre 100 kPa, 200 kPa, 250 kPa ve 300 kPa normal gerilmeler altında konsolide edildikten sonra numunelere kesme işlemi uygulanmıştır. Kesme hızının kayma dayanım parametrelerine olan etkisini incelemek adına iki farklı makinede de yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç farklı kesme hızı kullanılmıştır. Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde numuneler 0,02 mm/dak, 0,1 mm/dak ve 1 mm/dak

hızında kesilmiştir. Makineler arası kesme hızı farklılıkları oluşmaması adına tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde kullanılmış olan kesme hızları gerekli dönüşümler yapılarak halka kesme deneylerine adapte edilmiştir. Bunun sonucunda halka kesme deneylerinde 0,027 der/dak, 0,135 der/dak ve 1,35 der/dak kesme hızlarında çalışılmıştır. Tekrarlı direkt kesme kutusun deneylerinde numuneler, her bir kesim 12 mm olmak üzere toplamda 24 mm yanal deformasyon yapacak şekilde çift kesime maruz bırakılmıştır ve çift kesim sonrası kalıcı dayanıma ulaşıldığı varsayılmıştır. Halka kesme deneylerinde her bir numuneye 50 mm deformasyon yaptırılarak kalıcı dayanımlarına ulaştırılmıştır.

Çalışmanın amacı numune özelliklerinin, başlangıç su muhtevalarının, kesme hızının ve kullanılmış olan deney yöntemlerinin kalıcı kayma dayanım parametreleri üzerindeki etkisini incelemektir ve bulunmuş olan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Başlangıç su muhtevası, kesme hızı ve kullanılmış olan deney yöntemi fark etmeksizin, likit limit, plastik limit, plastisite indisi ve kil yüzdesi arttıkça içsel sürtünme açıları azalmıştır.
- Tekrarlı direkt kesme kutusu deneylerinde genel olarak düşük ve orta kesme hızlarında gerçekleştirilen deneylerden bulunan içsel sürtünme açıları arasındaki fark yaklaşık olarak 1,5°dir.
- Tekrarlı direkt kesme kutusu deneyleri sonucunda kohezyon gözlenen numunelerde, her numune kendi içinde değerlendirilmek üzere, yaklaşık kohezyon değeri veren deney serilerinden elde edilen içsel sürtünme açıları birbirine yaklaşık gelmektedir.
- Halka kesme deneylerinde kesme hızı arttıkça içsel sürtünme açıları arasında yaklaşık olarak 1° ile 2,5° arasında fark oluşmaktadır. Genel olarak bakıldığında ise kesme hızının içsel sürtünme açıları üzerinde herhangi bir etkisi gözlenmemiştir.
- Kullanılmış olan deney yöntemi fark etmeksizin başlangıç su muhtevası arttıkça içsel sürtünme açısı düşmüştür.
- Çok büyük bir çoğunlukla, halka kesme deneylerinden elde edilmiş olan içsel sürtünme açıları, tekrarlı direkt kesme kutusundan elde edilen içsel sürtünme açılarından daha düşük çıkmıştır.

- Elde edilen veriler değerlendirildiğinde halka kesme deneylerinden bulunan kayma dayanım parametrelerinin daha güvenilir olduğu anlaşılmıştır.

Bütün bulgular incelendiğinde tekrarlı direkt kesme kutusunda deney yapılırken, kohezyon değeri sıfıra yaklaşana kadar numuneler kesilmeye devam edilmelidir. Killi zeminlerin geoteknik özelliklerinin ve kesme hızının kalıcı kayma dayanımları üzerine etkisinin daha detaylı incelenebilmesi için, daha farklı numunelerde daha çeşitli kesme hızlarında deneyler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akış, E., 2021, Yüksek plastisiteli killerde rezidüel kayma direncinin direkt kesme deneyi sonuçları kullanılarak tayin edilmesi, Politeknik Dergisi, 24, 1, 39–44.

Akış, E., Mekael, A., Yılmaz, M. T., 2017, Yüksek plastisiteli kil numuneleri üzerinde tekrarlı direkt kesme deneyi ile rezidüel kayma dayanımı incelemesi, 7. Geoteknik Sempozyumu, 115–126.

Ataç, A. E., 2009, Plastisitenin kalıcı kayma mukavemetine etkisi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 147 s.

Bardet, J.-P., 1997, Experimental soil mechanics, Prentice Hall Inc., p.266, 269 - 271, 361, 421, 422, 424, 427, 430, 431, 443, 444, 446, 449, 465.

Beren, M., 2014, Zemin kesme kutusu deneyinde kesme hızının zemin parametrelerine olan etkisinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 92 s.

Bhat, D. R., Yatabe, R., Bhandary, N. P., 2014, Slow shearing rates' effect on residual strength of landslide soils, Soil Behavior and Geomechanics, 236, 293–303.

