

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŐAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KİLLERİN KAYMA DİRENCİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERAL KARAPINAR

TEZ DANIŐMANI

PROF. DR. NAZİLE URAL

İKİNCİ TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. KAMİL BEKİR AFACAN

BİLECİK, 2022

10458261

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŐAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KİLLERİN KAYMA DİRENCİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERAL KARAPINAR

TEZ DANIŐMANI

PROF. DR. NAZİLE URAL

İKİNCİ TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. KAMİL BEKİR AFACAN

BİLECİK, 2022

10458261

BEYAN

'Killerin Kayma Direncinin Deneysel Olarak Belirlenmesi' adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

| | |
|---|---|
| Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir. | |
| DESTEK ALINMIŞTIR | DESTEK ALINMAMIŞTIR <input type="checkbox"/> |
| Destek alındı ise; | |
| Destekleyen kurum; | |
| Desteğin Türü | Proje Numarası |
| 1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi) | |
| 2- TÜBİTAK | |
| Diğer;..... | |
| ETİK KURUL onayı var ise; | |
| ETİK KURUL karar tarih/sayı: |/..... |

Meral Karapınar

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bilgi ve tecrübelerini benimle her zaman paylaşan, çalışmamın her aşamasının yürütülmesinde yol gösterici olup beni destekleyen değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Nazile URAL ve Doç. Dr. Kamil Bekir AFACAN hocalarıma,

Yüksek lisans eğitimim ve laboratuvar çalışma sürecim boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Hasan SAVAŞ, Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ ve Prof. Dr. Volkan OKUR hocalarıma,

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında beraber çalışmalar yürüttüğümüz çok değerli arkadaşlarıma ve beni her zaman destekleyerek hayatımın her aşamasında yanımda duran annem Nesrin KARAPINAR, babam Ali İhsan KARAPINAR ve kardeşim Fatih KARAPINAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Meral Karapınar

2022

ÖZET

KİLLERİN KAYMA DİRENCİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Zeminlerin kayma direnci parametreleri, mühendislik tasarımlarındaki kullanımı açısından büyük önem arz etmektedir. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi, direkt kesme kutusu deneyi ve halka kesme deneyi pik ve kalıcı kayma direnci parametrelerinin laboratuvarında elde edilebilmesi için en iyi bilinen yöntemlerdendir. Bu çalışmada kayma direnci parametrelerini belirlemek için; direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Kayma direnci açısını plastisite indisi, likit limit, kil yüzdesi, plastik limit ve aktivite değerine bağlı bir şekilde tahmin edebilmek için korelasyonlar geliştirilmiştir. Dört deney numunesinde farklı deney yöntemleriyle belirlenen kalıcı ve pik kayma direncinin artan plastik limit, likit limit, plastisite indisi, kil yüzdesi ve aktivite değeri ile birlikte azaldığı görülmüştür. Ayrıca halka kesme deneyi ve direkt kesme kutusu deneyi üç farklı kesme hızında tekrar edilerek kesme hızının pik kayma direncine etkisi incelenmiştir. Aynı gerilmeler altında aynı numuneler üzerinde direkt kesme kutusu deneyi ve halka kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Direkt kesme kutusu deneyiyle elde edilen pik kayma direnci açısının, halka kesme deneyiyle elde edilmiş olan pik kayma direnci açısından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Direkt Kesme Kutusu Deneyi, Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi, Halka Kesme Deneyi, Kil, Kayma Direnci.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SHEAR RESISTANCE OF CLAYS

Soil shear strength parameters are very important in usage for engineering design. The consolidated-drained triaxial compression test, direct shear box test and ring shear test are the well-known methods to obtain the residual and peak strengths parameters in the laboratory. In this study; direct shear box test, ring shear test and consolidated-drained triaxial compression test were performed to determine shear strength parameters, specifically the internal friction angle. Correlations were developed to estimate friction angle from liquid limit, plastic limit, plasticity index, liquid limit, clay fraction and activity index. It is determined that residual and peak shear strength, obtained from different test methods with increasing plasticity index, plastic limit, clay fraction and activity index. Also, direct shear test and ring shear test were conducted three different shearing rates in order to investigate the displacement rate effect on peak strength. Direct shear test and ring shear test were performed on identical samples under same vertical stresses. The obtained results were compared. It has also been observed that the peak friction angle obtained by the direct shear box test was greater than the one obtained by ring shear test.

Keywords: Direct Shear Box Test, Consolidated-Drained Triaxial Compression Test, Ring Shear Test, Clay, Shear Strength.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|------|
| ÖN SÖZ | i |
| ÖZET | ii |
| ABSTRACT | iii |
| İÇİNDEKİLER..... | iv |
| TABLolar LİSTESİ | vi |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | ix |
| KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ | xiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİ | 2 |
| 2.1. Giriş | 3 |
| 2.2. Zeminde Kırılma Hipotezleri | 4 |
| 2.2.1. Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi | 4 |
| 2.3. Kumların Kayma Direnci | 5 |
| 2.4. Killerin Kayma Direnci..... | 7 |
| 2.4.1. Yumuşak (NL) Kilin Kayma Direnci | 7 |
| 2.4.2. Aşırı Konsolide Killerin Kayma Direnci..... | 9 |
| 2.5. Kayma Direncini Belirleme Yöntemleri | 10 |
| 2.5.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyi..... | 10 |
| 2.5.2. Halka Kesme Deneyi..... | 12 |
| 2.5.3. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) Üç Eksenli Basınç Deneyi..... | 14 |
| 3. ZEMİNLERDE KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER..... | 16 |
| 3.1. Minerolojinin Etkisi | 16 |
| 3.2. Kıvam Limitlerinin Etkisi | 17 |
| 3.3. Kil Yüzdesinin Etkisi..... | 23 |
| 3.4. Efektif Normal Gerilmenin Etkisi | 28 |
| 3.5. Deney Yönteminin Etkisi | 29 |
| 3.6. Kesme Hızının Etkisi..... | 33 |
| 4. MALZEME VE YÖNTEM | 35 |
| 4.1. Deney Numunelerinin Geoteknik Özellikleri | 35 |
| 4.2. Numune Hazırlama Yöntemi | 37 |

| | |
|---|------------|
| 4.3. Direkt Kesme Kutusu Deneyi | 37 |
| 4.3.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyinde Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı | 42 |
| 4.4. Halka Kesme Deneyi | 45 |
| 4.4.1. Halka Kesme Deneyinde Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı | 46 |
| 4.5. Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi..... | 48 |
| 4.5.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyinde Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı | 49 |
| 5. DENEYSEL SONUÇLAR..... | 54 |
| 5.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları..... | 54 |
| 5.2. Halka Kesme Deneyi Sonuçları | 56 |
| 5.3. Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları..... | 58 |
| 6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ | 61 |
| 6.1. Numunelerin Kıvam Limitleri ve Plastisite İndisinin Kayma Direncine Etkisi..... | 61 |
| 6.1.1. Likit Limitin Kayma Direncine Etkisi | 61 |
| 6.1.2. Plastik Limitin Kayma Direncine Etkisi | 67 |
| 6.1.3. Plastisite İndisinin Kayma Direncine Etkisi | 73 |
| 6.1.4. Plastik Limitin Likit Limite Oranının Kayma Direncine Etkisi | 79 |
| 6.2. Numunelerin Diğer Geoteknik Özelliklerinin Kayma Direncine Etkisi..... | 85 |
| 6.2.1 Kil Yüzdesinin Kayma Direncine Etkisi | 85 |
| 6.2.2. Aktivite Değerinin Kayma Direncine Etkisi | 91 |
| 6.3. Hız Faktörünün Kayma Direncine Etkisi | 97 |
| 6.4. Direkt Kesme Kutusu Deneyi ve Halka Kesme Deneyi Yöntemlerinin Karşılaştırılması..... | 100 |
| 7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER | 103 |
| KAYNAKÇA | 105 |
| EKLER | 108 |

TABLULAR LİSTESİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Tablo 2.1. Kırılma – Yenilme Kriterleri. | 4 |
| Tablo 2.2. Üç eksenli basınç deneyi sisteminde deney türlerinin isimlendirilmesi | 14 |
| Tablo 3.1. Kalıcı kayma direncinin yavaş hızlardaki yer değiştirmelerinin laboratuvar şartları ve arazi şartlarına göre kıyaslanması. | 33 |
| Tablo 4.1. Deney numunelerinin bazı endeks özellikleri..... | 36 |
| Tablo 5.1. Direkt kesme kutusu deney yöntemi ile elde edilen kayma direnci parametreleri . | 56 |
| Tablo 5.2. Halka kesme deney yöntemi ile elde edilen kayma direnci parametreleri | 58 |
| Tablo 5.3. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yöntemiyle elde edilen kayma direnci parametreleri..... | 60 |
| Tablo 6.1. Kesme kutusu deneyi için likit limit ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki . | 64 |
| Tablo 6.2. Halka kesme deneyi için likit limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki | 65 |
| Tablo 6.3. Halka kesme deneyi için likit limit değeri ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki | 66 |
| Tablo 6.4. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için likit limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki..... | 67 |
| Tablo 6.5. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limit arasındaki ilişki | 70 |
| Tablo 6.6. Halka kesme deneyi için plastik limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki | 71 |
| Tablo 6.7. Halka kesme deneyi için plastik limit değeri ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki | 72 |
| Tablo 6.8. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için plastik limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki..... | 73 |
| Tablo 6.9. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki | 76 |

| | |
|--|----|
| Tablo 6.10. Halka kesme deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki | 77 |
| Tablo 6.11. Halka kesme deneyi için kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki | 78 |
| Tablo 6.12. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki | 79 |
| Tablo 6.13. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki..... | 82 |
| Tablo 6.14. Halka kesme deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki..... | 83 |
| Tablo 6.15. Halka kesme deneyi için kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki..... | 84 |
| Tablo 6.16. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki | 85 |
| Tablo 6.17. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki | 88 |
| Tablo 6.18. Halka kesme deneyi için kil yüzdesi ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki | 89 |
| Tablo 6.19. Halka kesme deneyi için kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki | 90 |
| Tablo 6.20. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki..... | 91 |
| Tablo 6.21. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişki | 94 |
| Tablo 6.22. Halka kesme deneyi için pik kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişki | 95 |
| Tablo 6.23. Halka kesme deneyi için kalıcı kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişki. | 96 |
| Tablo 6.24. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde pik kayma direnci açısıyla aktivite arasındaki ilişki | 97 |

Tablo 6.25. Deney yöntemlerinden elde edilen pik kayma direnci açılarının karşılaştırılması
.....**101**



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Göçme durumunda efektif ve toplam Mohr dairelerinin ve kırılma zarflarının gösterimi | 6 |
| Şekil 2.2. UU deneyinde doymun numuneler için kırılma zarfları | 8 |
| Şekil 2.3. Aşırı konsolide killerde σ - ε_z değişimi | 9 |
| Şekil 2.4. Kesme kutusu deney aleti düzeneği..... | 11 |
| Şekil 2.5. Üç farklı kesme kutusu deneyinden elde edilen kesme gerilmesi- kesme yerdeğiştirmesi grafiği..... | 12 |
| Şekil 2.6. Halka kesme deneyi için kesme yüzeyinin gösterimi..... | 13 |
| Şekil 3.1. Montmorillonit (a), Kaolinit (b) ve İllit (c) yapılarının şematik diyagramı..... | 17 |
| Şekil 3.2. Zeminlerin su muhtevası-hacim değişimi davranışı altında kıvam limitlerinin tanımı. | 18 |
| Şekil 3.3. Örselenmiş normal konsolide killer için Plastisite indisi ile kayma direnci açısı arasındaki ilişki. | 19 |
| Şekil 3.4. Likit limit değeri ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki. | 20 |
| Şekil 3. 5. Kil numuneler için minerolojinin kalıcı kayma direncine etkisi. | 20 |
| Şekil 3.6. ΔI_p ile kalıcı kayma direnci açısının değişimi | 21 |
| Şekil 3.7. Likit limit değeri ile kalıcı kayma direnci açısının değişimi..... | 22 |
| Şekil 3.8. Örselenmemiş aşırı konsolide killerde pik kayma direnci açısının plastisite indisi ile ilişkisi..... | 23 |
| Şekil 3.9. Pik ve kalıcı kayma direnci açısı arasındaki farkın kil yüzdesine göre değişimi. | 24 |
| Şekil 3.10. Kil yüzdesinin Rölatif kalıcı kayma direnci parametresi ile ilişkisi..... | 25 |
| Şekil 3.11. Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki. | 26 |
| Şekil 3.12. Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki | 27 |
| Şekil 3.13. Kalıcı kayma direncinin kesme modu ve kil yüzdesine bağlı değişimi. | 27 |
| Şekil 3.14. Halka kesme deneyinde kalıcı kayma direncinin kil yüzdesi ile değişimi. | 28 |

| | |
|--|-----------|
| Şekil 3.15. Tekrarlı kesme kutusu kalıcı kayma direncinin kil yüzdesi ile değişimi. | 28 |
| Şekil 3.16. Kalıcı kayma direnci açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyi ve CD deneyi sonuçlarına göre değişimi. | 30 |
| Şekil 3.17. Kalıcı kayma direnci açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyi ve halka kesme deneyi sonuçlarına göre değişimi. | 31 |
| Şekil 3.18. Tekrarlı kesme kutusu ve CD deneylerinde pik kayma direnci açılarının karşılaştırılması. | 32 |
| Şekil 3.19. Kalıcı kayma direnci açısının tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde karşılaştırılması. | 32 |
| Şekil 3.20. Kesme hızının kalıcı kayma direnci açısına etkisi. | 34 |
| Şekil 3.21. Kumlu kil numunenin drenajsız koşulda kesme hızı-işsel sürtünme açısı değişimi. | 34 |
| Şekil 4.1. Plastisite kartı üzerinde zemin numunelerinin gösterimi. | 35 |
| Şekil 4.2. Hazırlanan deney numunelerini muhafaza amaçlı kullanılan desikatör. | 37 |
| Şekil 4.3. Direk kesme kutusu deneyinde kayma direnci gerilm ilişkisinin Mohr dairesi ile temsili gösterimi. | 39 |
| Şekil 4.4. Kesme kutusu deneyinde gerilme değerleri için hesaplamalarda kullanılan düzeltilmiş alan. | 40 |
| Şekil 4.5. ELE marka kesme kutusu deney aleti. | 41 |
| Şekil 4.6. Sıkıştırılmış numune elde etme aşamaları. | 43 |
| Şekil 4.7. Deney numunesinin direkt kesme kutusu cihaz çerçevesine yerleştirilmesi. | 44 |
| Şekil 4.8. Bromhead tipi halka kesme deneyi aleti. | 45 |
| Şekil 4.9. Deney numunesinin halka kesme deneyi aletine yerleştirilme aşamaları. | 47 |
| Şekil 4.10. Bromhead tipi halka kesme deney aleti çalışma mekanizması. | 48 |
| Şekil 4.11. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi aleti. | 49 |
| Şekil 4.12. Üç eksenli deney sisteminin şematik gösterimi (Bayın,2011). | 51 |
| Şekil 4.13. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine ait numunenin hazırlanma aşamaları. | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Şekil 4.14. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine ait numunenin deney düzeneğine yerleştirilme aşamaları | 53 |
| Şekil 5.1. N2 numunesi için 0,02 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları | 55 |
| Şekil 5.2. N2 numunesi için 0,027 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları | 57 |
| Şekil 5.3. N2 numunesi için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları | 59 |
| Şekil 6.1. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının likit limit ile değişimi | 62 |
| Şekil 6.2. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının likit limit ile değişimi..... | 62 |
| Şekil 6.3. 0,02 mm/dak hızda kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının plastik limit ile değişimi..... | 68 |
| Şekil 6.4. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi..... | 68 |
| Şekil 6.5. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için pik ve kalıcı kayma direnci açılarının plastik limit ile değişimi | 69 |
| Şekil 6.6. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının plastisite indisi ile değişimi..... | 74 |
| Şekil 6.7. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için plastisite indisi ile pik kayma direnci açısının değişimi | 74 |
| Şekil 6.8. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için plastisite indisi ile pik ve kalıcı kayma direnci açılarının değişimi | 75 |
| Şekil 6.9. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının plastik limitin likit limite oranıyla değişimi..... | 80 |
| Şekil 6.10. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi..... | 80 |
| Şekil 6.11. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kalıcı ve pik kayma direnci açılarının plastik limitin likit limite oranıyla değişimi..... | 81 |
| Şekil 6.12. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının kil yüzdesi ile değişimi | 86 |

| | |
|--|------------|
| Şekil 6.13. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için kil yüzdesi ile pik kayma direnci açısının değişimi | 86 |
| Şekil 6.14. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kil yüzdesi ile kalıcı ve pik kayma direnci açılarının değişimi | 87 |
| Şekil 6.15. 0,02 mm/dak hızda kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının aktivite ile değişimi..... | 92 |
| Şekil 6.16. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının aktivite ile değişimi..... | 92 |
| Şekil 6.17. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kalıcı ve pik kayma direnci açılarının aktivite ile değişimi | 93 |
| Şekil 6.18. Direkt kesme kutusu deneyinde pik kayma direncinin hız ile ilişkisi | 98 |
| Şekil 6.19. Halka kesme deneyinde pik ve kalıcı kayma direnci açılarının hız ile değişimi ... | 99 |
| Şekil 6.20. Direkt kesme kutusu deney yöntemiyle halka kesme deneyi yönteminden elde edilen pik kayma direnci açılarının karşılaştırılması..... | 102 |

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

A : Aktivite

A₀ : Numunenin ilk kesit alanı

A_c : Kesme alanı

A_i : Düzeltilmiş alan

c : Kohezyon

CD : Konsolidasyonlu-drenajlı

CU : Konsolidasyonlu-drenajsız

D : Çap

e : Boşluk oranı

H : Gerilme geçmişi

I_p : Plastisite indisi

k : Denklem değişmezi

N : Normal kuvvet

NL : Normal yüklenmiş kil

OC : Aşırı konsolide kil

P : Düşey deplasmana karşılık gelen düşey kuvvet

T : Sıcaklık

T : Yanal kuvvet

φ : Kayma direnci açısı

ε : Şekil değiştirme

é : Şekil değiştirme oranı

σ_t : Malzemenin çekme dayanımı

τ : Zeminin kayma direnci

σ : Normal gerilme

UU : Konsolidasyonsuz-drenajsız

w_L : Likit limit

w_P : Plastik limit

w_S : Büzülme limiti

ΔPI : Plastisite indisi değişimi

δ : Yer değiştirme

ϑ : Kesme hızı

Δu : Boşluk suyu basıncı değişimi

$\Delta \sigma$: Deviator gerilme değeri

ΔV : Hacim değişimi

V_0 : Numunenin ilk hacmi

1. GİRİŞ

Şev stabilitesi, sığ ve derin temellerin taşıma gücü, istinat duvarı ve dolaylı olarak karayolu tasarımı gibi konular, zeminlerin kayma direncinin belirlenmesinin gereğini ortaya çıkaran, geoteknik mühendisliğinin başlıca konularındandır. Kayma direnci, kayma düzlemi boyunca aşıldığı takdirde zeminlerde göçme gerçekleşmektedir. Bu kayma düzlemi, en büyük kayma gerilmesinin meydana geldiği düzlem olmak zorunda değildir. Göçmenin meydana gelebilmesi için genel olarak belirli bir kayma düzlemine etki eden kayma gerilmesi ve normal gerilmenin birlikte hareket etmesi gerekmektedir. Zeminlerde kayma direnci, zeminde göçme meydana gelmeden önce karşı koyabildiği en büyük direnç olarak tanımlanabilmektedir. M. Coulomb (1776) farklı malzemelerin kayma sürtünmeleriyle ilgilenerek bir alet geliştirerek kayma direncinin gerilmeden bağımsız bir bileşenin olmasının yanı sıra, gerilmeye bağlı bir bileşenin de olduğu sonucuna varmıştır. Gerilmeye bağlı bileşeni katı malzemelerdeki kayma sürtünmesine benzeterek bu bileşene içsel sürtünme açısı isimlendirmesi yapıp, “ ϕ ” ifadesi ile göstermiştir. Diğer bileşen ise malzemenin kohezyonu olup “c” sembolü ile ifade edilmektedir ve bu iki değer kayma direnci parametrelerini temsil etmektedir. Bu değerler zeminlerin gerçek mekanik özellikleri olmayıp deney koşullarına bağlı olarak oluşan matematiksel ifadeleri temsil etmektedir. Zeminlerin kayma direnci parametrelerinin belirlenebilmesi için çeşitli arazi ve laboratuvar deneyleri mevcuttur. Zeminler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde ölçümlerin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun sebebi arazi koşullarında maruz kaldığı şartlar altındaki sonuçlar doğrultusunda ilerlenmesi gereğidir (Holtz vd., 2015)

Kil tabakalarının gerilme tarihçesi ve başlangıç gerilme durumuyla kayma gerilmelerinin oluşumu esnasında geçerli olan yükleme ve drenaj koşulları, tabakanın suya doygunluk derecesi, zeminin kayma direncinin belirlenmesinde oldukça etkilidir.

Bu çalışmada farklı zemin endeks özelliklere sahip, 3 kil ve 1 silt numunesi üzerinde direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Bu deney yöntemlerinden elde edilmiş olan kalıcı ve pik kayma direnci açılarıyla, zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişki, kullanılan deney yöntemlerinin kıyaslaması ve halka kesme deneyi ve direkt kesme kutusu deneyi yöntemlerinde hızın etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Hızın kayma direnci açısına etkisini incelemek amacıyla direkt kesme kutusu deneyinde normal gerilmeler altında doygun olmayan numuneler üzerinde 1, 0,1 ve 0,02

mm/dak hızlarında direkt kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Aynı amaçla halka kesme deneyinde ise 1,35, 0,135 ve 0,027 der/dak hızlarında çalışılmıştır. Bu deney yöntemlerinin birbirlerine göre üstünlüklerini belirlemek ve de kayma direnci açısından önemini belirlemek amacıyla deney yöntemleri de kıyaslanmıştır. Zeminlerin geoteknik endeks özelliklerinin kayma direncine etkisinin üzerindeki etkisinin incelenmesi için ise diğer deney yöntemlerinin yanı sıra konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi de yapılmıştır. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde kullanılan numunlerin suya doymun olması ve boşluk suyu basıncının oluşumunu önlemek amacıyla 0,005 mm/dak gibi yavaş bir hız seçilmesi sebebiyle diğer deney yöntemleriyle kıyaslanmaması gerektiğine karar verilmiştir.

Çalışma kapsamında ikinci bölümde, zeminlerin kayma direncinden bahsedilmiş olup, kayma direncinin belirlenebilmesi amacıyla çalışma boyunca kullanılan deney yöntemleriyle ilgili bilgilendirme yapılmıştır. Üçüncü bölümde zeminlerin kayma direncini etkileyen faktörler anlatılarak bununla ilgili daha önce yapılan çalışmalar üzerinden örnekler verilmiştir.

Dördüncü bölümde kullanılan deney numunelerinin geoteknik özellikleri ve aynı zamanda deney yöntemlerinin yapılışı anlatılmış olup beşinci bölümde ise zeminlerin kayma direncini belirlemek amacıyla deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Altıncı bölümde beşinci bölümde elde edilen sonuçlarının bu bölümde bahsedilen kayma direncini etkileyen faktörlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Son bölümdeyse genel sonuçlara yer verilmiştir.

2. ZEMİNLERİN KAYMA DİRENCİ

2.1. Giriş

Zeminlerin kayma direnci geoteknik mühendisliği alanının en önemli konusudur. Şev stabilitesinde, derin ve sığ temellerin taşıma gücü, istinat duvarı ve dolaylı olarak karayolu tasarımında, mevcut zeminlerin kayma direncinden etkilenmektedir. Şev ve temel tasarımında likit denge yöntemi ve nihai veya limit durum ile göçme ve göçme durumları analiz edilmektedir. Bu yöntemler zeminin kayma direncinin tanımlanması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Kayma direnci, zeminin maksimum veya nihai kayma gerilmesine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Kayma gerilmesinin limit değeri, çoğu zaman maksimum izin verilebilir deformasyon seviyesine göre belirlenmektedir. Bunun amacı genellikle yapı tasarımını kontrol etmektir. Hesaplamalarda kullanılan güvenlik sayılarının büyük olmasından dolayı uygulanan yüklerin zeminde uyguladığı gerçek gerilmeler, yapının kırılma veya göçmesine neden olacak gerilmelerden çok daha azdır (Holtz vd, 2015: 540).

Zemin hareketlerinin söz konusu olduğu herhangi bir durumda zeminlerin gerilme-deformasyon ve gerilme-deformasyon-zaman davranışı önemlidir. Kayma direnci denklemi, Farklı asal gerilmeler için Mohr-Coulomb göçme hipotezine göre göçme sırasında elde edilen Mohr dairelerinin teğetinden geçen dayanım zarfına bağlıdır. Bu denklem kohezyon değeri “c” ve kayma direnci açısı “ Φ ” parametrelerine göre elde edilmektedir. Gerçekte, bir zeminin kayma dayanımı birçok faktöre bağlıdır. Bu parametrelerden bazıları; boşuk oranı “e”, gerilme geçmişi “H”, sıcaklık “T”, şekil değiştirme “ ϵ ”, ve şekil değiştirme oranı “ ϵ ” olarak tanımlanmaktadır. Bu parametreler birbirinden bağımsız olmayıp, bunların fonksiyonel formları tam olarak bilinmemektedir.

Sonuç olarak kayma dayanımı parametreleri deney düzenekleri yoluyla drenaj koşulları, yükleme hızı, deformasyon sınırı kullanılarak elde edilir. Kayma direnci farklı sürtünme açıları ve kohezyon değerleri, asal gerilme, efektif gerilime, drenajlı, drenajsız, pik dayanım ve kalıcı kayma dayanımı parametreleri dahil olmak üzere tanımlanmaktadır (Mitchell, 1993).

2.2. Zeminde Kırılma Hipotezleri

Matematiksel bir ifadeyle zeminlerin kayma direncinin gösterimi, Coulomb(1776) ve Tresca(1869) ile başlamıştır. Coulomb killi zeminlerde kayma direncini tek bir parametreye, kohezyona “c” bağlamıştır.

Zeminlerin kayma direncinin tanımlanmasında zeminlerin gevrek olmadığı kabulüyle ilerleyen bazı teoriler ve zemin gibi sünek davranış gösteren malzeme kıyası için bir adet gevrek kırılma teorisinin bağıntısı verilmiştir. Bu ifadeler Tablo 2.1’de özet halinde gösterilmiştir. Tabloda yer almakta olan σ_t malzeminin çekme dayanımını, k değerleriyle denkleme değişimini ifade etmektedir.

Tablo 2.1. Kırılma – Yenilme Kriterleri.

| Teori | Matematiksel İfadesi |
|-------------------------|--|
| Tresca-Coulomb | $\sigma_1 - \sigma_3 = 2k_1$ |
| Geliştirilmiş Tresca | $(\sigma_1 - \sigma_3) = k_2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ |
| Von Mises | $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_3^2$ |
| Geliştirilmiş von Mises | $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 2k_4^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2$ |
| Mohr-Coulomb | $(\sigma_1 - \sigma_3) = k_5^2(\sigma_1 + \sigma_3)$ |
| Griffith (GEVREK) | $\sigma_1 = \sigma_t(\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0)$ $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8k_6(\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0)$ |

Kaynak: (Önalp ve Arel, 2018: 278)

Görüldüğü üzere Tresca-Coulomb hipotezi yatay bir doğru ifade ederken, Mohr-Coulomb hipoteziye eğimli bir doğruyu göstermektedir (Önalp ve Arel, 2018: 276).

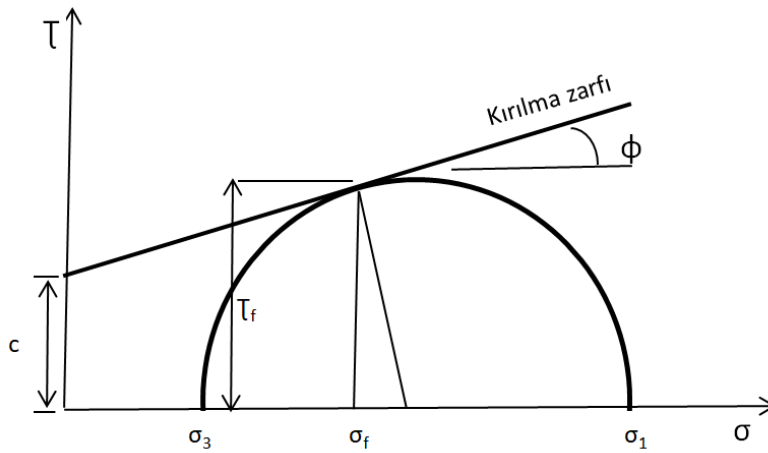
2.2.1. Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi

M. Coulomb (1776) farklı malzemelerin kayma sürtünmeleriyle ilgilenecek bir alet geliştirerek kayma direncinin gerilmeden bağımsız bir bileşenin olmasının yanı sıra, gerilmeye bağlı bir bileşenin de olduğu sonucuna varmıştır. Gerilmeye bağlı bileşeni katı malzemelerdeki kayma sürtünmesine benzeterek bu bileşene içsel sürtünme açısı isimlendirmesi yaparak “ ϕ ” ifadesi ile göstermiştir. Diğer bileşen ise malzemenin kohezyonu olup “c” sembolü ile ifade edilmektedir ve bu iki değer kayma direnci parametrelerini temsil etmektedir. Bu değerler zeminlerin gerçek mekanik özellikleri olmayıp deney koşullarına bağlı olarak oluşan matematiksel ifadeleri temsil etmektedir. Mohr hipotezi zaman içinde

Coulomb hipoteziyle birleştirilerek Mohr-Coulomb hipotezi elde edilmiştir. Kayma dayanımı değerini veren Mohr-Coulomb hipotezi bağıntısı Eşitlik 2.1’de verilmiştir.

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

Bu eşitlikte; τ zeminin kayma direncini, σ ise uygulanan normal gerimeyi ifade etmektedir. Bu formül göçme sırasında kırılma düzlemindeki gerilmeleri tahmin edebilen tek bağıntı olması açısından oldukça önemlidir. Mohr-Coulomb göçme zarfı bağıntısının Şekilsel gösterimi Şekil 2.1.’de verilmiştir (Holtz ve diğerleri, 2015).



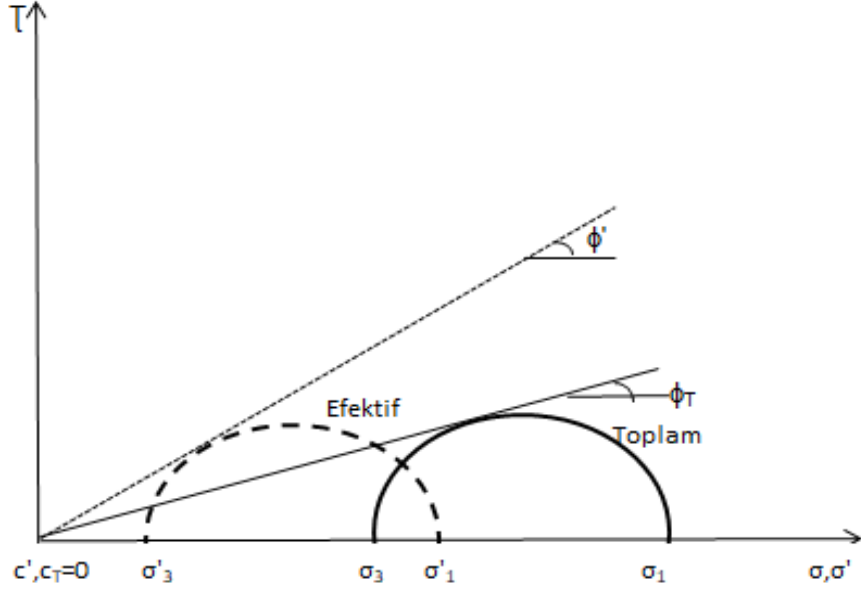
Şekil 2.1. Mohr-Coulomb Göçme Zarfı

2.3. Kumların Kayma Direnci

Kumlar iri daneli zemin sınıfına girmekte olup yerçekimi etkisi altında sürtünmeden etkilenen kohezyonsuz zeminlerdir. Kohezyon parametre değerinin olmamasından dolayı kayma direnci bağıntısı Eşitlik 2.2’de verilmiştir.

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

Çakıl ve kumdan oluşan zeminlerin permeabilite değerlerinin yüksek olması boşluk suyu basıncının zeminden rahatlıkla çıkabilmesini sağlamaktadır. Bu yüzden arazi şartlarında statik yüklemelerin etkisi altında kumlarda drenajlı koşulun geçerli oluşunu düşünmek gerekmektedir. Kısacası arazi yüklemeleri altında kumların davranışı incelenirken efektif (drenajlı) kayma açısının bulunmasının yeterli olduğu sonucuna varılmaktadır. Göçme durumunu gösteren efektif ve toplam Mohr daireleri ve kırılma zarfları Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Göçme durumunda efektif ve toplam Mohr dairelerinin ve kırılma zarflarının gösterimi

Kaynak: (Holtz ve Kovacs, 1981)

Kumların kayma direnci açısı değerini etkileyen faktörler, aşağıdaki şekiliyle sıralanabilir:

- Sıklık derecesi: Yoğunluğun artması ya da yoğunluğun dolaylı yoldan bir göstergesi olan boşluk oranı veya porozitenin azalması kumun kayma direncini artırmaktadır.
- Dane boyutu dağılımı: İyi derecelendirilmiş kum zeminler üniform kumlara kıyasla daha yüksek kayma direnci değerine sahip olmaktadır.
- Dane biçimi: Yuvarlak danelere kıyasla köşeli danelere sahip zeminlerin kayma direnci değerleri nispeten daha yüksektir.
- Danelerin minerolojik yapısı: Daneler arasında meydana gelen sürtüme etkilemesinden dolayı çok küçük bir aralık değeri içinde de olsa kayma direncini değiştirdiği kabul edilmektedir.
- Su etkisi: Zeminin su altında ya da kuru olması kayma direnci değerini çok az da olsa etkilemektedir.

Bu çıkarımlar göz önünde bulundurulduğunda kayma direnci değerinin deneysel olarak doğru bir şekilde saptanabilmesinde, deney numunesine ait sıklık derecesiyle arazide bulunan numuneye ait sıklık derecesinin aynı olması koşulu aranmaktadır.

İri daneli zeminlerin kayma direnci sıklık derecesine bağlı olarak sıklık derecesi arttıkça kayma gerilmeleri altında kum danelerinin hareketi zorlaşıp zeminin basınç etkisi

altındayken hacmin genişlemesiyle birlikte enerji kayıpları oluşmaktadır. Bu sebeple zeminlerin kaymaya karşı direnci artmaktadır (Özaydın, 1989: 306).

2.4. Killerin Kayma Direnci

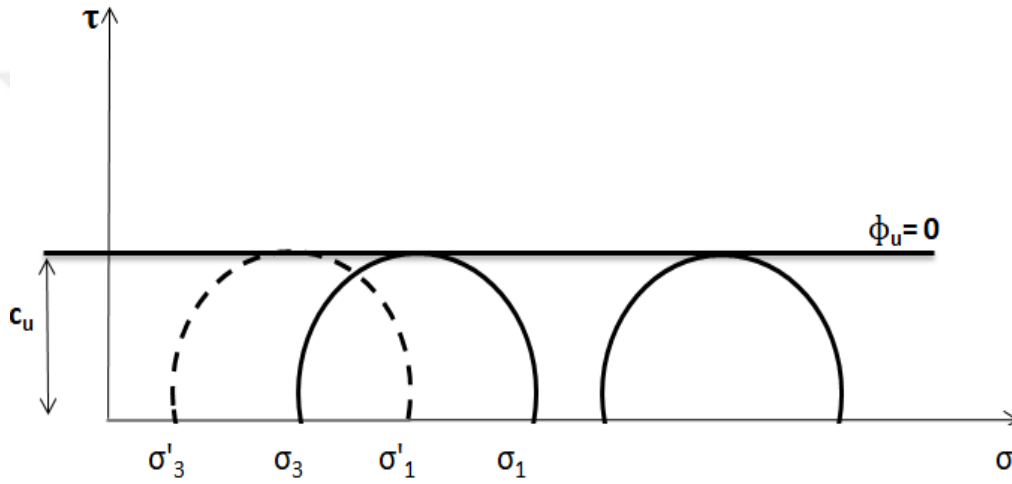
Kayma direncinde killer ve kumlar arasındaki belirgin özellik kumların geçirimli yapıya sahip olması, killerin ise jeolojik geçmişlerinden etkilenmesidir. Killer mikroskobik bilyutta danelere sahip olduğundan killerin kayma direnci üzerinde dane boyutunun etkisi oldukça fazladır. Arazide bulunan kil tabakalarının gerilme tarihçesi ve başlangıç gerilme durumuyla kayma gerilmelerinin oluşumu esnasında geçerli olan yükleme ve drenaj koşulları, tabakanın suya doygunluk derecesi, zeminin kayma dayanımının belirlenmesinde oldukça etkilidir. Bu durum kumlara göre arazi koşulları sağlanarak kayma dayanımının saptanmasında daha zor ve karmaşık olduğunun bir göstergesidir. Bunun yanında kullanılan ölçüm teknikleri, alınan numunenin kalitesi, gevreklik, ortamın anizotropluğu, kesme hızı, su muhtevası, daneler arası itme veya çekme durumu, çimentolanma, kilin plastisitesi, efektif gerilme düzeyi de killerin kayma direncinin belirlenmesinde oldukça önemli etkenlerdendir. Tüm bu durumlar doğrultusunda kil tabakalarının davranışını belirlemede bu faktörlerin göz önünde bulundurulması, elde edilen parametrelerin arazi koşullarına uygun olarak sağlıklı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yer altı su tabakasının altında olan zeminlerin suya doygun olmasının yanı sıra yer altı su tabakasının üzerinde olan ince daneli zeminlerde ise belirli bir yüksekliğe kadar kapilaritenin etkin olduğu bilindiğinden tabakalar suya doygun hale gelmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda zeminlerin jeolojik geçmişleri göz önünde bulundurularak killerin davranışının açık bir şekilde ifade edilebilmesi için üç ana grup altında incelenmektedir. Bunlar; tamamen konsolide olmuş normal yüklenmiş (NL), önceden yüklenmiş aşırı konsolide (OC) ve fisürlü aşırı konsolide killerdir. Boşluk suyu basınçlarında meydana gelen aşırı düşüş ya da yükseliş ortamdaki efektif ve toplam gerilmeler arasında büyük farklılıklar oluşturduğu için, ölçülen kayma direnci parametrelerine ait efektif ve toplam gerilmelere göre ifadesinde killer için büyük önem ifade etmektedir.

2.4.1. Yumuşak (NL) Kilin Kayma Direnci

Tamamen konsolide olan NL yumuşak killerde hızlı yükleme sonucu meydana gelen kritik gerilme önemli bir sorundur. Normal konsolide killer üzerine yapılan bir dolgunun kısa sürede inşa edilmesi, bir barajda yüksek plastisiteli çekirdeğin hızlı bir şekilde yükselmesi ya da yumuşak kil zemin üzerine oturan temelin ani yüklenmesi, laboratuvar ortamında tüm

kontrollerin eşit bir şekilde sağlanmasını sağlayan üç eksenli hücre kesme deneyinin konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşullarını yaratır. Zeminde hızlı bir şekilde artan gerilmeler sonucunda boşluk suyu basıncının ani yükselmesiyle boşluk suyu basıncı sistem dışına çıkamadan kayma gerilmeleri alarak, efektif gerilme sıfıra düşüp ani yenilmeler meydana gelebilmektedir. Bu yüzden bu tür durumlarda analizler sadece toplam gerilmeler üzerinden yapılmalıdır. Doygun killerde boşluk suyu basıncı değeri ($B=1.00$) olduğu için numunelerde boşluk suyu basıncı sisteme verilen çevre basıncına eşittir. Yani doymuş NL kil numunelerde UU koşullarında boşluk suyu basıncı çevre basıncıyla eşit yükseldiği için tüm deneyler Şekil 2.3'te görüldüğü üzere aynı noktadan başlar.



Şekil 2.2. UU deneyinde doymuş numuneler için kırılma zarfları

Kaynak: (Önalp ve Arel, 2018: 311)

Arazide killerin drenajsız fakat konsolidasyonlu koşullardaki davranışları için konsolidasyonlu-drenajsız (CU) yükleme durumları üzerinden inceleme yapılmaktadır. Su seviyesinde ani bir düşüşle meydana gelmeden sızıntının sürekli olması halinde konsolide olan çekirdeğin kayma direnci, doğal kilin yerinde yani arazi yüzeyine dolgu yapılmamış haliyle drenajsız kayma direnci gibi problemlerle bu durum örneklendirilebilmektedir.

NL killerde kırılma zarfının orjinden geçebilmesi için drenajlı deneylere gerek duyulmaktadır. Fakat geçirimsizlik katsayısının oldukça düşük olması bu deney sistemlerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) doymuşluk süresinin uzun sürmesi ve boşluk suyu basıncının yükselmesinin önlenmesi için düşük hızlarda kesme işleminin gerçekleştirilmesi açısından bakıldığında deney süresinin diğer deney türlerine göre uzun kılmaktadır. Bu deney düzeninin kurulabilmesi için geçerli olan bazı örneklemeler; dolgu yumuşak kilin tabakalar halinde yükselitken yavaş yavaş yüklenmesi, sızıntı kuvvetlerinin sürekli olarak etkisinde

Aşırı konsolide killerin CD deney sonuçlarından elde edilen kırılma zarfı grafiklerinde denklem kısaca orijinden geçmeyen bir doğru olarak tanımlanabilmektedir. Bu denklem Eşitlik 2.3'te verilmiştir.

$$S=\tau_f=c'_d+\sigma'*\tan\phi'_{cd} \quad (2.3)$$

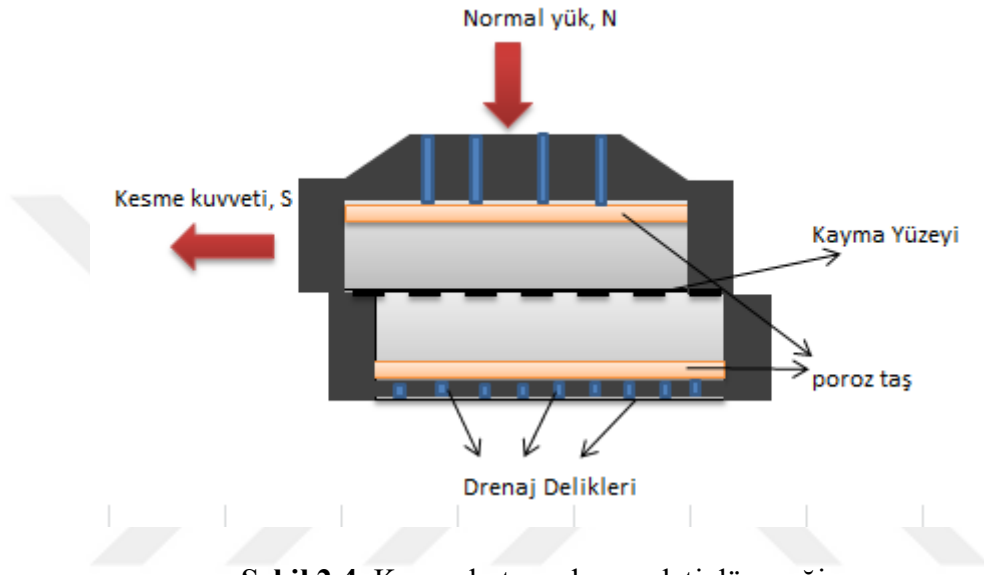
2.5. Kayma Direncini Belirleme Yöntemleri

Zeminlerin kayma direnci parametrelerinin belirlenebilmesi için çeşitli arazi ve laboratuvar deneyleri mevcuttur. Örselenmemiş numune temininin zor olduğu durumlarda ya da yumuşak kil zeminlerde genel olarak arazi deneyleri tercih edilmektedir. Kayma direncini belirlemek amacıyla yapılan bazı arazi deneyleri Sondaj Kuyusu Kesme Aleti (BST), Arazi Kanatlı Kesici Deneyi (FVT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)'dir. Zeminler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde ise ölçümlerin hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun sebebi arazi koşullarında maruz kaldığı şartlar altındaki sonuçlar doğrultusunda ilerlenmesi gereğidir. Araziden numunenin alınması sırasında oluşacak örselenme, numune alındığında var olan normal gerilmelerin yok olması, boşluk suyu basıncının arazi şartlarına göre laboratuvarında tamamen değişebilmesi, zemindeki fisür ve çatlakların deney numunesi boyutlarından dolayı laboratuvar şartları altında tamamen sağlanamaması gibi etkenler laboratuvar deneylerinin hassas bir şekilde yapılması gereğinin bazı gerekçeleri olarak sıralanabilmektedir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında kayma direnci parametrelerinin belirlenmesinde üç farklı deney yöntemi ön plana çıkmaktadır. Bunlar halka kesme deneyi, kesme kutusu deneyi ve üç eksenli basınç deneyi olup birbirlerine göre farklılıkları bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan deney türü kesme kutusu iken arazi şartlarındaki gibi büyük deformasyonlara izin verdiği için halka kesme deney aleti tercih edilmektedir.

2.5.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyi

Bu deney yöntemi zemin mekaniği uygulamalarında kullanılan en yaygın ve de eski metot olarak bilinmektedir. Deney aletinin türüne göre değişen kare ya da daire kesitli zemin numunesi üst kapaktan kesme kutusunun içine yerleştirilerek bir normal gerilmeye karşılık gelen yük verilip konsolidasyona bırakılır. Konsolidasyonu tamamlanan deney numunesi iki parçadan oluşan deney düzeneğinden alt parça sabit kalıp uygulanan kesme kuvveti ile üst parçanın hareket etmesiyle belirlenen hızda kesilir. Elde edilen parametreler ise yatay deplasman, düşey deplasman ve kesme kuvvetidir. Kesme aşamasında kesme yüzeyinin en

zayıf kayma yüzeyiyle çakışmama ihtimali deneyin en sakıncalı yanı olarak öne sürülebilmektedir. Kesme aşamasında meydana gelen boşluk suyu basınçlarının sönlümlenmesi kesme hızına bağlı olup numune ne denli hızla kesilse de boşluk suyu basıncı önlenemeyeceğinden gerçek anlamda drenajsız bir deney gerçekleştirmenin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır (Önalp ve Arel, 2018: 282). Şekil 2.5’de kesme kutusu deney aletine ait düzenek görülmektedir.



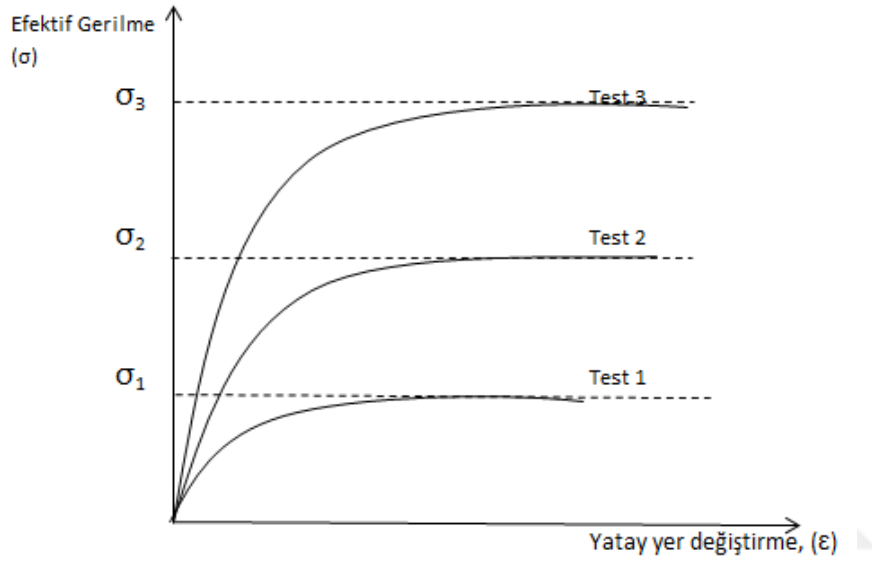
Şekil 2.4. Kesme kutusu deney aleti düzenegi

Kaynak: (Önalp ve Arel, 2018: 282)

Deney, mevcut hız için en az 3 farklı sabit düşey yük altında özdeş numuneler üzerinde tekrar edilerek $\sigma - \tau$ Şekilleri oluşturulup kayma dayanım parametreleri elde edilmektedir. Kesme kutusu deneyinde kesme hızı arazi şartlarına göre tayin edilerek arazi üzerindeki drenaj şartları göz önünde bulundurulmalıdır. Geçirimsizliği yüksek olan iri daneli kum, çakıl gibi zeminlerde drenaj sağlanarak boşluk suyu basıncının sönlümleneceği kabul görmektedir. Permeabilite değeri düşük olan kil, silt gibi zeminlerde ise stabilite analizinin kısa oduğu zamanlarda toplam gerilme, drenajın sağlanabileceği kadar uzun süren stabilite analizlerinde ise efektif gerilme değerleri göz önünde bulundurulmalıdır (Mitchell, 1993).