Binarbaşı, Y., 2014, Killi zeminlerde deformasyona bağlı kayma mukavemetinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 255 s.

Bol, E., İspiroğlu, M., 2016, Direkt kesme kutusu deneyinde kesme hızının tayini, 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 977–985.

Carter, M., Bentley, S. P., 2016, Soil properties and their correlations, John Wiley & Sons Ltd., p.21, 26, 113 - 117, 118, 130 - 132.

Coduto, D. P., 2006, Geoteknik mühendisliği ilkeler ve uygulamalar, (Çev.M. Mollamahmutoğlu, K. Kayabalı), Gazi Kitabevi, s.465 - 468, 470, 472, 480, 485, 489, 495, 496, 498, 499 - 501, 503, 507, 513.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Craig, R. F., 2004, Craig's soil mechanics, Spon Press, p.71, 72, 95, 102, 106, 125, 126.

Dafalla, M. A., 2013, Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures, Advances in Materials Science and Engineering, 2013, 1–8.

Dewoolkar, M. M., Huzjak, R. J., 2005, Drained residual shear strength of some claystones from Front Range, Colorado, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131, 12, 1543–1551.

Hatipoğlu, M., İyisan, R., 2017, Yüksek plastisiteli killerin kalıcı kayma mukavemetine plastisitenin etkisi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32, 2, 313–322.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., Sheahan, T. C., 2015, Geoteknik Mühendisliğine Giriş, (Çev.A. Erken), Nobel Akademik Yayıncılık, s.508, 509, 511, 543, 563, 702, 704.

Huvaj, N., Maghsoudloo, A., 2013, Tekrarlı direk kesme deneyi ile Ankara kilinin rezidüel kayma dayanımı, 5. Geoteknik Sempozyumu.

İyisan, R., Bayın, A., Çevikbilen, G., Hatipoğlu, M., 2013, Şevlerin uzun süreli stabilite analizleri için kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi, Taşkın ve Heyelan Sempozyumu, 285–291.

Kalteziotis, N., 1993, The residual shear strength of some Hellenic clayey soils, Geotechnical and Geological Engineering, 11, 125–145.

Koltuk, S., 2005, Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin halka kesme deneyi ile belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 141 s.

Mitchell, J. K., Soga, K., 2005, Fundamentals of soil behavior, John Wiley & Sons, Inc., p.35, 100, 101, 369, 404, 417, 420.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Saito, R., Fukuoka, H., Sassa, K., 2006, Experimental study on the rate effect on the shear strength, Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, 421–427.

Satı, Y., 2016, Sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin kayma mukavemetinin drenajlı koşullarda incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 157 s.

Skempton, A. W., 1985, Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, 35, 1, 3–18.

Stark, T. D., Eid, H. T., 1994, Drained residual strength of cohesive soils, Journal of Geotechnieal Engineering, 120, 5, 856–871.

Stark, T. D., Eid, H. T., 1997, Slope stability analyses in stiff fissured clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 4, 335–343.

Stark, T. D., Hussain, M., 2010, Shear strength in preexisting landslides, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136, 7, 957–962.

Stark, T. D., Vettel, J. J., 1992, Bromhead ring shear test procedure, Geotechnical Testing Journal, 15, 1, 24–32.

Suzuki, M., Tsuzuki, S., Yamamoto, T., 2007, Residual strength characteristics of naturally and artificially cemented clays in reversal direct box shear test, Soils and Foundations, 47, 6, 1029–1044.

Suzuki, M., Yamamoto, T., Tanikawa, K., Fukuda, J., Hisanaga, K., 2002, Variation in residual strength of clay with shearing speed, Memoirs of the Faculty of Engineering Yamaguchi University, 50, 45–49.

Tiwari, B., Brandon, T. L., Marui, H., Tuladhar, G. R., 2005, Comparison of residual shear strengths from back analysis and ring shear tests on undisturbed and remolded specimens, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131, 9, 1071–1079.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Tiwari, B., Padgett, J., Ajmera, B., Bieda, A., 2020, Effect of mineralogical composition and pore water chemistry on shearing rate dependent residual shear strength of soil, Geo-Congress 2020, 317, 332–340.

Tiwari, B., Tuladhar, G. R., Marui, H., 2011, Effect of shearing speed on residual shear strength of natural soil obtained from mudstone, Geo-Frontiers 2011, 2786–2793.

Ürkmez, A. R., 2009, Kalıcı kayma mukavemetinin tekrarlı kesme kutusu deney yöntemi ile belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 211 s.

Wesley, L. D., 2009, Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils, John Wiley & Sons Inc., p.186, 190, 196, 197, 204, 206 - 209, 218, 225, 226.

Yılmaz, E., 2006, Zeminlerin endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 166 s.