Kesme yer değiştirmelerine karşı meydana gelen efektif gerilme değişim eğrileri aşağıda Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Yer değiştirme işlemi bitine kadar gerilme değişimi devam etmektedir. Çelik vb. malzemelerden farklı olarak belirli bir kırılma noktası bulunmamaktadır. Her bir dene için, ulaşılan en yüksek kesme gerilmesi noktası pik kayma dayanımı olarak adlandırılmaktadır. Bu değerler sonrasında Mohr-Coulomb diyagramı

üzerinde işaretlenerek her bir noktayı kesebilecek en uygun doğru ile birleştirilmektedir. τ eksenini ile doğrunun kesiştiği nokta efektif kohezyon değeri olan c' ifadesini vermektedir. Oluşturulan doğrunun eğimi isen efektif içsel sürtünme açısını (ϕ') vermektedir. Kesme kutusu deneyi çok hızlı yapıldığı takdirde kayma direnci parametreleri toplam gerilme üzerinden c_T ve ϕ_T şeklinde ifade edilmektedir. Kesme kutusu deneyi ucuz ve de basit olmasının yanı sıra zeminin en zayıf zonundan kesmek yerine kesmenin belirli bir düzlem boyunca zorlama gibi bir dezavantajı bulunmaktadır (Coduto, 2001).



Şekil 2.5. Üç farklı kesme kutusu deneyinden elde edilen kesme gerilmesi- kesme yerdeğiştirmesi grafiği

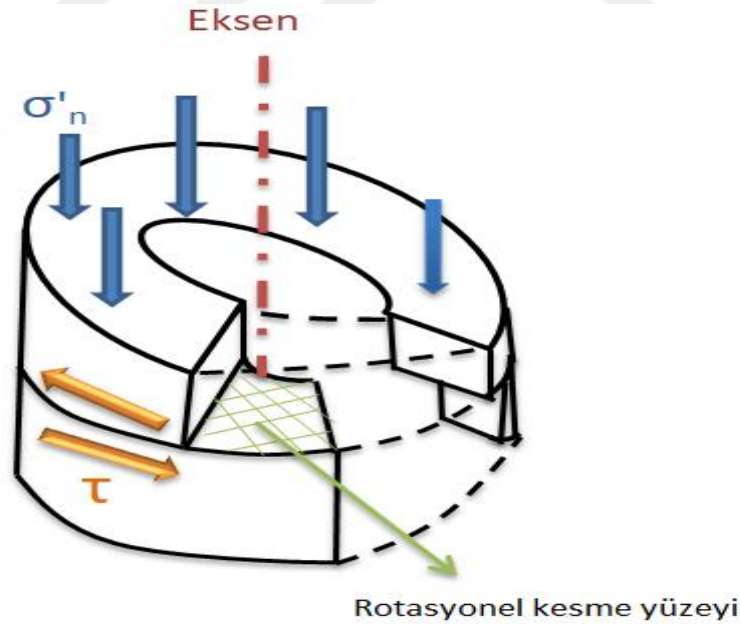
Kaynak: (Coduto, 2001)

2.5.2. Halka Kesme Deneyi

Kesme kutusu deneyinde tekrarlı kesimlerde numuneyi her geri alışta genellikle numunede 0.5 santimetreden daha az bir yatay yer değiştirme meydana getirmektedir. Numunenin tek bir doğrultuda kesilemeyerek numune üzerinde sabit bir kesme yüzeyi oluşturulamaması kesme kutusu deneyi açısından oldukça büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Fakat halka kesme deneyinin tek doğrultuda gerçekleştirilerek herhangi bir yer değiştirmeye gereksinim duyulmaması en büyük avantajı olarak görülmektedir. Numune bu şekilde tek doğrultuda yer değiştirerek kalıcı kayma direncine ulaşılabilmektedir. Halka kesme deneyinin diğer avantajlarından bazıları ise kesme yüzeyinin sabit bir enine kesit oluşturarak kesme işlemi sırasında laboratuvar şartları düşünöldüğünde, minimum denetim

gerektirmesinin yanı sıra veri toplama tekniklerinin kolaylığı söylenebilmektedir (Stark ve Eid, 1994).

Genellikle kalıcı kayma direnci elde etmek için kullanılan bu deney yönteminin sınırsız kesme yüzeyi oluşturabildiği göze alındığında, kalıcı kayma direnci elde edilene kadar kesme işlemine devam edildiği söylenebilmektedir. Kayma direnci- şekil değiştirme grafiği elde edilen bu deney sisteminde, gerilme zarfını elde edebilmek için deney düzeneğine üç veya daha fazla normal gerilme altında yükler uygulanmaktadır. Halka kesme deney sisteminde kesme işlemi sırasında, Şekil 2.7’de belirtildiği üzere kesme yüzeyinin enine kesit alanını sabit tutarak, tek bir yönde numuneyi sürekli olarak kesmektedir. Bu durum kil parçacıklarının kesme yönüne paralel olarak yönlendirilerek kalıcı kayma direncinin elde edilmesine olana sağlamaktadır. Düşey gerilme değerinde, düşey deplasman değerinde, düşey sürtünme kuvvetinde ve kesme kuvvetindeki değişimler deney süresince gözlemlenme imkanı sağlamaktadır. Alt ve üst drenajı sağlayan iki paslanmaz çelik disk arasında yerleştirilen numunenin üst başlık yardımıyla sabit bir hızla dönerek paralel bir kesme düzlemi boyunca kesme işleminin gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Önceden oluşan şev stabilite ve de fayların, kayma yüzeyi bulunduran şevlerin kayma direncini belirlemek için kullanılabilir (ASTM D-6467, 2000).



Şekil 2.6. Halka kesme deneyi için kesme yüzeyinin gösterimi

2.5.3. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) Üç Eksenli Basınç Deneyi

Üç eksenli deneylerinde drenaj ve konsolidasyon koşulları geoteknik mühendisliğinde farklı tasarımlar için modellenmektedir. Tablo 2.2’de belirtilen, iki harfli sembollerde gösterilen bu deney türlerinden ilk harf deney numunesinin konsolide olup olmadığını ifade ederken ikinci harf ise drenaj durumunun deney sırasındaki halini açıklamaktadır (Holtz vd, 2015).

Tablo 2.2. Üç eksenli basınç deneyi sisteminde deney türlerinin isimlendirilmesi

| Drenaj Şekli Deneyden Önce- Deney Sırasında | Sembol |
|--|--------|
| Konsolidasyonsuz – Drenajsız | UU |
| Konsolidasyonlu – Drenajsız | CU |
| Konsolidasyonlu – Drenajlı | CD |

Üç eksenli basınç deneyinin zemin numunesinin gerilmeler altında konsolide edilebilmesi, suya doygunluk derecesinin (Skempton B parametresi) gözlemlenebilmesi, arazi yüklerine yakın yüklemeler yapabilmek amacıyla eksenel ve yanal gerilmeler uygulanabilmesi, eksenel yükleme aşamasındayken drenajlı ya da drenajsız koşulların sağlanabilmesi bu deney sisteminin önemli avantajları arasında gösterilebilmektedir. Drenajlı yüklemelerde meydana gelen hacim değişimi ölçülebilirken drenajsız yüklemelerde ise numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışı gözlemlenebilmektedir. Üç eksenli basınç deneyinde zemin numunesinde arazideki yüklemeden önce etki eden gerilemelerin hücre basıncı ile uygulanmasıyla drenaja izin verilerek konsolidasyon sağlanabilmektedir. Eksenel yükleme sırasında drenajlı yükleme yapıldığı göz önüne alınarak yükleme hızı boşluk suyunun rahatlıkla dışarı çıkışını sağlayacak şekilde boşluk suyu basıncının oluşmasına müsaade edilmeyecek bir hızda seçilmelidir. Hidrostatik yükleme sırasında zemin davranışları başlangıç suya doygunluk derecesine göre farklılıklar gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu deney sisteminin ikinci aşaması olan eksenel yükleme aşamasında drenaj vanaları açılarak zemin içerisinde bulunan suyun dışarı çıkmasına izin verilerek drenajlı deney gerçekleştirilmiş olmaktadır. Kırılma zarfının belirlenebilmesi amacıyla en az iki deneyin yapılması gerekmektedir. Elde edilen Mohr dairelerinden çizilen ortak teğetle kayma direnci parametrelerinin sonucuna ulaşılmaktadır (Özaydın, 1989, ss. 294–302),.

Bu bölümde bahsedilen direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yöntemleri kullanılarak kayma direncini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuç ve kıyaslamalara, deney düzeneklerinin işleyiş biçimlerine diğer bölümlerde yer verilmiştir.



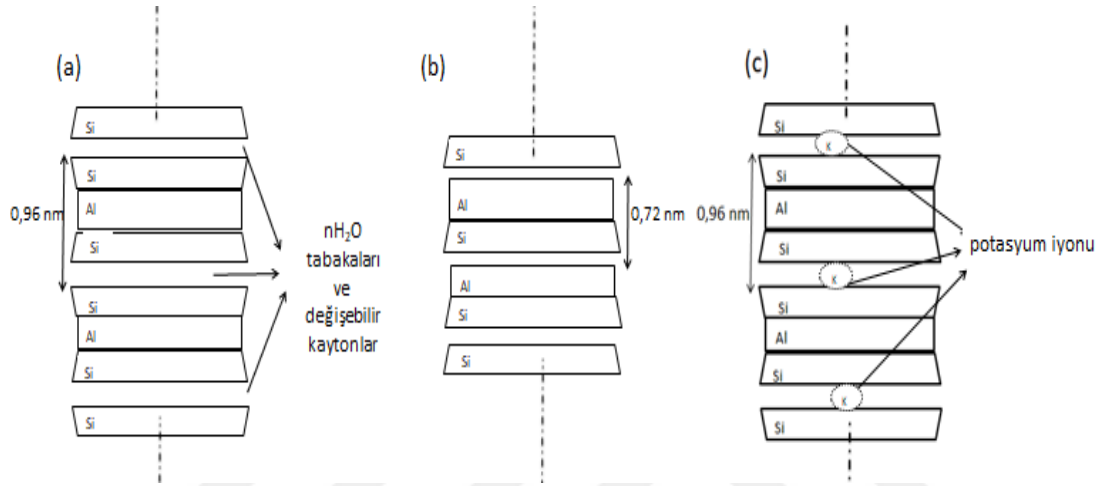
3. ZEMİNLERDE KAYMA DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Zeminlerin kayma direnci parametrelerini etkileyen faktörler günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Zeminlerin kayma direnci parametrelerini etkileyen bazı faktörler mineroloji, kıvam limitleri, kil yüzdesi, efektif normal gerilme, kesme hızı ve deney yöntemi olarak sıralanabilir. Aşağıda konu ile ilgili bilgilerin yanısıra daha önce araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar da özetlenmiştir.

3.1. Minerolojinin Etkisi

Çakıl, kum veya siltten meydana gelen zeminler fiziksel ya da orta derece kimyasal bozuşma süreci sonunda oluşurken, ana kayalarının kimyasal yapılarını muhafaza etmelerine rağmen killi zeminler için bu durum geçerli olmamaktadır. Bunun sebebi killerin oluşum sırasında büyük kimyasal bozuşmalar geçirerek ana kayada farklı yeni bir malzemeye dönüşmüş olmasıdır. Bu doğrultuda killerin diğer zemin türlerine kıyasla mühendislik özelliklerinin ve davranışlarının farklı olduğu söylenebilmektedir. Yaygın olarak bulunabilen kil mineralleri kaolinit, illit ve montmorillonit olarak sıralanabilmektedir. Kaolinit güçlü kimyasal bağlardan meydana gelen salümin ve silis levhalardan oluşmaktadır. Bu yüzden oldukça kararlı bir yapıya sahip olduğu söylenebilmektedir. Montmorillonit zayıf bağlardan oluşan iki adet silis levhası ve bir adet alümin levhasından meydana gelmektedir. Bu yüzden su tutma kapasiteleri yüksektir. İllit, montmorillonitlere benzer bir yapıya sahip olmakla birlikte her bir tabakada potasyum iyonları bulundurmaktadır. Bu yapıları sayesinde monmorillonitlerden daha güçlü yapılara sahiplerken kaolinitlerden daha zayıf yapıda bulunmaktadırlar (Şekil 3.1). Kil parçacıkları 2×10^{-6} metreden daha küçük çapa sahip olmakla beraber optik mikroskopla görülmeyerek bilimsel çalışmalar için elektron mikroskobu gerekmektedir. Bu durum kil partiküllerinin şeklinin diğer partiküllere göre çok daha farklı olduğunu göstermektedir. Killerin levhamsı şekilleri ve küçük çaplı partikülleri nedeniyle yüzey alanının kütleye oranı diğerlerine göre daha büyük olmaktadır. Özgül yüzey alanı olarak adlandırılan bu durum sayesinde partiküller arasında bulunan temas alanı fazladır. Bu şekilde su moleküllerinin bağlanmasında oldukça fazla yer sağlamaktadır. Bu yüzden birim ağırlıkların birkaç katı daha fazla suyu içlerine çekme kapasitesine sahip olabilmektedir. Kil ve su mineralleri arasındaki bu etkileşim kayma direnci dayanımını da etkilemektedir. Örneğin %10 su içeriğine sahip bir kil numunesinin dayanımı, %50 su içeriğine sahip bir kil numunesinin dayanımından daha yüksek olmaktadır (Coduto, 2001).

Zeminlerin dayanımı, zeminde bulunan kırık ve çatlaklardan etkilenecek dayanımı düşürebilmektedir. Doğal zeminlerdeki makro dokunun incelendiğinde tanımlamalarının yapıldığı kriterler geliştirilmiştir. Örneğin ince daneli zeminlerde çatlaklı yapılarda kırılmaların belirgin bir şekilde düzlem boyunca uzanarak göçme dayanımı azaldığı gözlemlenmişken, kaygan yapılar için bu durum kırılma düzlemleri boyunca parlak veya cilalı hatta çizgili görünümünün bulunabildiği sonucuna varılmıştır (ASTM D2488-09a, 2009).



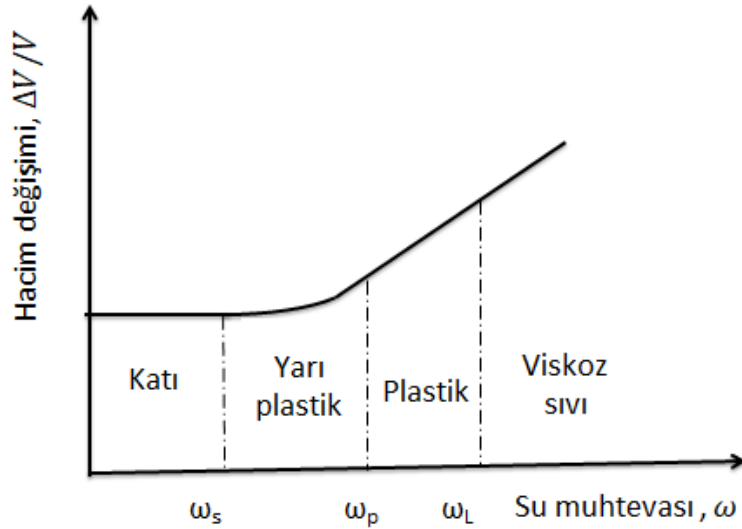
Şekil 3.1. Montmorillonit (a), Kaolinit (b) ve İllit (c) yapılarının şematik diyagramı

Kaynak: (Coduto, 2001)

3.2. Kıvam Limitlerinin Etkisi

Mühendislik davranışları için ince daneli zeminlerin içeriklerinde bulunan su miktarına (su muhtevası) göre davranışlarının değiştiği bilinmektedir. Oldukça katı kıvamda bulunan bir kil numunesi içerisindeki su miktarı artırılarak viskoz halde olan sıvı bir kıvama getirilebilmektedir. Bununla beraber dayanımda büyük değişimler meydana gelebilmektedir. İnce daneli zeminlerde su muhtevasına bağlı olarak gerçekleşen değişimler daneleri oluşturan kristal yapıya, zeminin arazideki çökelme koşuluna ve zeminin boşluklarında yer alan suyun kimyasal yapısına bağlı olmaktadır. Killerin kıvamının belirlenebilmesinde, içerdiği su muhtevasına göre meydana gelen değişimlerin sonucunun tanımlanabilmesi amacıyla deneysel saptamalar yapılmıştır. Bu tanımlamalar kıvam limitleri olarak adlandırılmaktadır. Kıvam limitleri olarak nitelendirilen su muhtevası değerleri, 1900'lü yılların başında Atterberg tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemle ince daneli zeminlerin su miktarına göre plastisitesini nasıl etkilediğinin anlaşılmasını sağlamıştır. Zeminlerde kullanılan başlıca kıvam (Atterberg) limitleri plastik limit (w_p), likit limit (w_L) ve büzülme

limiti (w_s) olarak sıralanmaktadır. Plastik limit zeminin plastik kıvamdan yarı plastik kıvama dönüşümündeki su muhtevasını, büzülme limiti zeminin yarı plastik bir kıvamdan katı bir kıvama dönüşümündeki su muhtevasını, likit limit ise zeminin viskoz halindeki bir sıvı halden plastik kıvam haline döndüğü andaki su muhtevası değerini ifade etmektedir. Şekil 3.2’de su muhtevası değıştikçe zeminlerde meydana gelen hacim değışikleriyle beraber kıvam limitlerinin tanımının Şekilsel gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2. Zeminlerin su muhtevası-hacim değışimi davranışını altında kıvam limitlerinin tanımı.

Kaynak: (Özaydın, 1989: 30)

Zeminlerin sınıflandırılmasında plastisite indisi değeri de kullanılması gerektiğini öneren Atterberg, plastisite indisi değeri zeminin plastik olduğu su muhtevası aralığı olarak adlandırmıştır. Plastik limit ile likit limit arasında kalan su muhtevası değeri plastik davranışın sergilendiği plastisite indisi değeri. Plastisite indisi (I_p) değeri Eşitlik 3.1’de verilmiştir.

$$I_p = (w_L - w_p) \quad (3.1)$$

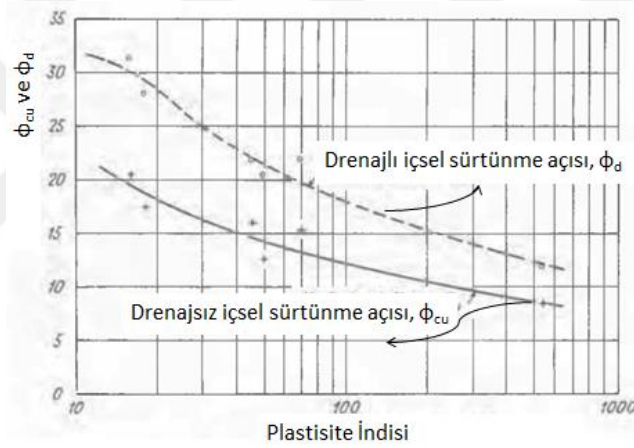
Aktivite ise 1953 yılında Skempton tarafından tanımlanan, plastisite indisi değeri kil yüzdesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Kil yüzdesi, 2 mikrondan küçük parçacıkların ağırlıkça yüzdesini temsil etmektedir. Aktivite değeri 1 civarı ($1,25 > A > 0,75$) olan killer normal, $A > 1,25$ olan killer aktif ve de $A < 0,75$ olan killer pasif olarak isimlendirilmektedir.

Bu limit değeri dışında Atterberg tarafından ince daneli zeminlerin suyun etkisi altındaki davranışlarını belirlemek için aşağıda belirtilen limitleri de tanımlamıştır.

1. Rötire limiti- hacim değışimi için alt sınır

2. Plastik limit-plastik durum için alt sınır
3. Kohezyon limitiyle danelerin birbirleriyle baplantısını kaybetmesi
4. Yapışkanlık limitiyle kilin metal bıçakla olan adezyonunu kaybetmesi
5. Likit limit-viskoz akış alt sınırı
6. Viskoz akış alt limiti
7. Viskoz akış üst limiti olarak sıralanmaktadır (Holtz vd., 2015: 40; Özyayın, 1989: 30).

Kayma direnci ile kıvam limitleri arasındaki ilişki geçmişten bugüne araştırılan konulardan biridir. R.E. Gibson (1953), likit limite hazırladığı örselenmiş kil numuneler üzerinde drenajlı ve drenajsız deneyler yapmıştır. Normal konsolide kiiler için drenajlı ve drenajsız kayma direncinin plastisite indisiyle ilişkili olduğu sonucuna varmıştır. Şekil 3.3'te bu ilişki gösterilmiştir.



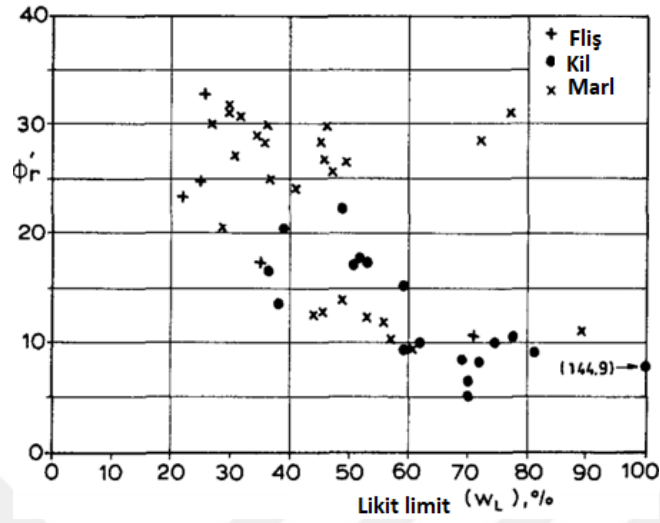
Şekil 3.3. Örselenmiş normal konsolide kiler için Plastisite indisi ile kayma direnci açısı arasındaki ilişki.

Kaynak: (Gibson, 1953)

Olson (1974), illit, monmorillonit ve kaolin numuneleri üzerinde yaptığı deneyler sonucu kayma direnci parametrelerini elde etmiştir. Yapılan çalışma sonucunda monmorillonitin en düşük kayma direncine, kaolin ise en yüksek kayma direncine sahipken, illitin montmorillonitten yüksek kaolinden düşük kayma direnci değerine sahip olduğunu ifade etmiştir.

Kalteziotis (1993), çalışma kapsamında kullanılan marl, kil ve fliş numuneleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucu kalıcı kayma direnci açısı ile likit limit değeri arasında bir ilişki elde edilmiştir. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere aynı likit limit değerine sahip

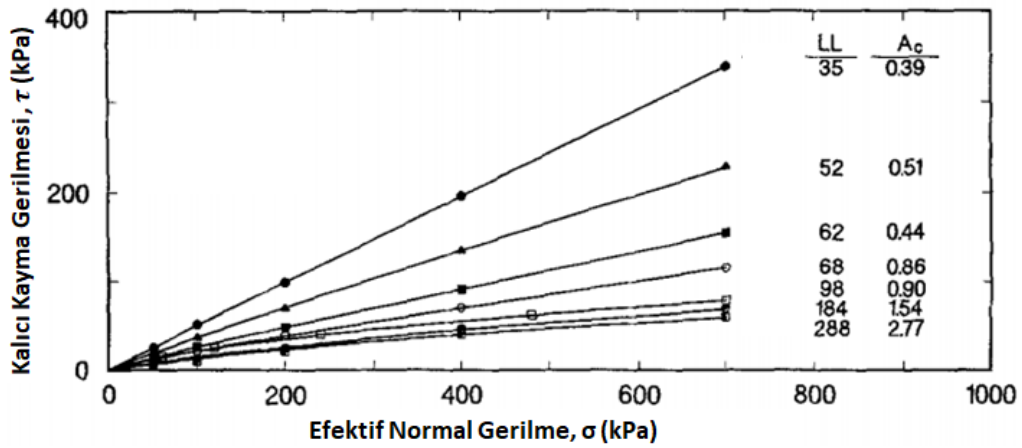
numunelerin farklı kalıcı kayma direnci açısı değerlerine sahip olmasının nedeninin killerin minerolojik yapılarının farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.4. Likit limit değeri ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki.

Kaynak: (Kalteziotis, 1993)

Stark ve Eid (1994), 32 adet killi zemin numuneleri üzerinde yaptığı halka kesme deneylerinde kalıcı kayma direncinin kil minerallerinin şekline ve boyutuna bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Likit limit ve aktivite değeri de kil numunelerinin isimlendirilmesinde bir gösterge olduğundan kalıcı kayma direncinin belirlenmesinde etkili olduğunu belirtmiştir. Kil numunelerde minerolojinin kalıcı kayma direncine etkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



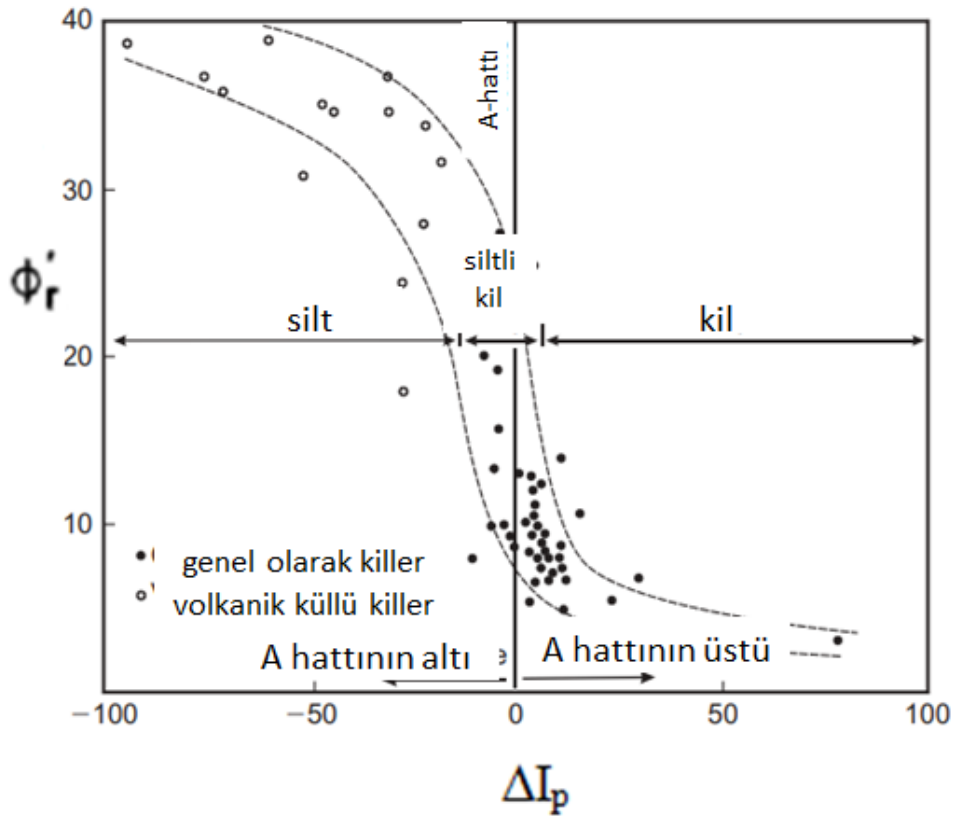
Şekil 3.5. Kil numuneler için minerolojinin kalıcı kayma direncine etkisi.

Watry (2000), aynı bölgeden alınan benzer minerolojik özelliklere sahip bentonit numuneleri üzerinde kalıcı kayma direnci parametrelerini elde etmek için üç eksenli basınç deneyi, halka kesme deneyi ve direkt kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler

sonucuyla bulunan kalıcı kayma direnci açılarının farklı olmasının sebebinin deney numunelerinin örselenmiş olması ve farklı deney aletlerinin kullanılmış olması olarak düşünülmektedir. Deney sonuçlarının güvenilirliğinin ölçülebilmesi için numunelere ait Atterberg limitleri, kil yüzdesi ve normal efektif gerilme değerlerinin etkili olduğu ve belirtilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Wesley (2003), yaptığı deneysel çalışmada Casagrande kartından yola çıkarak ince daneli zeminlerin özelliklerinin likit limit veya plastik limit içeren bağıntılarla ifade edilmesi gerektiğini savunmuştur. Kalıcı kayma direnci açısının Casagrande kartında yer alan ΔI_p ile değişimini incelemiştir. Likit limit ve ΔI_p 'deki artışla birlikte kalıcı kayma direnci açısının azaldığı sonucuna varılmıştır. Şekil 3.6'da bu ilişki gösterilmiştir. Eşitlik 3.2'de çalışma kapsamında elde edilen bağıntı verilmiştir.

$$\phi_r = 322,04 * (w_L \pm \Delta I_p)^{-0,782} \quad (3.2)$$



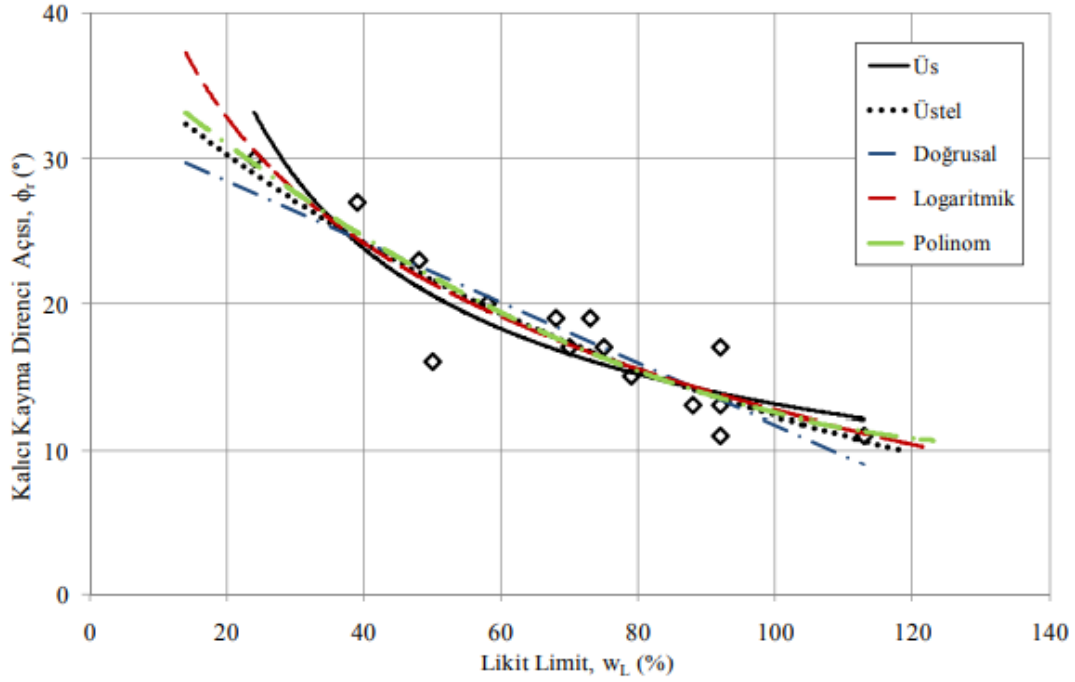
Şekil 3.6. ΔI_p ile kalıcı kayma direnci açısının değişimi

Kaynak: (Wesley,2003)

Bayın (2011), 15 adet deney numunesi üzerinde yaptığı konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla elde edilmiş olan kalıcı kayma direnci açısıyla zeminlerin bazı endeks özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Şekil 3.7'de kalıcı kayma direnci

açısının likit limit değeriyle meydana gelen değişimi verilmiştir. Likit limit değeri artmasıyla birlikte kalıcı kayma direncinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Eşitlik 3.3'te bu ilişkiye ait üs eğri denklemi verilmiştir.

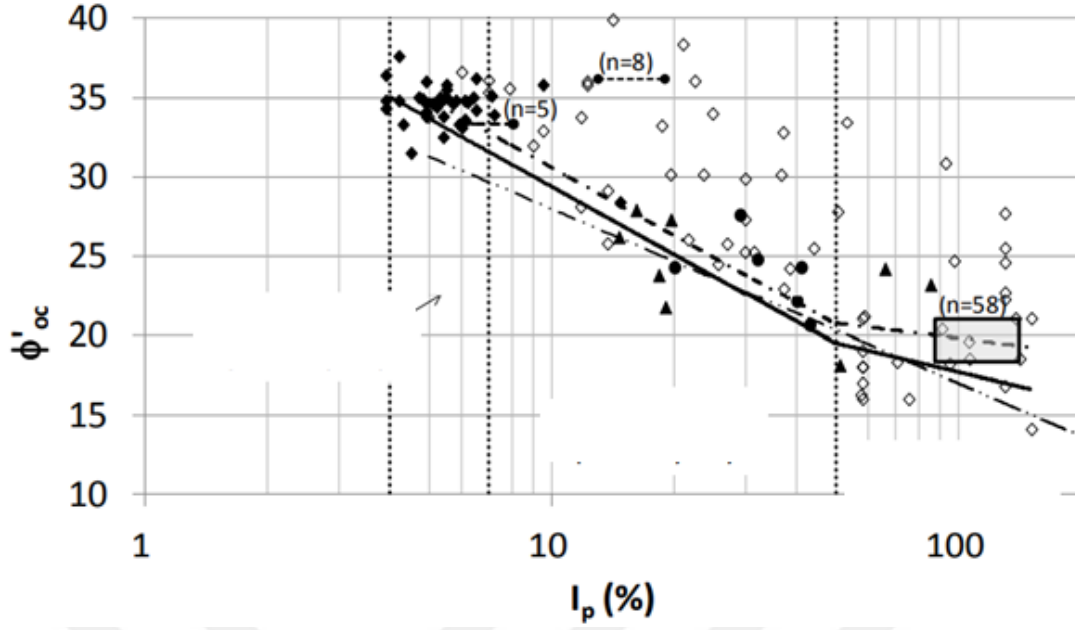
$$\phi_r = 263 * w_L^{-0.65} \quad (3.3)$$



Şekil 3.7. Likit limit değeri ile kalıcı kayma direnci açısının değişimi.

Kaynak: (Bayın,2011)

Sorensa (2013), örselenmemiş aşırı konsolide Danimarka kili üzerinde plastisite indisi değerleri %7-150 değerleri arasında farklı değerlere sahip numunelere üzerinde üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Şekil 3.8'de pik kayma direnci açısıyla kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasında elde edilen ilişki verilmiştir. Plastisite indisi arttıkça kayma direnci açısının tanjantında azalma olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçların korelasyon değerlerinin tutarlı olmasına rağmen zaman ve maliyet kısıtlaması olan durumlarda kullanılmasının gerektiği tavsiye edilmiştir.

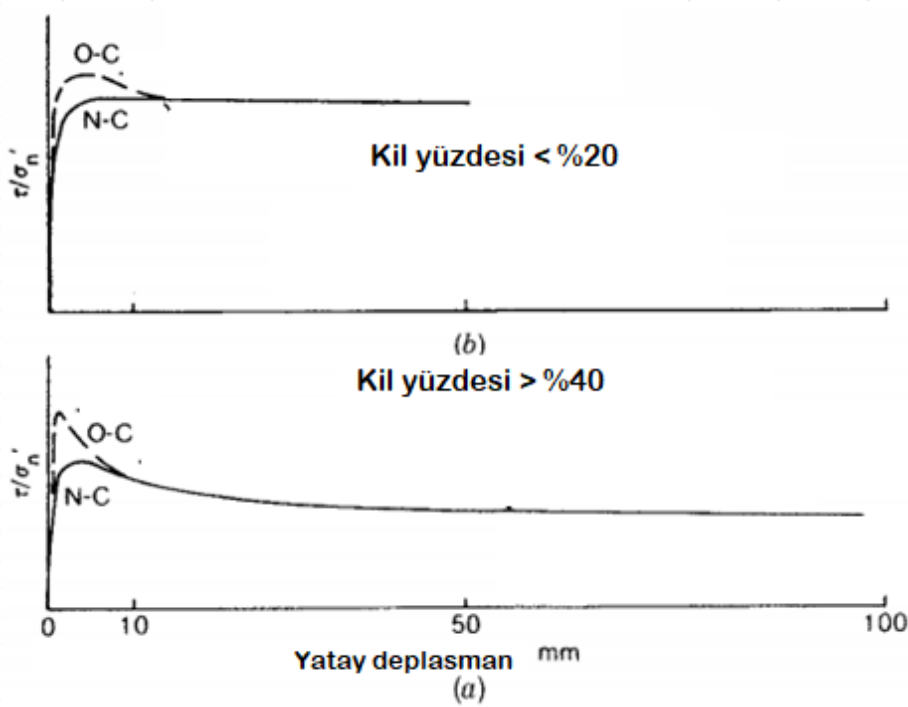


Şekil 3.8. Örselenmemiş aşırı konsolide killerde pik kayma direnci açısının plastisite indisi ile ilişkisi.

Kaynak: (Sorensa, 2013)

3.3. Kil Yüzdesinin Etkisi

Boyutları diğer zemin numunelerinden küçük olan kil mineralleri doğada ince plaka halinde bulunmaktadır. Kil yüzdesi kavramı, zemin numunesinin içerisinde yer alan kil miktarını ifade etmektedir. Kayma direncine kil minerallerinin boyutu ve miktarının önemli derecede etkisi bulunmaktadır. Bunun nedeni zeminde yer alan kil danelerinin boyutunun artmasıyla daneler arası sürtünme kuvvetinin etkinliği artarak zeminlerin kalıcı ve pik kayma direnci arasındaki fark azalmaktadır. Şekil 3.9'da belirtilen bu durum, kil yüzdesinin %20den fazla olduğu durumlarda pik kayma direnci açısı ile kalıcı kayma direnci açısındaki fark fazla iken, kil yüzdesinin % 40'dan fazla olduğu durumlar için tam tersi olarak belirtilmektedir (Skempton, 1985).



Şekil 3.9. Pik ve kalıcı kayma direnci açısı arasındaki farkın kil yüzdesine göre değişimi.

Kaynak: (Skempton, 1985)

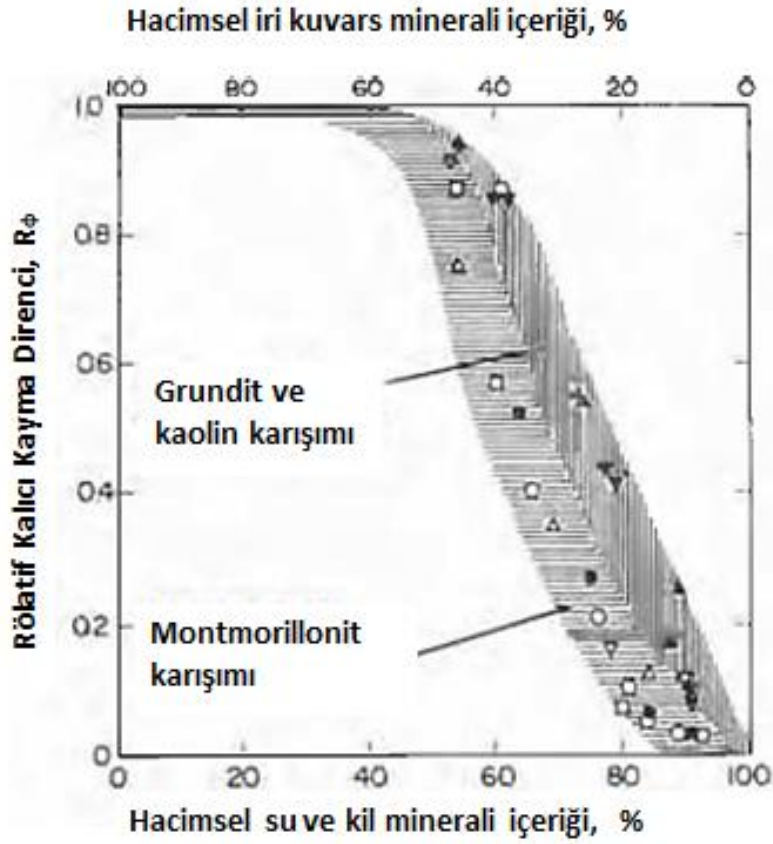
Çapı 0,002 milimetreden küçük olan kaolin, montmorillonit ve illite olduğu üzere yassı bir şekle sahip kil minerallerine ait kalıcı kayma direnci açıları 15, 10 ve 5 olarak sıralanabilmektedir. 0,002 milimetreden daha küçük dane çapına sahip diğer kil türleri, çaplarının daha küçük olmasına rağmen yassı yüzey şekilleri olmadığı için kalıcı kayma değeri açıları daha yüksek değerlerde olmaktadır (Mitchell, 1993).

Kenney (1977) yaptığı tekrarlı kesme kutusu deneyleriyle mika, montmorillonit, kaolin, grundit ve quartz kumu karışımlarıyla hazırlanan numuneler üzerinden çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar sonucu mineral tipinin etkisinin zeminlerin kayma direnci üzerine etkisini incelemiştir. Mika, montmorillonit, kaolin, grundit ve bentonitin iri bir mineral olan kuvars mineraliyle karışımı sonucu yapılan deneylerle, kalıcı kayma direncindeki değişimler incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen rölatif kalıcı kayma direnci (R_ϕ) Eşitlik 3.4'teki şekliyle tanımlanmıştır.

$$R_\phi = \frac{\tan\phi_r(\text{karışım}) - \tan\phi_r(\text{kil minerali})}{\tan\phi_r(\text{kuvars}) - \tan\phi_r(\text{kil minerali})} \quad (3.2)$$

Tekrarlı kesme kutusu deneylerinin her bir kil minerali ile yapılan karışımlar sonucu elde edilen kalıcı kayma direnci değerleriyle hacimce ve ağırlıkça kuvars mineralleri, kil

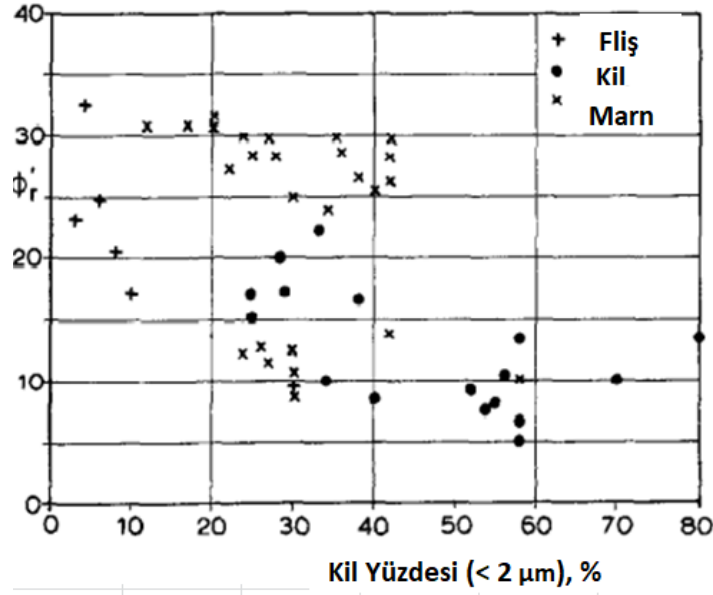
minerali yüzdeleri beraber değerlendirilerek rölatif kalıcı kayma direnci değeri oluşturulmuştur. Bu ilişki Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Kıl yüzdesinin Rölatif kalıcı kayma direnci parametresi ile ilişkisi.

Kaynak: (Kenney, 1977)

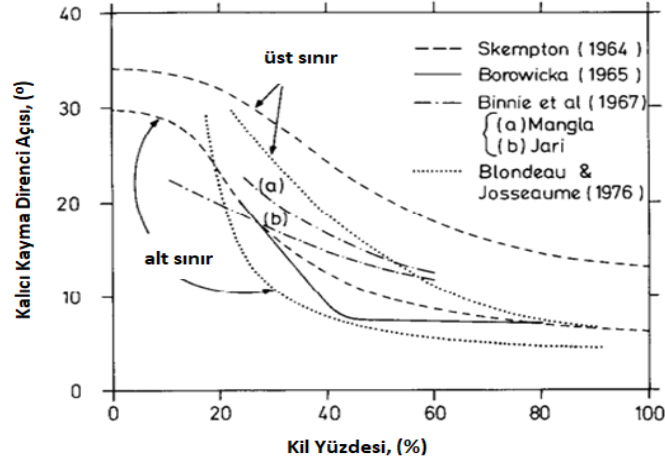
Kalteizois (1993), farklı miktarlardaki fliş, kıl ve marn numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda kıl yüzdelere göre kalıcı kayma direnci açılarının değişimi incelenmiştir. Kıl yüzdelerinin kalıcı kayma direnci üzerindeki etkisi Hellenic zemin türü için birbirine çok benzer davranışlar göstermektedir. Yüksek kıl yüzdesine sahip zeminlerin kalıcı kayma direnci açısına etkisinde kıl minerallerinin özelliklerinin etkili olduğu görülürken, düşük kıl yüzdesine sahip zeminler için kalıcı kayma direnci açısının üzerinde silt minerallerinin etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Bu iki uç nokta arasında zemin danelerinin yassı ve yuvarlak oluşuna göre oldukça hassas bir geçiş noktasının mevcut olduğu söylenerek bu durumdan dolayı kıl yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasında net bir ilişkinin belirtilmesinin zorlaştığı belirtilmiştir. Şekil 3.11'de yapılan çalışmaya göre kalıcı kayma direnci açısıyla kıl yüzdesi arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 3.11. Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki.

Kaynak: (Kalteizois, 1993)

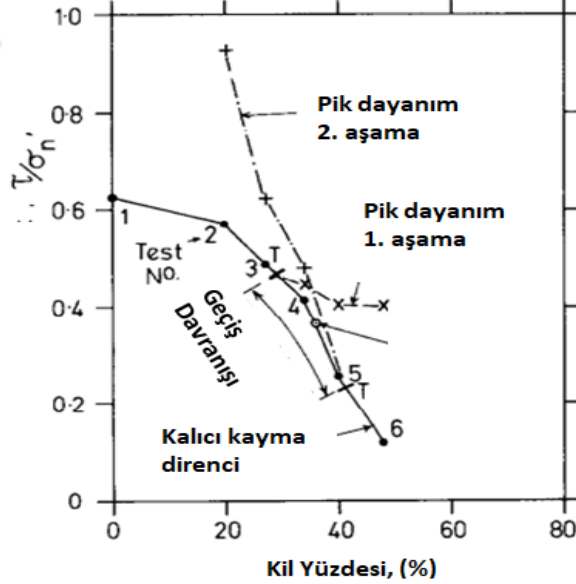
Lupini ve diğ. (1981), yaptıkları çalışmada ilk önce kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişkiye dair literatürde yapılan önceki çalışmalara ait korelasyonları Şekil 3.12’de toplu haliyle vermiştir. NGI tipi halka kesme deney aletinde yaklaşık 50 numune üzerinde yapılan deneylerde kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Kil yüzdesi ve kil malzeme miktarının deneyin hangi kesme modunda gerçekleşeceğini gösteren baş etkenlerden olduğu belirtilmiştir. Bu etkiyi belirlemek amacıyla farklı kum-bentonit karışımları üzerinde halka kesme deneyi yapılmıştır. Kil yüzdesi ve kalıcı kayma direnci arasındaki ilişkinin, kesme modu ve kalıcı kayma direnci açısıyla arasındaki ilişkiyle doğrudan alakalı olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.13’te kesme moduyla kalıcı kayma direnci arasındaki ilişkinin kalıcı kayma direnci ve kil yüzdesi arasındaki ilişkiyle olan alakası verilmiştir. Kil yüzdesinin pik ve kalıcı kayma dirençlerine göre sergilediği davranış görülmektedir. Kalıcı kayma direncinin davranışı düz çizgiyle gösterilirken pik kayma direncinin davranışı kesikli çizgiyle gösterilmektedir. Kil oranının %50’den fazla olduğu durumlarda kalıcı kayma direncinin pik kayma direncinden daha düşük değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 3.12. Kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki

Kaynak: (Lupini vd., 1981).

Mesri ve Cepeda- Diaz (1986), kil mineralleri arasında yassı şekle sahip olmayan mineraller de bulunduğu için kil malzeme miktarıyla kil yüzdelerinin arasında genel bir korelasyonun olması şartının bulunmadığı savunulmaktadır. Yassılık ile kil yüzdesi arasında bir korelasyon varsa genel kil minerallerinde bulunan yassılık-dane boyutu ilişkisinden oluşan dolaylı bir ilişki olabileceği belirtilmiştir.

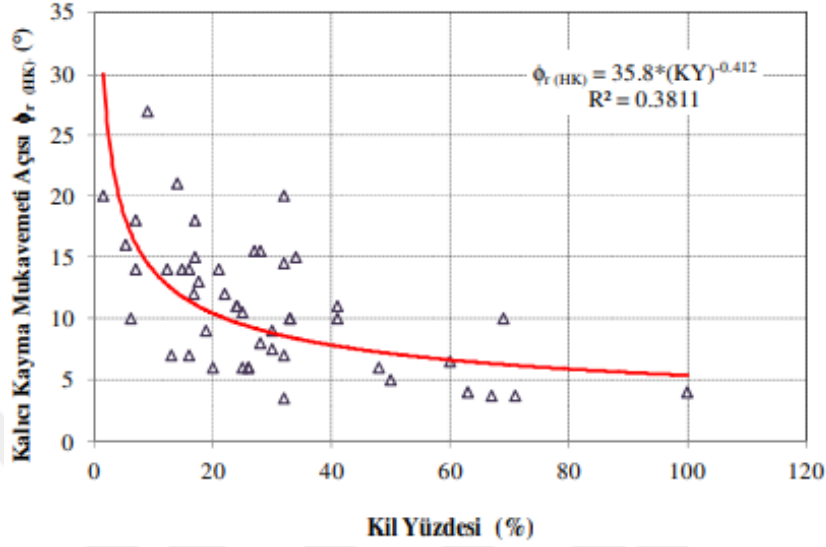


Şekil 3.13. Kalıcı kayma direncinin kesme modu ve kil yüzdesine bağlı değişimi.

Kaynak: (Lupini vd., 1981)

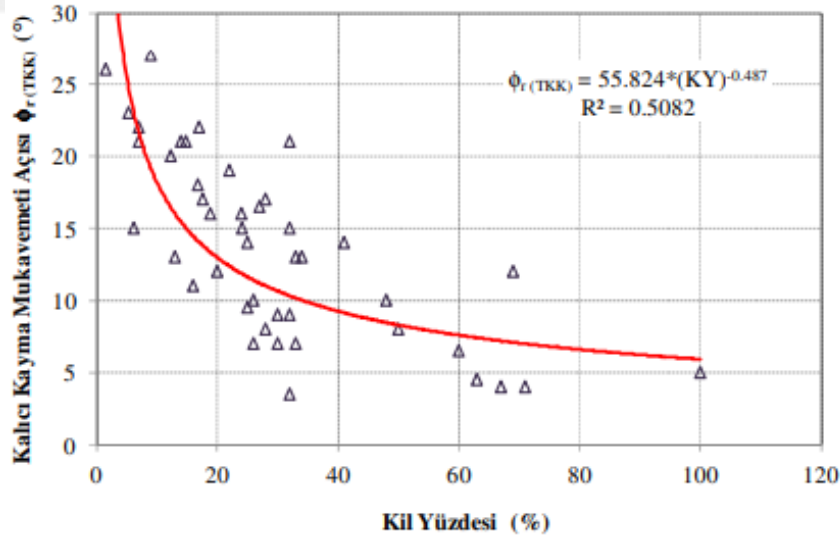
Hatipoğlu (2012), kalıcı kayma direncini etkileyen faktörleri incelediği çalışmasında, kalıcı kayma direncinin kil oranı yüksek olan zeminlerde daha etkili olduğunu vurgulayarak,

kil yüzdesinin kalıcı kayma direnci üzerine etkisini çalışma kapsamında incelemiştir. Halka kesme deneyiyle elde edilen sonuçlar Şekil 3.14’de, tekrarlı kesme kutusu deneyiyle elde edilmiş olan sonuçlar ise Şekil 3.15’te verilmiştir. Genel artan kil yüzdesiyle birlikte kalıcı kayma direnci açısının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3.14. Halka kesme deneyinde kalıcı kayma direncinin kil yüzdesi ile değişimi.

Kaynak: (Hatipoğlu,2012)



Şekil 3.15. Tekrarlı kesme kutusu kalıcı kayma direncinin kil yüzdesi ile değişimi.

Kaynak: (Hatipoğlu,2012)

3.4. Efektif Normal Gerilmenin Etkisi

Hawkins ve Privett (1985), yapılan çalışmada kenar-yüzey etkileşimlerinin yerini yüzey-yüzey etkileşimine bıraktığı görülerek, temas alanı arttıkça zeminlerin kayma direncinin

azaldığı sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda kalıcı göçme zarflarında en fazla 200 kPa normal efektif gerilmeye kadar kalıcı kayma direnci açılarıyla efektif normal gerilme arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değerden daha yüksek normal gerilme değerlerinde, kalıcı kayma direnci açısı değerinin bağımsız olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalara kil içeriği az miktarda bulunan zeminlerde kalıcı göçme zarflarında daha büyük eğrilikler gözlemlenmiştir fakat bu duruma sebep olan etken belirlenememiştir.

Stark (1994), kil yüzdesi % 50'den fazla olan kohezyonlu zeminlerde ve likit limit değeri %60-220 arasında olan kohezyonlu zeminlerde kalıcı göçme zarflarında eğriliklerin olabileceği belirtilmiştir.

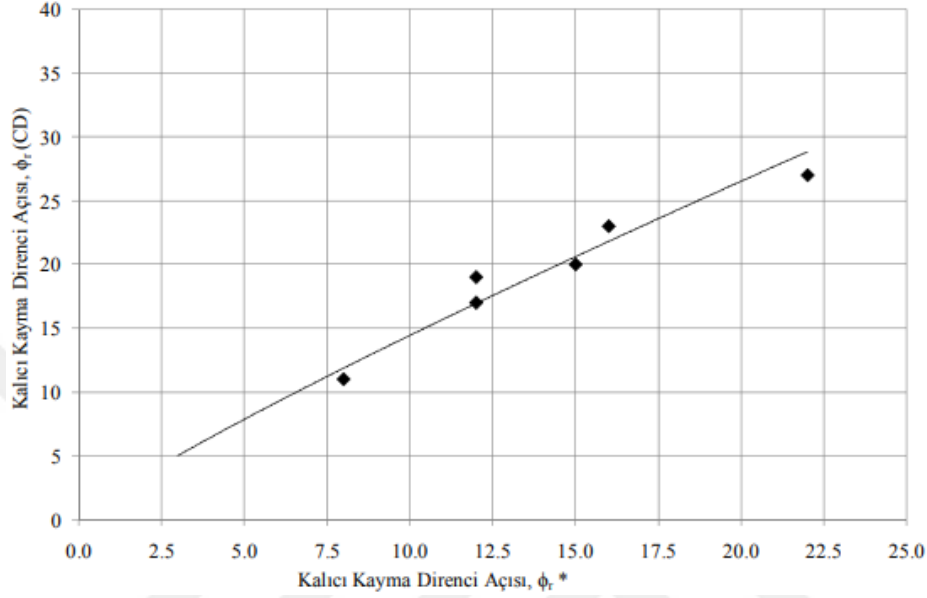
3.5. Deney Yönteminin Etkisi

Hawkins ve Privett (1985), yaptıkları çalışmalarda Bromhead tipi halka kesme deneyi ile geleneksel kesme kutusu deneyiyle elde edilen sonuçların benzer olabileceği görülmüştür. Kesme kutusu deneyinde çift yönlü hareketten kaynaklanan net bir kesme yüzeyinin oluşmaması gibi problemler oluşabileceğinden gerçeğinden daha yüksek değerlerde kalıcı kayma dirençlerinin çıkabileceği belirtilmiştir. Halka kesme deneyinin kesme kutusu deneyine göre hata payının daha az olduğu gerekçesiyle kalıcı kayma direncinin belirlenmesinde daha iyi sonuç vereceği düşünülmektedir. Halka kesme deneyinin gerçekleştirilmesi kesme kutusu deneyine göre daha kolay, daha güvenilir, nispeten daha hızlı ve de daha ucuz olduğu sonucuna varılmıştır.

Bayın (2011), 15 adet deney numunesi üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapıldıktan sonra deney yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla seçilen 6 adet deney numunesi üzerinde tekrarlı kesme kutusu deneyi yapmıştır. Bu doğrultuda deneylerden elde edilen kalıcı kayma direnci açıları ile zeminlerin endeks özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi kalıcı kayma direnci sonuçlarının, tekrarlı kesme kutusu deneyi kalıcı kayma direnci sonuçlarından daha büyük çıktığı görülmüştür. Bunun sebebinin konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde numuneye uygulanmış olan şekil değiştirmenin, tekrarlı kesme kutusu deneyinde uygulanandan daha düşük olması olarak görülmektedir. Şekil 3.16'da konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde elde edilmiş olan kayma direnci sonuçlarıyla, tekrarlı kesme kutusu deneyinde elde edilmiş olan kalıcı kayma direnci sonuçlarının kıyaslaması verilerek, Eşitlik 3.5'te ise iki deney yöntemi arasındaki bağıntı verilmiştir. Aşağıdaki

eşitlikte görüleceği üzere iki deney yöntemi arasında kalıcı kayma direnci arasındaki birkaç derecelik farkın stabilite analizlerindeki güvenlik sayıları için önemli değişikliklere neden olabileceği sonucuna varılmıştır.

$$\phi_{r(CD)} = 1.92(\phi_r^*)^{0.88}, R^2=0,94 \quad (3.5)$$

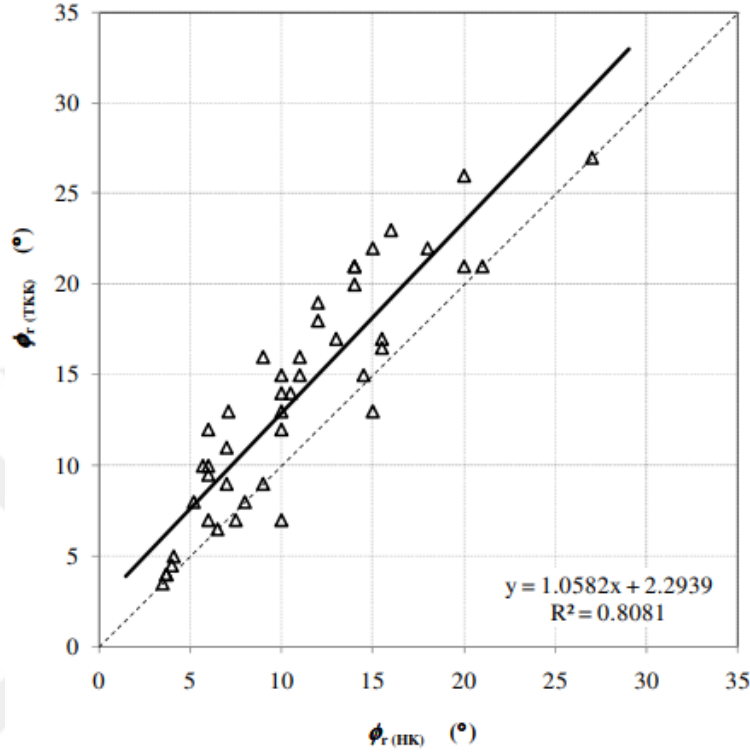


Şekil 3.16. Kalıcı kayma direnci açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyi ve CD deneyi sonuçlarına göre değişimi.

Kaynak: (Bayın, 2011)

Hatipoğlu (2012), çalışma kapsamında 42 numune için halka kesme deneyi ve 45 numune için tekrarlı kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Aynı zamanda bu deney yöntemleriyle kıyaslamak amacıyla daha önce yapılmış olan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları kullanılmıştır. Bu doğrultuda deney yöntemlerinin kalıcı kayma direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kalıcı kayma direncini belirlemede en uygun yöntemin halka kesme deneyi olduğu fakat uygulama kolaylığı göz önünde bulundurulduğunda tekrarlı kesme kutusu deney yönteminin tercih edildiği, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinin ise bu deney yöntemlerinin yanında oldukça sınırlı kaldığı sonucuna varılmıştır. Halka kesme deneyinin öne çıkmasındaki en büyük etkenin, gerilmelerin üniform dağılması ve kesme süresince numune kesit alanının sabit olarak istenilen deformasyon seviyesine rahat bir şekilde ulaşılabilmesi olarak belirtilmiştir. Fakat numune hazırlanması ve kurulumu yönüyle diğer deney yöntemleri yanında avantajlı sayılamamaktadır. Tekrarlı kesme kutusu deneyinin çevrimlerden dolayı kesme yüzeyinin sabit kalmama ihtimali ve en zayıf kesite denk gelmeme ihtimali ise bu deney yönteminin dezavantajı olarak sayılabilmektedir. Üç eksenli basınç

deneyi yöntemi ise diğer yöntemlere göre kesme yüzeyinin belirli olmaması ve kesme deformasyonunun daha sınırlı olduğu belirtilmiştir. Şekil 3.17’de kalıcı kayma direnci açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyi ve halka kesme deneyinde değişimlerinin grafiksel gösterimi ve bağıntıyla ifade edilişi verilmiştir.

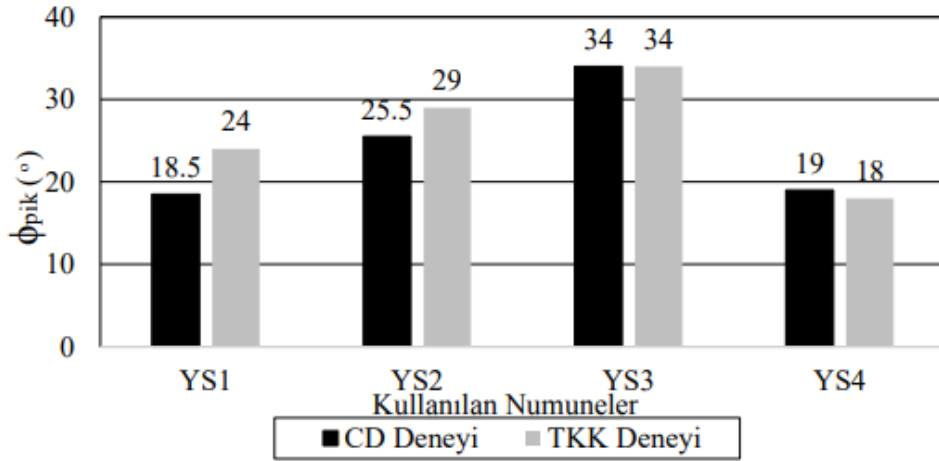


Şekil 3.17. Kalıcı kayma direnci açılarının tekrarlı kesme kutusu deneyi ve halka kesme deneyi sonuçlarına göre değişimi.

Kaynak: (Hatipoğlu, 2012)

Bu doğrultuda kalıcı kayma direnci açıları için, halka kesme deneyi sonuçlarının tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarına göre 2.3° daha düşük sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Satı (2016), doymun durumdaki 4 numune üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Pik kayma direnci açıları için genel olarak üç eksenli basınç deneyi sonuçlarının tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarından daha yüksek çıktığı ve aradaki farkın 1-6° arasında değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 3.18’de suya doymun durumdaki bu numuneler için pik kayma direncinin konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve tekrarlı kesme kutusu deneyindeki değerleri verilmiştir.

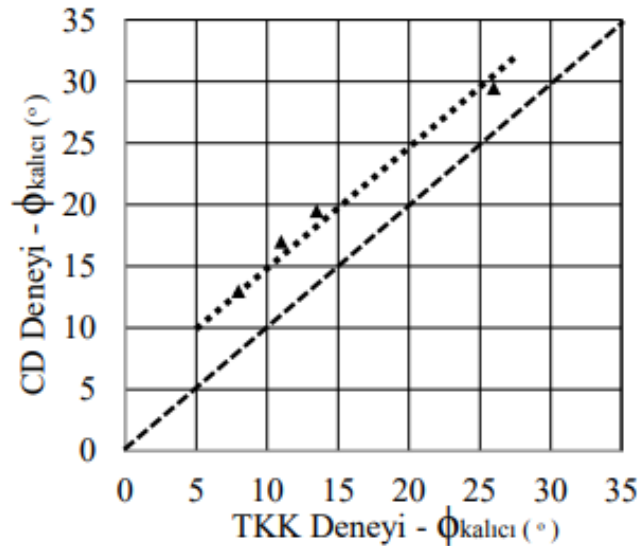


Şekil 3.18. Tekrarlı kesme kutusu ve CD deneylerinde pik kayma direnci açılarının karşılaştırılması.

Kaynak: (Satı, 2016)

Aynı çalışma kapsamında suya doymun numuneler için tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerine ait kalıcı kayma direnci açıları karşılaştırıldığında, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinin, tekrarlı kesme kutusu deneyi sonuçlarında yaklaşık 5° daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 3.19'da bu karşılaştırmaya ait Şekil verilirken, Eşitlik 5.6'da iki deney yöntemi arasındaki bağıntı ve korelasyon katsayıları verilmiştir.

$$\phi_{\text{kalıcı (CD)}} = \phi_{\text{kalıcı (TKK)}} + 5 \quad (3.6)$$



Şekil 3.19. Kalıcı kayma direnci açısının tekrarlı kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde karşılaştırılması.

Kaynak: (Satı, 2016)

3.6. Kesme Hızının Etkisi

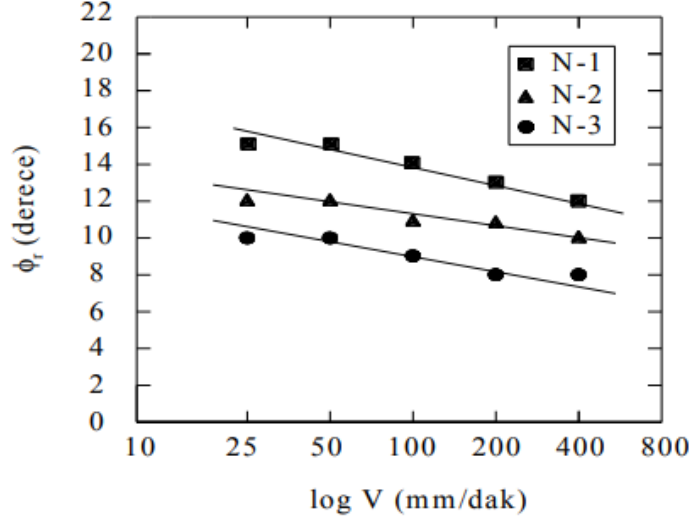
Arazi şartlarında meydana gelen kayma veya kesme hızlarının, oldukça yavaş hızlarla gerçekleşen bir heyelandan mı kaynaklandığı ya da yüksek hızlarla yer değiştirmelere neden olan bir depremden mi kaynaklandığı durumu göz önünde bulundurulduğunda, kesme hızlarının laboratuvar şartlarında farklı hızlarda belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. La Gutta ve diğ, (1970) yapılan çalışma sonucu 0,001 mm/dak ile 0,1 mm/dak değer aralığındaki hızlarda kalıcı kayma direncinde belirgin bir değişimin gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır (Hatipoğlu, 2012).

Skempton (1985), yaptığı çalışmada Tablo 3.1'de görüldüğü üzere laboratuvar şartlarında standart hızı 0,005 mm/dak olarak kayma direnci oranındaki sapma miktarını arazide en düşük hız değişimi için -%3, arazide en yüksek hız değişimi için ise +%5 arasında değişen standart sapma değeri belirlenmiştir. Yüksek kesme hızının kalıcı kayma direnci üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneyler yapmıştır. İki farklı normal gerilme altında 0,01 mm/dak hızında başladığı deneyden kalıcı kayma direncini elde ettikten sonra hızı 100 mm/dak hıza çıkararak kalıcı kayma direncindeki değişimi gözlemlemiştir. Boşluk suyu basıncının sönümlenmesi beklendikten sonra aynı periyot takip edilerek hız değerini gitgide arttırarak hızı 400 mm/dak hıza erişene kadar tekrarlandıktan sonra aradaki fark incelediğinde, kalıcı kayma direncinin belirlenmesinde dikkat çeken değişikliğin yavaş hızlarda belirgin olmadığı, 100 mm/dak hız değerinden daha yüksek değerlerde değişiklik meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 3.1. Kalıcı kayma direncinin yavaş hızlardaki yer değiştirmelerinin laboratuvar şartları ve arazi şartlarına göre kıyaslanması.

| Hız değişimi | mm/dak | Kayma direnci oranı (arazi/laboratuvar) |
|-------------------|-------------------|--|
| Arazide en düşük | 0,0001 = 5 cm/yıl | 0,97 |
| Genel laboratuvar | 0,005 = 7 mm/gün | 1,00 |
| Arazide en yüksek | 0,35 = 50 cm/gün | 1,05 |

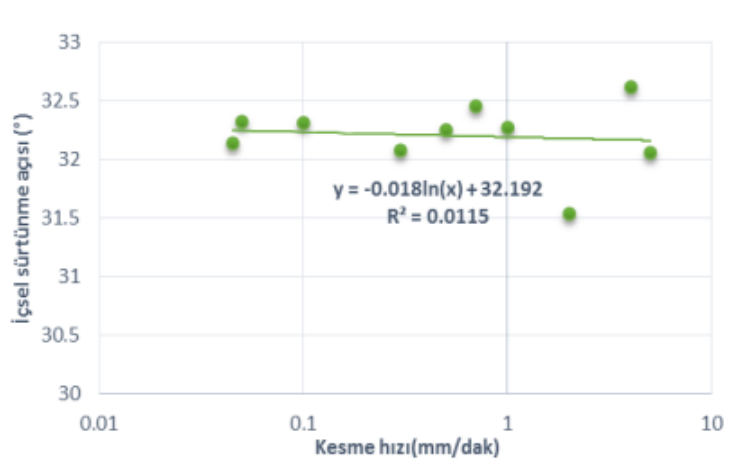
Koltuk (2005), 4 farklı numune üzerinde yapılan halka kesme deneylerinde 25, 50, 400, 200 ve 100 mm/dak hızlarında çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kil numuneler için pik kayma direnci açıları kesme hızına göre belirgin bir değişim gözlemlenemezken Şekil 3.20'de görüldüğü gibi kalıcı kayma direnci açılarının kesme hızının artmasıyla birlikte 2-3° arasında azaldığı görülmüştür.



Şekil 3.20. Kesme hızının kalıcı kayma direnci açısına etkisi.

Kaynak: (Koltuk, 2005)

Beren (2014), kesme kutusu deneyiyle 5 mm/dak ile 0,05 mm/dak hızları arasında değişen 9 farklı kesme hızı kullanılarak 4 farklı numune için drenajlı ve drenajsız şartlarda kayma direnci parametreleri elde edilmiştir. İncelemelere genel olarak bakıldığında kesme hızının artmasıyla içsel sürtünme açısında belirli bir oranda artış gözlemlenmiştir. Bu artış miktarı kimi numuneler için 1-1,5° arasında değişirken kimi numuneler içinse 2-3° arasında değişmektedir. Şekil 3.21'de kumlu kil numunesi için drenajsız koşulda içsel sürtünme açısı değerinin farklı hızlar doğrultusunda değişimi ve elde edilen denklem verilmiştir.



Şekil 3.21. Kumlu kil numunenin drenajsız koşulda kesme hızı-İçsel sürtünme açısı değişimi.

Kaynak: (Beren, 2014)

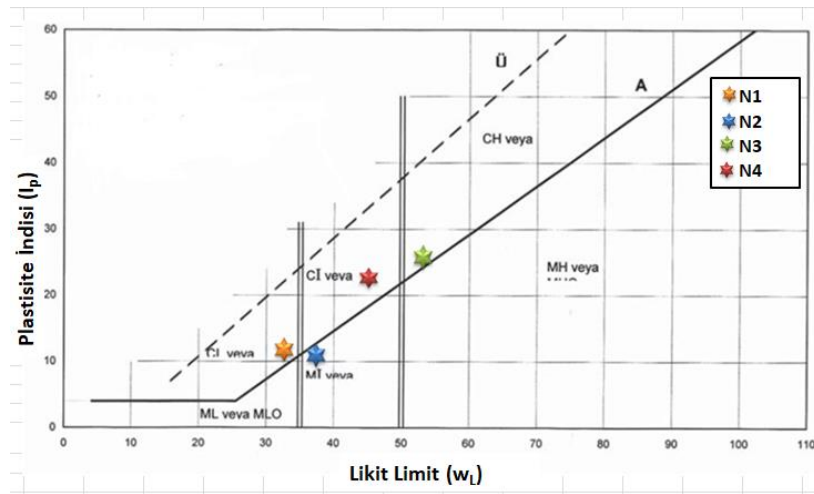
Kumlu kil numunesinde kesme hızının etkisinin oldukça büyük ölçüde olduğu görülmüştür. İçsel sürtünme açısının, kesme hızı arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır.

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında ince daneli zeminlerin kayma dirençlerini belirlemek için farklı laboratuvar deneyleriyle farklı bölgelerden alınan numuneler üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılan deneyler; direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi olarak sıralanabilmektedir. Deney numuneleri üzerinde elek analizi deneyi, hidrometre deneyi, standart proktor deneyi, kıvam limitleri deneyleri ve piknometre deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarından elde edilen zemin endeks özellikleriyle kayma direnci arasındaki ilişki çalışma kapsamında incelenmiştir. Bu bölümde deney numunelerinin özelliklerinin yanında deney sistemleri hakkında da bilgiler verilmiştir.

4.1. Deney Numunelerinin Geoteknik Özellikleri

Çalışma kapsamında kullanılan numuneler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yer alan örselenmiş numunelerdir. Direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi aletlerinde kullanılmak üzere 4 farklı örselenmiş deney numunesi üzerinde çalışılmıştır. Standart zemin laboratuvarı deneylerinden olan elek analizi deneyi, hidrometre deneyi, piknometre deneyi, kıvam limitleri deneyleri ve standart kompaksiyon deneyleri yapılarak numunelere ait dane çapı dağılımları, kil yüzdeleri, ince dane oranları, özgül ağırlıkları, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları, optimum su muhtevası değerleri ve kıvam limitleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan numuneler N1, N2, N3 ve N4 şeklinde adlandırılmış olup bu numunelerin Casagrande plastisite kartındaki yerleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir



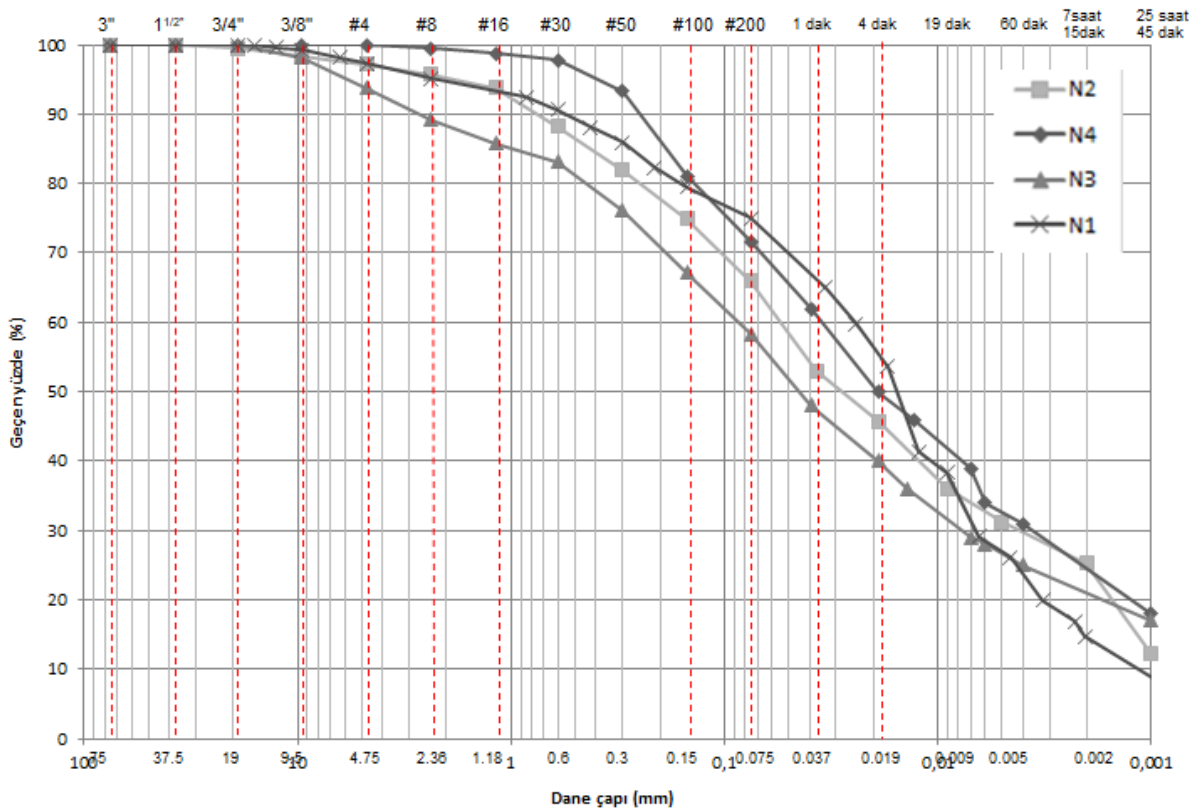
Şekil 4.1. Plastisite kartı üzerinde zemin numunelerinin gösterimi

Tablo 4.1’de çalışma kapsamında kullanılan deney numunelerine ait ince dane oranı (İDO), kil yüzdesi (KY), plastisite indisi (I_p , %), likit limit (w_L , %), özgül ağırlık ve zemin sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Deney numunelerinin bazı endeks özellikleri

| Numune Adı | w_L (%) | I_p (%) | KY (%) | G_s | İDO (%) | Zemin Sınıfı |
|------------|-----------|-----------|--------|-------|---------|--------------|
| N1 | 33 | 13 | 15 | 2.76 | 92.93 | CL |
| N2 | 36 | 11 | 17 | 2.67 | 74.9 | ML |
| N3 | 55 | 26 | 20 | 2.64 | 58.3 | CH |
| N4 | 46 | 22 | 22 | 2.65 | 71.6 | CL |

Çalışma boyunca; 2 adet düşük plastisiteli kil, 1 adet yüksek plastisiteli kil ve 1 adet düşük plastisiteli silt olmak üzere 4 adet numune kullanılmıştır. Bu zemin numunelerine ait dane çapı dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelere ait dane çapı dağılımı eğrileri

4.2. Numune Hazırlama Yöntemi

Çalışma kapsamında N1, N2, N3 ve N4 olmak üzere 4 adet deney numunesine ait endeks özellikleri belirlenmiştir. ASTM 4 nolu elekten elenerek elek altında kalan kısımlar standart proktor sıklığında kompaksiyon deneyi, 4 numune için de yapılmıştır. Her bir deney numunesi için kompaksiyon deneyleri sonucunda, optimum su muhtevası ve bu değerler için maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Deneylerin sürekliliği ve aynı şartlar altında gerçekleştirilmesi amacıyla 40 nolu elekten elenen elek altı numuneler 105° kapasiteye sahip etüvde en az 24 saat bekletilerek etüv kurusu elde edilmiştir. Deney işlemi gerçekleştirilmeden 1 gün önce etüvden çıkarılan deney numunesi 15 dakika bekletilerek soğumaya bırakıldıktan sonra yapılacak deneyin, numune boyutuna göre belirlenen hacim değerinde maksimum kuru birim hacim ağırlık ve çalışma kapsamında belirlenen optimum su muhtevası değerinde numune hazırlanmıştır. Halka kesme deneyi için desikatörde bekletilen numune, kesme kutusu ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için sıkıştırılıp gerekli numune boyutuna getirilerek desikatörde 1 gün boyunca bekletilmiştir. Bu şekilde su muhtevalarında değişiklik olmasının önüne geçilmiştir. Şekil 4.2'de çalışma boyunca numunelerin su kaybının önüne geçerek muhafaza edilmesi amacıyla kullanılan desikatör belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Hazırlanan deney numunelerini muhafaza amaçlı kullanılan desikatör.

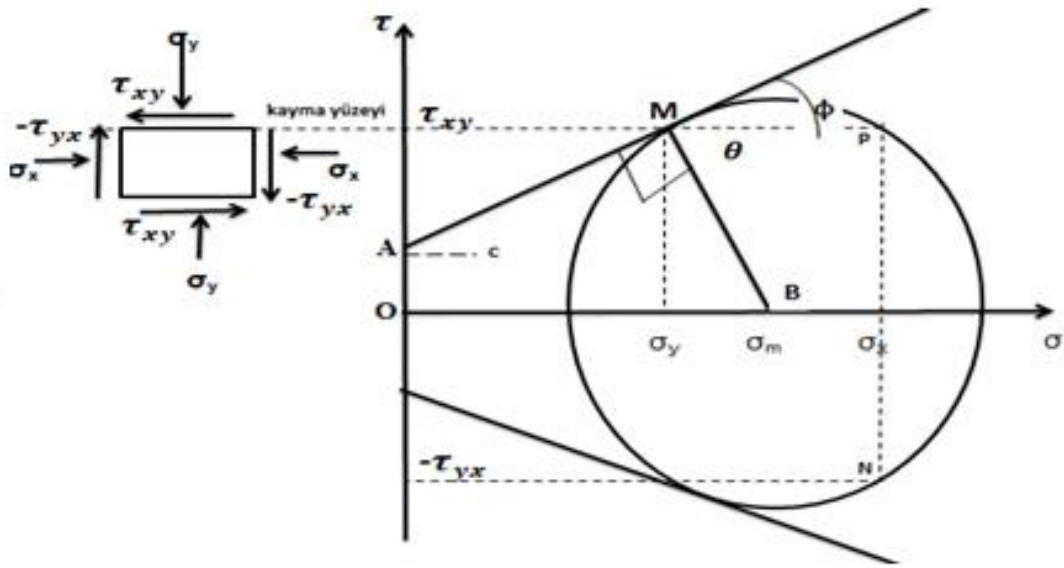
4.3. Direkt Kesme Kutusu Deneyi

Direkt kesme kutusu deney aletinin amacı, kayma direnci parametrelerini belirlemektir. Genel olarak kayma direncinin yer değiştirmeye değişen etkilerini ve kayma direnci parametrelerini elde etmek için her bir numune farklı normal yük altında üç veya daha

fazla gerilmeye deneyler gerçekleştirilmektedir. İstenilen zemin koşulları doğrultusunda normal gerilme ve su muhtevası seçilerek drenajlı koşulun sağlanabilmesi için yeterince yavaş hızlarda deney gerçekleştirilmektedir. Bu deney sisteminde kırılma zarfı genellikle maksimum kayma direncine ya da %15-20 yatay yer değiştirme sonucu elde edilen kayma direnci değerine karşılık gelmektedir. Deney yönteminin işleyişi, belirlenen yük altında konsolide edilen zeminin sabit bir kesme hızında yatay yük uygulanarak, çerçeve içerisinde ikiye ayrılıp yer değiştirmesi olarak tanımlanabilmektedir. Direkt kesme deneyi sırasında kesme yüzeyinin zayıf yüzeye denk gelmeme ihtimali göz önünde bulundurulmaktadır. Numuneyi tutan çerçeveler, kesme sırasında şekil bozulmasını önlemek için olabildiğince rijit olmalıdır. Bu sebeple cihaz çerçevesi örneğin paslanmaz çelik, bronz veya alüminyum vb. gibi suyla karşılaştığı zaman korozyona uğramayacak malzemelerden seçilmektedir. Kesme kutusu deney aleti paslanmaz çelik, bronz veya alüminyumdan yapılan, alttan ve üstten drenaja izin veren, dairesel ya da kare numune şeklinin kullanımına uygun düzenden oluşmaktadır. Cihaz çerçevesi, yatay bir düzlemle dikey olarak, hizalama vidaları ile birbirine takılan iki eşit parçadan oluşmaktadır. Kesme kutusunda ayrıca kesme kutusunun üst ve alt yarısı arasındaki boşluğu kontrol eden boşluk vidaları bulunmaktadır. Gözenekli uçlardan oluşan bu boşluk vidaları üst ve alt sınırlardan zemin numunesinin drene olmasını sağlamaktadır. Sistemde uygulanacak normal gerilmeye karşılık gelen ağırlık değerinde yükleme yapılarak gerekli gerilme değeri sağlanmaktadır. Hız genel olarak bir elektrik motoru ile sağlanmaktadır. Deney numunesinin belirlenen hızdan daha yüksek bir değerde kesilmesi drenajın tamamen sağlanamamasına neden olabilmektedir. Kesme sırasında numunenin yerleştirildiği cihazın alt kısmı sabit bir şekilde tutulurken üst parçası yatay bir yük hız doğrultusunda hareket etmektedir. Numunelerin hazırlanması sırasında nem kaybını önlemek adına sabit bir sıcaklıkta kontrollü bir şekilde çalışmak gerekmektedir (ASTM D3080-04, 2004). Direkt kesme deneylerinde σ ve τ değerleri sadece yatay yüzeyde ölçülmektedir. Bununla beraber Mohr çemberi, hareket yüzeyi yatay doğrultuda olduğu için Şekil bu durum doğrultusunda çizilebilmektedir. Gerilme durumunun tek doğrultuda olduğu varsayılmaktadır. Bu Şekillerde Şekil 3.3'de görüldüğü üzere, M noktası yatay düzlemdeki gerilmeleri ifade ederken, N noktası ise düşey doğrultudaki gerilmeyi ifade etmektedir. P noktası, kayma düzlemi yatay olduğunda M noktası ile aynı yatay hizada bulunmaktadır. σ_x ve σ_y değerleri sırasıyla düşey ve yatay yüzeylere etki eden normal gerilme değerlerini ifade etmektedir. Bu tanımlamaları veren denklem Eşitlik 4.1'de verilmiştir.

$$\sigma_x = 2c \tan \phi + K_s \sigma_y \quad \text{ve} \quad K_s = 1 + 2 \tan^2 \phi \quad (4.1)$$

K_s katsayısı ϕ değerinin artışı için en az 1 den büyük olması gerekmektedir. Fakat bu artış oranı K_s değerinden daha küçük kalmaktadır.



Şekil 4.3. Direk kesme kutusu deneyinde kayma direnci gerilm ilişkisinin Mohr dairesi ile temsili gösterimi

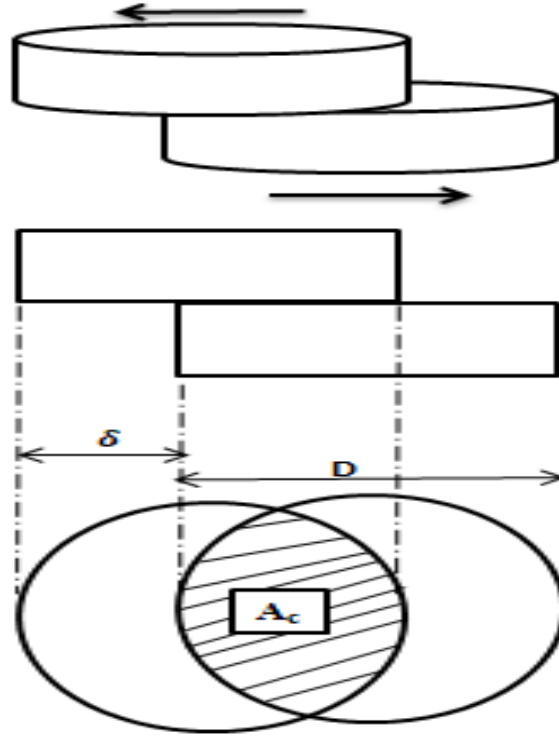
Kaynak: (Bardet, 1997)

Şekil 4.4’de görülen direkt kesme kutusu deneyinde kayma yüzeyi doğrultusunda yer değiştirmeye uğrayan numuneyi ve iki parça halinde yönlendirilen daire kesitli numunenin kesme alanı A_c , yer değiştirmesi δ ve çapı D olarak belirtilmiştir. Kesme işleminin gerçekleşerek numune üzerinde etki alanı ise Eşitlik 4.2’de verilmiştir.

$$A_c = \frac{D^2}{2} (\theta - \frac{\delta}{D} \sin \theta), \quad \theta = \cos^{-1}(\frac{\delta}{D}) \quad (4.2)$$

Kesme gerilmesi τ ve normal gerilme σ değerleri yatay yer değiştirmenin sonucu meydana gelen kesme alanı A_c ile yanal kuvvet T ve Normal kuvvet N ile elde edilme şekli Eşitlik 4.3’de verilmiştir.

$$\tau = \frac{T}{A_c} \text{ ve } \sigma = \frac{N}{A_c} \quad (4.3)$$



Şekil 4.4. Kesme kutusu deneyinde gerilme değerleri için hesaplamalarda kullanılan düzeltilmiş alan

Kaynak: (Bardet, 1997).

İnce daneli zeminlerde konsolidasyonsuz-drenajlı deneylerde 1 mm/dak gibi bir hızın uygun olduğu düşünülürken konsolidasyonlu-drenajlı deneylerde daha yavaş hızlarda çalışılması gerektiği savunulmaktadır. Burada amaç, konsolidasyonlu-drenajlı şartlarda boşluk artık suyu basıncı oluşumunun önüne geçmektir (Bardet, 1997).

Kesme hızının tayini için konsolidasyon verilerinden faydalanılabilmektedir. Bu ifade Eşitlik 4.4'de verilmiştir.

$$\vartheta = \frac{\delta}{t_f} \quad (4.4)$$

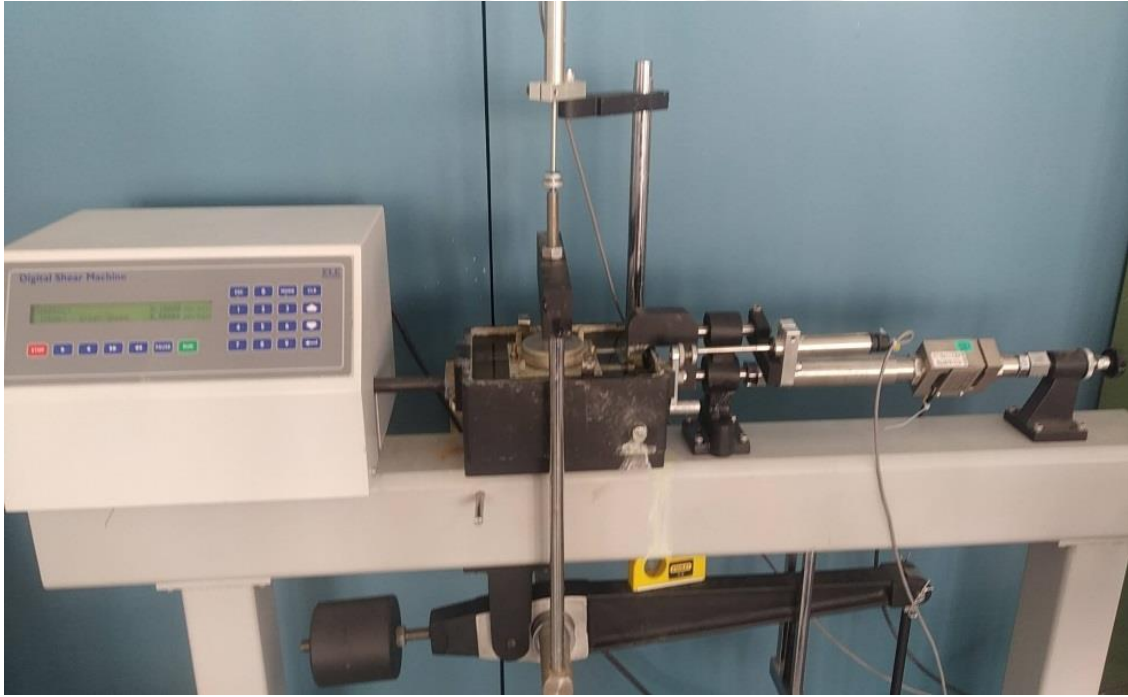
Denklemden görülen ϑ değeri kesme hızını, δ değeri pik dayanıma ulaşmak için gereken yatay yer değiştirmeyi ve t_f ise göçmenin meydana gelebilmesi için gereken süreyi ifade etmektedir. t_f değerinin bulunabilmesi için konsolidasyonun %50'si tamamlandığında geçen süre için t_{50} , %90'ı için geçen sürenin bulunabilmesi içinse t_{90} ifadeleri kullanılmaktadır. Eşitlik 4.5'de t_{50} ve t_{90} arasındaki ilişki verilmiştir.

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4.32} \quad (4.5)$$

Konsolidasyonun %90'na denk gelen değerde göçmenin meydana gelmesi için gereken süre Eşitlik 4.6'da verilmiştir (ASTM D3080/D3080M-11, 2011).

$$t_f = 11.6t_{90} \quad (4.6)$$

Bu deney yöntemiyle kayma direnci parametreleri elde edilerek diğer deney yöntemleriyle elde edilen sonuçların kıyaslanması amacıyla N1, N2, N3 ve N4 deney numuneleri üzerinde direkt kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Deneyler için 63 mm çap ve 20 mm yükseklikte hazırlanan deney numuneleri ELE marka kesme kutusu deney aletinde 100, 200, 300 kPa olmak üzere üç farklı gerilme altında konsolide edilerek, belirlenen 1 mm/dak, 0,1 mm/dak ve 0,02 mm/dak kesme hızlarında kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Düşey deformasyon ve yatay deformasyon ölçümleri 1/1000 hassasiyette olan deformasyon ölçerler vasıtasıyla yapılmaktadır. Şekil 4.5'te çalışma boyunca kullanılan ELE marka kesme kutusu deney aleti görseline yer verilmiştir.



Şekil 4.5. ELE marka kesme kutusu deney aleti

4.3.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyinde Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı

Optimum su muhtevasına getirilerek hazırlanan numuneler 63 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahip numune elde etmek için aşağıdaki bağıntı yardımıyla numune ağırlıkları belirlenmiştir. Eşitlik 4.7’de deney sırasında kullanılması gereken numune kütlesinin hesaplanabilmesi için gerekli olan formülasyon verilmiştir.

$$M = \pi \times \frac{6,3^2}{4} \times 2 \times \rho_{\text{dmaks}} \times (1 + \omega) \quad (4.7)$$

Bu denklemde M numune kütlesini, ρ_{dmaks} kuru birim hacim ağırlık değerini, ω ise numunenin hazırlanacağı su muhtevası değerini vermektedir. Belirlenen ağırlıkta her bir set için 3 adet numune ve 1 adet yedek numune olmak üzere 4 numune hazırlanmıştır. Bir deney için ağırlığı belirlenen deney numunesi paslanmaz çelikten imal edilmiş sıkıştırma kalıbına yerleştirilmeden önce sıkıştırma kabı yağlanmaktadır. Bunun amacı numune kalıptan çıkartılırken kolaylık olmasını sağlayarak şekil bozukluğunun oluşmasının önüne geçmektir. 3 parçadan oluşan sıkıştırma kalıbı taşıma kolaylığı olması amacıyla sabit taşınabilir bir yüzey üzerine, numune kaybını önlemek amacıyla sabit yüzeyle sıkıştırma kalıbı arasına filtre kağıdı koyularak numunenin sıkıştırma kalıbına yerleştirilmesi aşamasına geçilmektedir. Numune kaybının olmamasına dikkat ederek 3 aşamada paslanmaz çelik sıkıştırma kalıbına numune yerleştirilmektedir. Sıkıştırma kalıbına yerleştirilen numunenin hidrolik kriko yardımıyla sıkıştırılması sağlandıktan sonra numune sıkıştırma kalıbından çıkartılmaktadır. Tüm bu aşamalar Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Sıkıştırılmış numune elde etme aşamaları

Paslanmaz çelikten oluşan sıkıştırma kalıbından çıkarılan deney numunesi 0,01 gram hassasiyete sahip terazide tartıldıktan sonra 1 gün boyunca desikatörde bekletilmektedir. 1 gün sonra desikatörden çıkarılan deney numunesinin cihaz çerçevesine yerleştirilme sıralaması poroz taş, filtre kağıdı, 63 mm çap ve 20 mm yüksekliğe sahip sıkıştırılmış deney numunesi, filtre kağıt ve poroz taştır. Şekil 4.7'de deney haznesine yerleştirilmeden önce hazie hale getirilen bu düzenek görsel olarak belirtilmiştir.



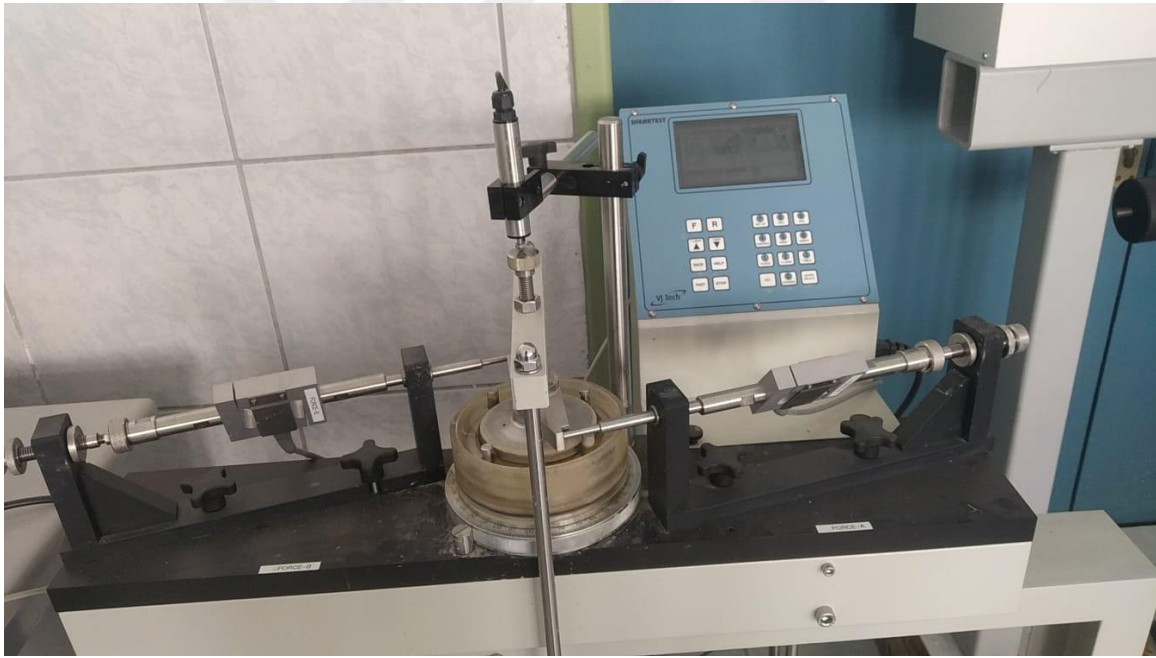
Şekil 4.7. Deney numunesinin direkt kesme kutusu cihaz çerçevesine yerleştirilmesi

Yerleştirme işlemi sırasında poroz taşların temiz olmasına ve poroz taşların pürüzlü yüzeylerinin numuneye bakıyor olmasına dikkat edilmelidir. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra konsolidasyonun doğru bir şekilde yapılması amacıyla kesme vidalarının alt tabakaya teması ortadan kaldırılarak, sabitleme vidaları takılıp cihazın alt ve üst parçalarının konsolidasyon işlemi sırasında tek parça olması ve yatayda numune boyutunda değişiklik olmasının önüne geçilmektedir. Oluşturulan numune düzeneği direkt kesme kutusu deney aletine yerleştirildikten sonra belirlenen normal yükleme altında deney haznesi su ile doldurularak konsolidasyonun başlamasına hazır hale getirilmektedir. Konsolidasyon aşaması tamamlandıktan sonra kesme aşamasına geçmek amacıyla sabitleme vidaları çıkartılmaktadır.

Kesme işlemi sırasında çelik cihaz parçalarının birbirine sürtünmesinin önüne geçmek amacıyla ayar vidalarının alt tabakaya değmesi sağlanmaktadır. Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra belirlenen hızda ve deformasyon seviyesinde bilgisayar destekli diekt kesme deney aletinde kesme aşamasına geçilmektedir.

4.4. Halka Kesme Deneyi

Bromhead tipi halka kesme deney aleti, adını tasarımcısı E.N. Bromhead tarafından alan 1979'da tasarlanan bir deney aletidir. Halka kesme deney aletinde kullanılan numunelerin iç çapı 7 cm ve dış çapı 10 cm olacak şekilde dairesel kesitli bir sistemden oluşmaktadır. Yerleştirilen numunenin yüksekliği 0.5 cm'dir. Deney sisteminin drenajlı olarak gerçekleştiği bu düzenekte, deney kalıbının sırasıyla altına ve üstüne monte edilen iki adet poroz taş ile gerçekleştirilmektedir. Numune gözenekli poroz taşlar arasında düşey doğrultuda konsolide edilmektedir. Bromhead tipi halka kesme deneyi aleti Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Bromhead tipi halka kesme deneyi aleti

Deney mekanizmasının işleyişinde numune düzeneğinden iletilen tork Eşitlik 4.7'de verilmiştir.

$$T = \frac{2}{3} * \pi * (R_2^3 - R_1^3) \quad (4.7)$$

Burada R_1 ve R_2 ifadeleri sırasıyla dış ve iç yarıçapları ifade etmektedir. Tork kuvveti numune üzerine etki eden ortalama yük ve aralarında bulunan mesafe ile çarpılarak ifade edildiği için aşağıda görülen eşitliklerde formülasyon ilerlemektedir (Bromhead, 1979).

$$T = \frac{(F_1 + F_2) * L}{2} \quad (4.8)$$

$$\tau = \frac{3 * (F_1 + F_2) * L}{4 * \pi * (R_2^3 - R_1^3)} \quad (4.9)$$

$$\sigma' = \frac{P}{\pi * (R_2^2 - R_1^2)} \quad (4.10)$$

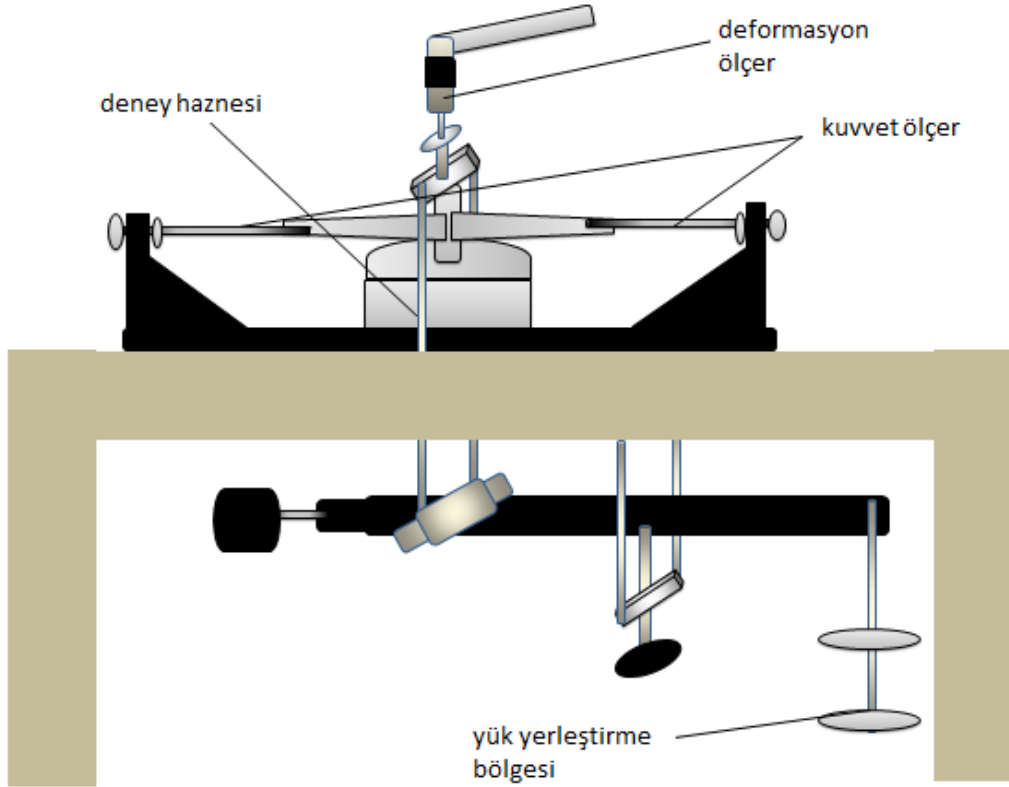
$$\frac{\tau}{\sigma'} = \tan\phi' = \frac{3 * (F_1 + F_2) * (R_2^2 - R_1^2)}{4 * (R_2^3 - R_1^3) * P} \quad (4.11)$$

4.4.1. Halka Kesme Deneyinde Numunelerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı

Optimum su muhtevasına getirilen deney numunesi desikatörde bir gün boyunca bekletilmektedir. Alt ve üst pürüzlü yüzeylere sahip poroz taşların temiz ve kuru olduğuna emin olduktan sonra numune yerleştirme aşamasına geçilmektedir. 7 cm iç çap ve 10 cm dış çap boyutlarında, 0.5 cm yüksekliğindeki deney kalıbı içerisine sıkıştırma işlemi uygulanıp yerleştirme işlemi tamamlanmaktadır. Yerleştirme işlemi sonucunda numunenin üst yüzeyinin traşlanarak pürüzsüzlüğün sağlanması gereği yerine getirilmektedir. Deney numunesinin yerleştirileceği haznenin numune kalıntısı bulundurmuyarak temiz olmasına özen gösterilmektedir. Alt poroz taş sisteminin içine yerleştirilen deney numunesi, deney haznesine yerleştirildikten sonra sabitleme vidaları takılmaktadır. Numunenin iki yanından da tork uygulanmasını sağlayan ayarlanabilir sistem kolları gerekli mesafelere getirildikten sonra üst poroz taş numune üzerine yerleştirilmektedir. Deformasyon ölçer düzeneğin üzerine yerleştirildikten sonra deney haznesi saf su ile doldurulmaktadır. Optimum su muhtevasına getirilerek desikatörde bir gün boyunca bekletilen deney numunesinin deney kalıbına ve deney aletine yerleştirilme aşamaları görsel olarak Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Deney numunesinin halka kesme deneyi aletine yerleştirilme aşamaları



Şekil 4.10. Bromhead tipi halka kesme deney aleti çalışma mekanizması

4.5. Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi

Çalışma kapsamında kullanılan deney yöntemlerinin bir diğeri de konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyidir. 1930'lu yıllarda A. Casagrande tarafında direkt kesme kutusunu deneyinin bazı dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda, bu dezavantajları ortadan kaldırmak için silindirik basınç sistemine dair bir deney yöntemi geliştirilmesi gerektiğini düşünmüştür. Çalışma boyunca kullanılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi aleti Şekil 4.11'de verilmiştir. Deney sırasında boşluk suyu basıncı transedürlerinden boşluk suyu basıncı değeri (u) ve yük saatinden ise P yük değeri okunmaktadır. Bu P yükü değeri ring çarpanı ile çarpılarak kilogram cinsinden düşey yük değeri elde edilmektedir. Hesaplanan düşey yük değeri, düzeltilmiş numune alanına bölünüp deviatör gerilme değeri elde edilmiş olmaktadır.



Şekil 4.11. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi aleti

Eşitlik 4.12’de düzeltilmiş alan formülüyle birlikte deviyör gerilme değeri verilmektedir.

$$\Delta\sigma = \frac{P}{A_i}, \quad A_i = A_0 \frac{(1 - \frac{\Delta V}{V_0})}{1 - \frac{\epsilon}{100}} \quad (4.12)$$

Burada A_i düzeltilmiş alanı, P düşey deplasmana karşılık gelen düşey kuvveti, $\Delta\sigma$ deviyör gerilme değerini, A_0 numunenin ilk kesit alanını, ΔV hacmi değişimini, V_0 numunenin ilk hacmini ifade etmektedir (Bayın, (2011)).

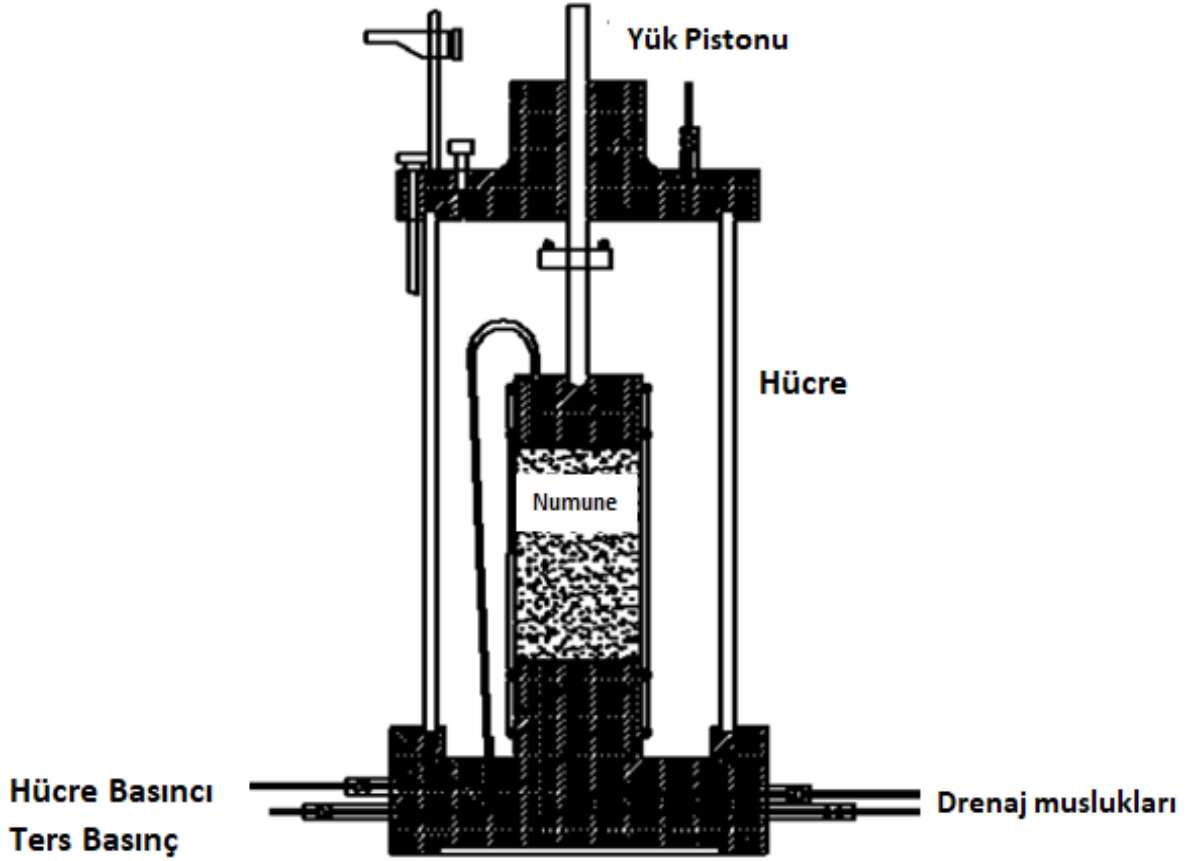
4.5.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyinde Numunelerin Hazırlaması ve Deneyin Yapılışı

Optimum su muhtevasına getirilen örselenmiş deney numunesi 24 saat boyunca desikatörde bekletilmektedir. 3 parçadan oluşan paslanmaz çelik kalıp içerisinde sabit sıkıştırma enerjisinde motorlu hidrolik kriko aracılığıyla sıkıştırılan deney numunesi, 50 mm çap ve 100 mm yükseklikte elde edilerek tekrar 24 saat boyunca desikatörde bekletilmektedir. Deney numunesine ait sıkıştırma aşamaları Şekil 4.13’te verilmiştir. Sıkıştırma işleminden

önce numunenin hasar görmesinin önlenmesi amacıyla deney kalıbının yağlanması gerekmektedir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinde numunelere üzerinde ilave boşluk suyu basıncının oluşması istenmediğinden, ölçülen toplam gerilme değeri efektif gerilme değerine eşittir. Boşluk suyu basıncı oluşumunun önüne geçecek şekilde çok yavaş hızlarda yapılan drenajlı üç eksenli basınç deneyinin yükseklik/çap oranı 2 olup deney süresinin uzun sürmesine karşılık boşluk suyu basıncı ölçülebilmekte ve drenaj kontrol edilebilmektedir (Head, 2006). Bu deney sisteminde bulunan parçalar;

1. Üç eksenli yükleme kolu
2. Üç eksenli hücre
3. Yük ölçüm saati
4. Deformasyon ölçüm saati
5. Alt başlık ve üst başlık
6. O ring membran
7. Kauçuk membran
8. Boşluk suyu basıncı ölçüm sistemi
9. Basınç Hücreleri
10. Poroz taş
11. Filtre kağıdı'ndan oluşmaktadır. Deney aletinin şematik gösterimi Şekil 4.12'da gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Üç eksenli deney sisteminin şematik gösterimi (Bayın,2011).

50 mm çap ve 100 mm yüksekliğe sahip deney numunesi her iki yüzeyi pudralanmış su geçirmez kauçuk membran içerisine vakumlanarak yerleştirilmektedir. Deney düzeneğine sırasıyla poroz taş ve filtre kağıt yerleştirildikten sonra su geçirmez kauçuk membranla birlikte deney numunesi, filtre kağıt ve de poroz taş düzeneğe eklenmektedir. Ters basınç haznesi sisteme eklenerek o ring membranlarla sabitlendikten sonra şeffaf deney hücresi geçirilerek sabitleme vidalarıyla düzenek sabitlenmektedir. Vidaların yerine tam oturduğuna emin olunarak basınçların sağlıklı verilmesi sağlanarak su kaçağı oluşumunun önüne geçilmiş olmaktadır. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine ait numune yerleştirme aşamaları Şekil 4.13'te verilmiştir. Deney düzeneği yerleştirilmeden önce deney aletinin temiz olduğuna emin olunmalıdır.



Şekil 4.13. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine ait numunenin hazırlanma aşamaları

Üç eksenli basınç deneyi sistemine yerleştirilerek düzeneği hazır hale getirilen deney numunesine, doygunluk aşamasına geçilmeden önce CO₂ gazı verilerek, bu gazın suda çözünme özelliğinden faydalanmak amacıyla numune içerisindeki havanın yerini alması amaçlanmıştır. Doymunluk aşamasında çevre basıncı ve ters basınç arasındaki fark 5 kPa olarak belirlenmiş olup çevre basıncı 30, 60 ve 90 kPa olacak şekilde kademeli olarak artırılmıştır. . Doymun numunelere üzerinde çalışılan deney düzeneğinde numunelerin doymun hale geldiği Skempton B parametresi ile anlaşılmaktadır (Ural ve Önalp, 2005). Her kademe geçişinde boşluk suyu basıncı parametresinin (B değeri) artışı izlenmiştir. Konsolidasyonlu-drenajlı deneyde Eşitlik 4.13'te verilen B parametresini belirleyebilmek için drenaj vanaları kapalı durumdayken hücre basıncındaki artışla boşluk suyu basıncındaki değişim incelenerek karar verilmektedir (Skempton, 1964).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (4.13)$$

B=0.95-1.00 değerine ulaştığında numunenin doymun hale geldiğine karar verilerek konsolidasyon aşamasına geçilmiştir.



Şekil 4.14. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyine ait numunenin deney düzeneğine yerleştirilme aşamaları

Konsolidasyon işlemi için 100, 150 ve 200 kPa olan üç farklı efektif normal gerilme değeriyle çalışılmıştır. Sistemde drenaj vidaları kapalıyken ters basınç ve hücre basıncı arasındaki fark istenilen efektif konsolidasyon basıncı değerini sağlayabilmek amacıyla hücre basıncı gerekli değere getirilerek drenaj vanaları açıldıktan sonra konsolidasyon aşamasına geçilmiş olmaktadır. Her bir deney için numuneye verilmesi gereken efektif gerilme değeri belirlenerek konsolidasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme hızı 0.005 mm/dak olarak belirlenmiş olup %12 eksenel deformasyon baz alınarak işlem gerçekleştirilmiştir.

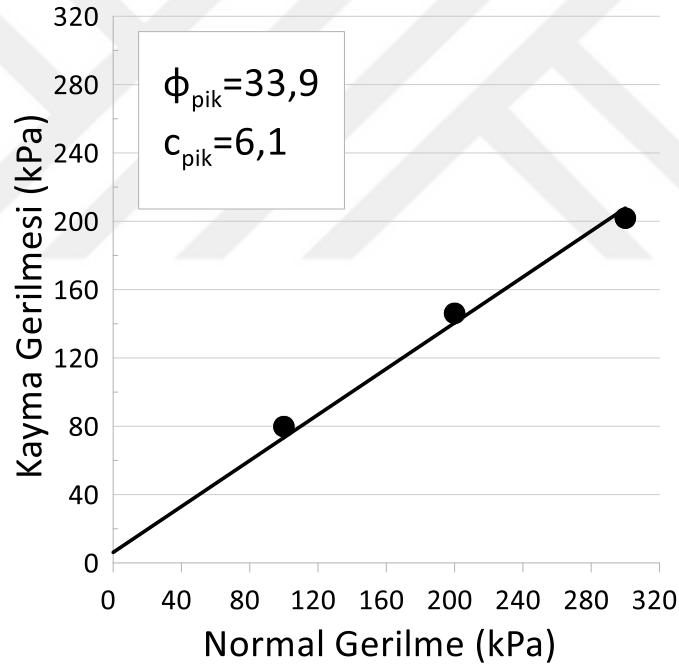
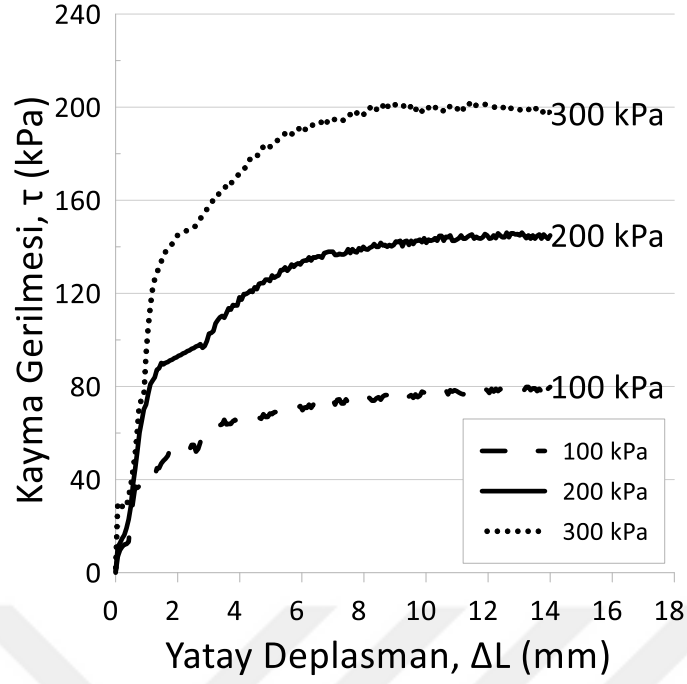
5. DENEYSEL SONUÇLAR

Çalışma kapsamında geoteknik indeks özellikleri bilinen zemin numuneleri üzerinde pik ve kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek amacıyla direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır.

Direkt kesme kutusu deneyinde 14 mm deformasyon seviyesine karşılık gelen kayma gerilmesi, halka kesme deneyi için 50 mm deformasyon seviyesine karşılık gelen kayma gerilmesi ve konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi için %13 deformasyon seviyesine karşılık gelen kayma gerilmesi değerleri alınarak pik ve kalıcı kayma direnci parametrelerini belirlemek üzere kullanılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak deney aletlerinin kayma direnci açısıyla ilişkisi incelenmiştir. Deney numunelerinin bilinen geoteknik indeks özellikleriyle pik ve kalıcı kayma direnci parametreleri arasındaki ilişki incelenerek pratikte kullanılabilmesi amacıyla bağıntılar geliştirilmiştir. Direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonu-drenajlı üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen kayma direnci açılarının, yukarıdaki tabloda verilen deney numunelerine ait geoteknik indeks özellikleriyle ilişkisi incelenmiştir.

5.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında N1, N2, N3 ve N4 numuneleri için direkt kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler için 0,02, 0,1 ve 1 mm /dak hızlarında çalışılmıştır. Şekil 5.1'de N2 numunesi için 0,02 mm/dak hızında 100, 200 ve 300 kPa olan üç farklı gerilme altında elde edilen direkt kesme kutusu deneyi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.1. N2 numunesi için 0,02 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

Bu çalışma kapsamında her bir kesme hızı için elde edilen kalıcı ve pik kayma direnci parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Tabloda ifade edildiği üzere zeminlerin pik kayma direnci açıları 28° - 33° arasında değişmektedir.

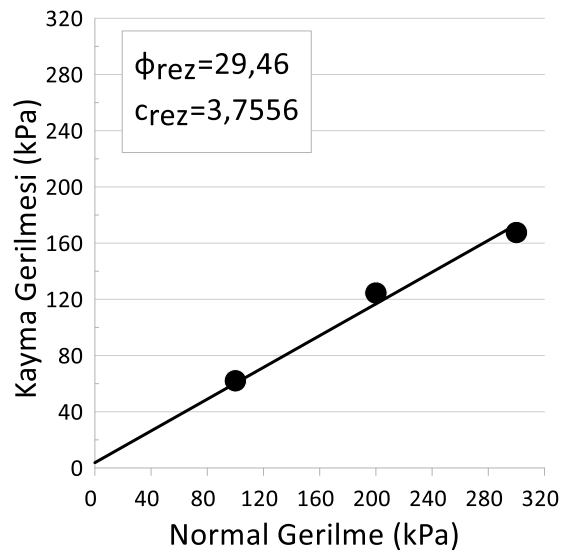
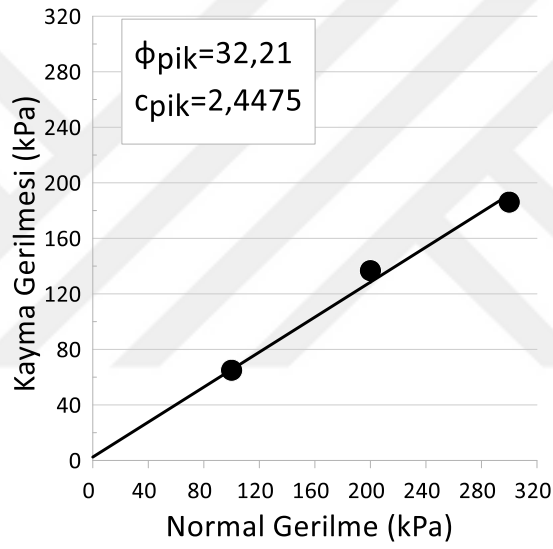
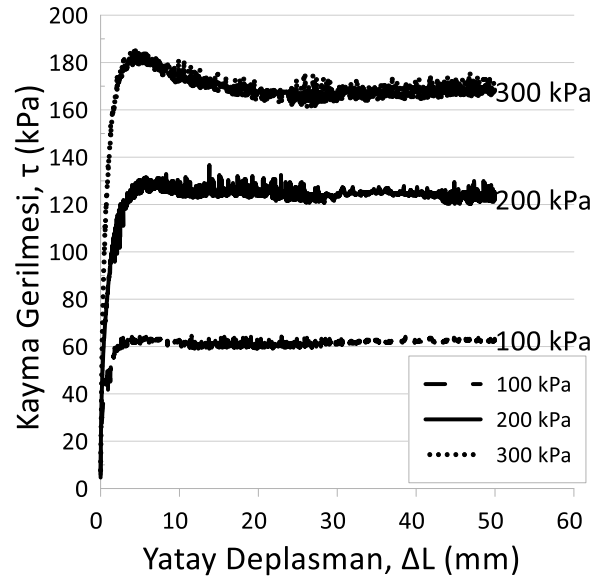
Tablo 5.1. Direkt kesme kutusu deney yöntemi ile elde edilen kayma direnci parametreleri

| Numune Adı | Hız (mm/dak) | c_{pik} (kPa) | Φ_{pik} (°) |
|-------------------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| N1 | 1 | 11,6 | 30,71 |
| | 0,1 | 7,0143 | 31,96 |
| | 0,02 | 8,2 | 30,22 |
| N2 | 1 | 10,27 | 32,95 |
| | 0,1 | 12,05 | 32,13 |
| | 0,02 | 6,17 | 33,90 |
| N3 | 1 | 43,483 | 26,94 |
| | 0,1 | 5,692 | 29,92 |
| | 0,02 | 2,5741 | 28,07 |
| N4 | 1 | 1,18 | 28,60 |
| | 0,1 | 7,49 | 30,89 |
| | 0,02 | 22,54 | 29,89 |

Deney sürecinde kullanılan numunelerin direkt kesme kutusu deney yöntemine ait her bir hız için kayma direnci parametreleri şekilleri EK A kısmında verilmiştir.

5.2. Halka Kesme Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında N1, N2, N3 ve N4 numuneleri için halka kesme deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler için 0,027, 0,135 ve 1,35 der /dak hızlarında çalışılmıştır. Şekil 5.2’de N2 numunesi için 0,027 mm/dak hızında 100, 200 ve 300 kPa olan üç farklı gerilme altında elde edilen halka kesme deneyi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.2. N2 numunesi için 0,027 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

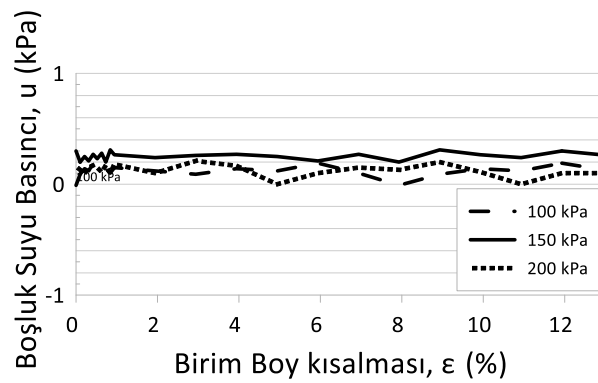
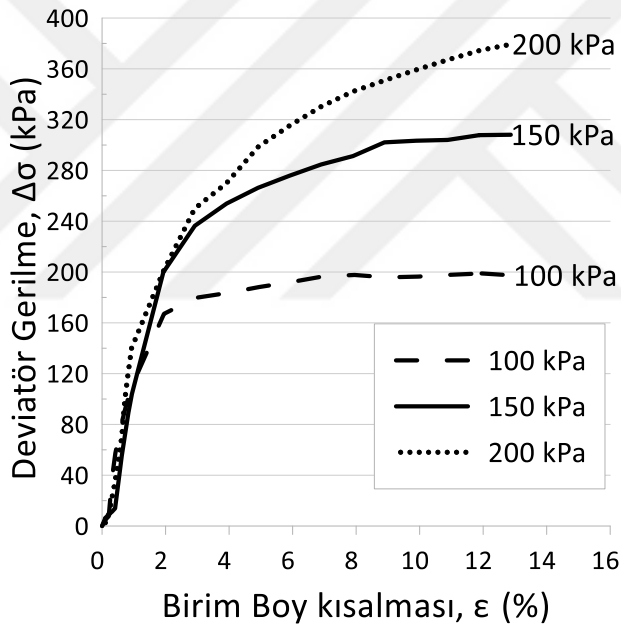
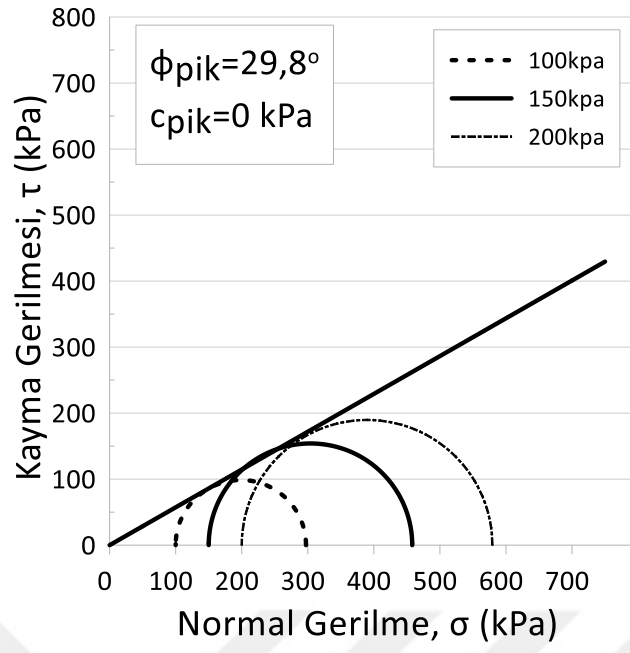
Bu çalışma kapsamında her bir kesme hızı için elde edilen kalıcı ve pik kayma direnci parametreleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Tabloda ifade edildiği üzere zeminlerin pik kayma direnci açıları 22°-33° arasında değişirken, kalıcı kayma direnci açıları 14°-33° arasında değişmektedir. Deney sürecinde kullanılan numunelerin halka kesme deney yöntemine ait her bir hız için kayma direnci parametreleri şekilleri EK A kısmında verilmiştir.

Tablo 5.2. Halka kesme deney yöntemi ile elde edilen kayma direnci parametreleri

| Numune Adı | Hız (der/dak) | c_{rez} (kPa) | Φ_{rez} (°) | c_{pik} (kPa) | Φ_{pik} (°) |
|------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| N1 | 1,350 | 1,097 | 28,20 | 0,633 | 29,58 |
| | 0,135 | 0,404 | 28,39 | 0,211 | 29,67 |
| | 0,027 | 2,000 | 29,42 | 0,590 | 32,14 |
| N2 | 1,350 | 4,430 | 29,60 | 4,430 | 27,73 |
| | 0,135 | 5,016 | 31,40 | 0,665 | 30,66 |
| | 0,027 | 2,447 | 32,21 | 3,755 | 29,46 |
| N3 | 1,350 | 6,878 | 14,84 | 1,389 | 22,04 |
| | 0,135 | 2,537 | 14,31 | 0,785 | 25,35 |
| | 0,027 | 2,574 | 14,12 | 2,025 | 25,00 |
| N4 | 1,350 | 0,928 | 16,83 | 1,22 | 23,88 |
| | 0,135 | 3,414 | 15,41 | 0,2061 | 26,06 |
| | 0,027 | 0,000 | 20,28 | 2,7851 | 28,30 |

5.3. Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında N1, N2, N3 ve N4 numuneleri için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler için 0,005 mm/dak hızında çalışılmıştır. Şekil 5.3’te N2 numunesi için 0,005 mm/dak hızında 100, 150 ve 200 kPa olmak üzere üç farklı gerilme altında elde edilen konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.3. N2 numunesi için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları

Tablo 5.3’de deney çalışması boyunca kullanılan 4 numuneye ait konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyiyle bulunan pik kayma direnci parametreleri verilmiştir.

Tablo 5.3. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yöntemiyle elde edilen kayma direnci parametreleri

| Numune Adı | c_{pik} (kPa) | Φ_{pik} (°) |
|------------|-----------------|------------------|
| N1 | 7 | 27 |
| N2 | 0 | 29,8 |
| N3 | 30 | 25 |
| N4 | 5 | 26 |

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

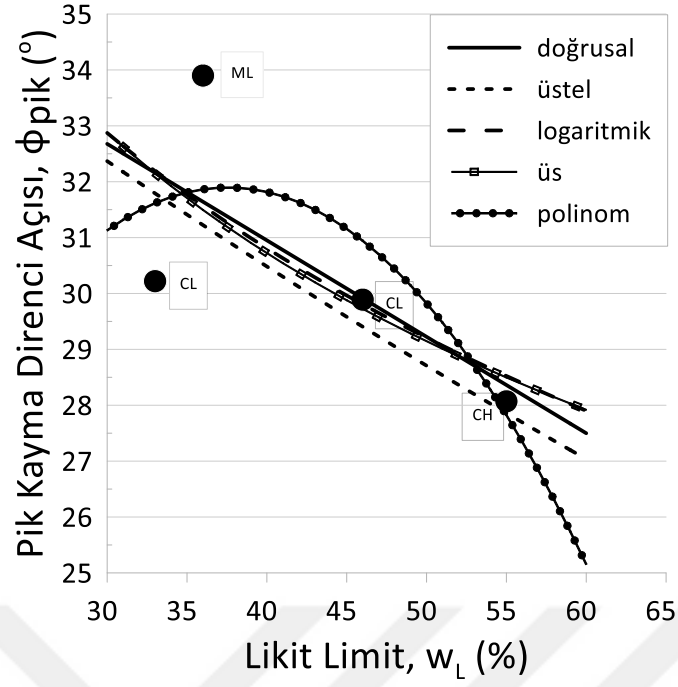
Kayma direncinin belirlenerek kayma direncini etkileyen faktörlerin etkisinin incelenmesi amacıyla 4 adet numune üzerinde direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılarak kalıcı ve pik kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda bu değerler karşılaştırılmıştır. Pik ve kalıcı kayma direncine; kıvam limitlerinin, kesme hızının, kil yüzdesinin, aktivitenin ve deney türünün etkisi incelenmiştir. Kayma direncinin pratik amaçlarda kullanılarak tahmin edilebilmesi amacıyla çeşitli korelasyonlar geliştirilmiştir.

6.1. Numunelerin Kıvam Limitleri ve Plastisite İndisinin Kayma Direncine Etkisi

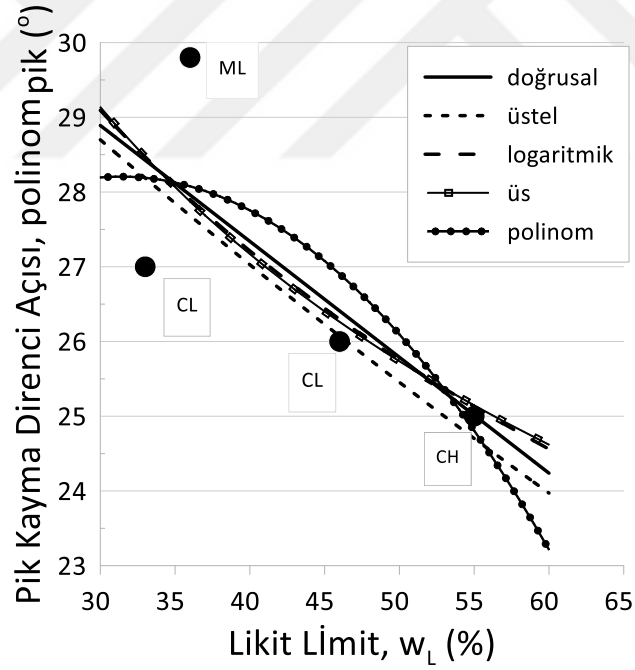
Kayma direnci ile kıvam limitleri arasındaki ilişki geçmişten bugüne araştırılan konulardan biridir. R.E. Gibson (1953), Olson (1974), Kalteziotis (1993), Stark ve Eid (1994), Watry (2000), Wesley (2003), Bayın (2011) ve Sorensa (2013)'nin kıvam limitlerinin ve plastisite indisinin kayma direncine etkisi üzerine yaptığı çalışmalara önceki bölümlerde yer verilmiştir.

6.1.1. Likit Limitin Kayma Direncine Etkisi

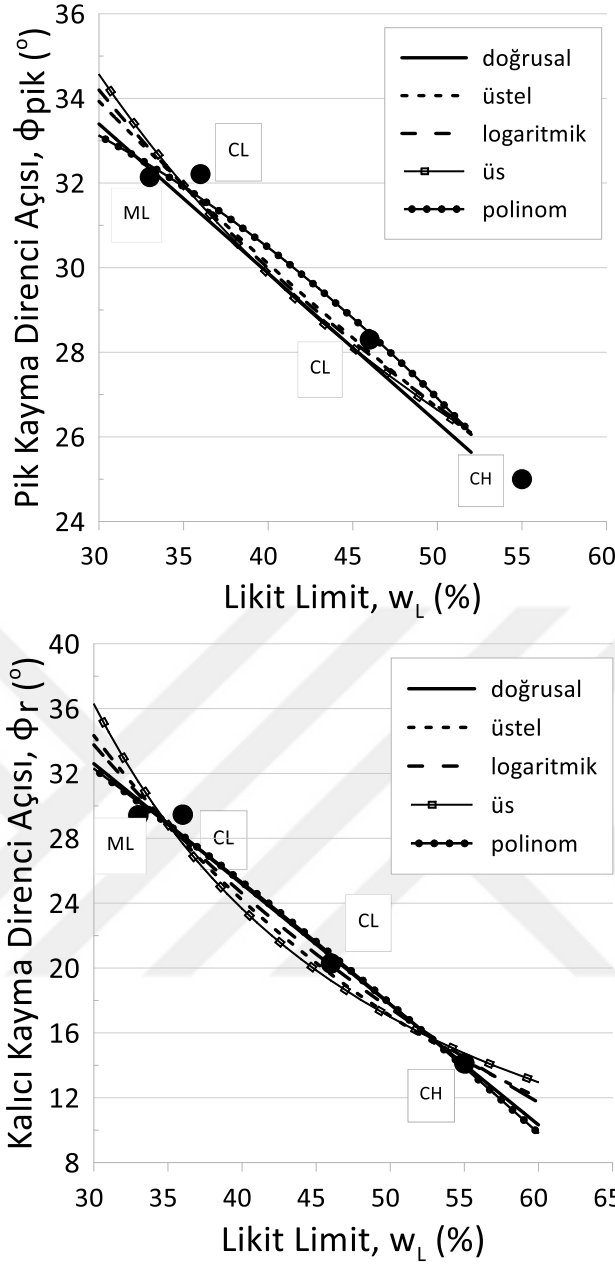
Literatür çalışmalarına bakıldığında kayma direnci ile zemin endeks özellikleri içerisinde, en çok kıvam limitlerinin ilişkisinin incelendiği görülmektedir. N1, N2, N3 ve N4 numuneleri için yapılan direkt kesme kutusu, halka kesme ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleriyle elde edilmiş olan kalıcı ve pik kayma direnci açılarının, kıvam limitleri ile ilişkisi ele alınmıştır. Deney numunelerine ait likit limit değerleri sırasıyla %33, %36, %55 ve %46'dır. Bu doğrultuda deney numuneleri üzerinde yapılan 0,02 mm/dak hız için direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla likit limit değerleri doğrultusundaki değişimi Şekil 6.1'de, 0,005 mm/dak hız için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla likit limit değerleri doğrultusundaki değişim Şekil 6.2'de 0,027 der/dak hız için halka kesme deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik ve kalıcı kayma direnci açısıyla likit limit değerleri doğrultusundaki değişimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Kayma direnci açısının likit limit değeri ile ilişkisini gösteren doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrileri bu şekiller üzerinde belirtilmiştir. Görüldüğü üzere her bir deney türü için likit limit değeri arttıkça pik ve kalıcı kayma direnci açıları azalmaktadır.



Şekil 6.1. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının likit limit ile değişimi



Şekil 6.2. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının likit limit ile değişimi



Şekil 6. 1. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kalıcı ve pik kayma direnci açılarının likit limit ile değişimi

Pik ve kalıcı kayma direnci açılarının likit limit değeri ile ilişkisini göstermek amacıyla çizilen doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait bağıntı türü doğrultusunda elde edilen bağıntı denklemleri ve korelasyon katsayıları her bir deney türü ve hızı için tablolar halinde verilmiştir.

Direkt kesme kutusu deney aletinde pik kayma direnci açısıyla likit limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için korelasyon

katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük olan denklem logaritmik denklemdir. 0,1 mm/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük denklem doğrusal denklemdir. 1 mm/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük denklem logaritmik denklemdir. Direkt kesme kutusuna ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının likit limit ile ilişkisinde 0,1 mm/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.1. Kesme kutusu deneyi için likit limit ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki

| Hız(mm/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------|--------------|--|----------------|
| 0,02 mm/dak | Doğrusal | -0,1726* w _L +37,855 | 0,5005 |
| | Üstel | 38,752*e ^(-0,006* w_L) | 0,5225 |
| | Logaritmik | -7,174* ln (w _L)+57,273 | 0,4672 |
| | Üs | 73,371* w _L ^{-0,236} | 0,4878 |
| | Polinom | -0,0134* w _L ² +1,0068* w _L +12,985 | 0,5947 |
| 0,1 mm/dak | Doğrusal | -0,1008* w _L +35,51 | 0,964 |
| | Üstel | 35,835* e ^(-0,003* w_L) | 0,9644 |
| | Logaritmik | -4,229* ln (w _L)+47,257 | 0,9469 |
| | Üs | 52,316* w _L ^{-0,139} | 0,9465 |
| | Polinom | -0,0017* w _L ² +0,0523* w _L +32,28 | 0,973 |
| 1 mm/dak | Doğrusal | -0,2295* w _L +39,552 | 0,7781 |
| | Üstel | 41,372* e ^(-0,008* w_L) | 0,7992 |
| | Logaritmik | -9,75* ln (w _L)+66,156 | 0,7588 |
| | Üs | 102,02* w _L ^{-0,331} | 0,7791 |
| | Polinom | -0,0051* w _L ² +0,2219* w _L +30,034 | 0,7902 |

Halka kesme deney aletinde pik kayma direnci açısıyla likit limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde

en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemidir. 0,135 der/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üs, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemidir. 1,35 der/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem denklem üs, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemidir. Halka kesme deney aletinde çalışılan üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının likit limit ile ilişkisinde 0,027 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2. Halka kesme deneyi için likit limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|---|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | $-0,3427 * w_L + 43,976$ | 0,9825 |
| | Üstel | $48,633 * e^{(-0,012 * w_L)}$ | 0,9804 |
| | Logaritmik | $-14,64 * \ln(w_L) + 83,992$ | 0,9684 |
| | Üs | $195,88 * w_L^{-0,51}$ | 0,9629 |
| | Polinom | $-0,0046 * w_L^2 + 0,0576 * w_L + 35,534$ | 0,9879 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | $-0,2587 * w_L + 39,116$ | 0,8035 |
| | Üstel | $41,529 * e^{(-0,009 * w_L)}$ | 0,8198 |
| | Logaritmik | $-11,15 * \ln(w_L) + 69,713$ | 0,8067 |
| | Üs | $124,26 * w_L^{-0,4}$ | 0,8232 |
| | Polinom | $0,0047 * w_L^2 - 0,6713 * w_L + 47,817$ | 0,8118 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | $-0,3798 * w_L + 42,418$ | 0,9513 |
| | Üstel | $48,712 * e^{(-0,015 * w_L)}$ | 0,9598 |
| | Logaritmik | $-16,42 * \ln(w_L) + 87,49$ | 0,9600 |
| | Üs | $278,54 * w_L^{-0,635}$ | 0,9658 |
| | Polinom | $0,0081 * w_L^2 - 1,0919 * w_L + 57,43$ | 0,9648 |

Halka kesme deney aleti sonuçlarına göre kalıcı kayma direnci açısıyla likit limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon

katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemidir. 0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üs, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemidir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemidir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile ilişkisinde 0,027 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.3. Halka kesme deneyi için likit limit değeri ile kalıcı kayma direnci arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------------|--------------|--|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -0,7425* w _L +54,877 | 0,9832 |
| | Üstel | 98,122* e ^(-0,035* w_L) | 0,9817 |
| | Logaritmik | -31,82* ln (w _L)+141,99 | 0,9757 |
| | Üs | 5684,1* w _L ^{-1,486} | 0,9644 |
| | Polinom | -0,0025* w _L ² -0,5243* w _L +50,275 | 0,9835 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -0,7847* w _L +55,541 | 0,8492 |
| | Üstel | 101,79* e ^(-0,037* w_L) | 0,874 |
| | Logaritmik | -34,08* ln (w _L)+149,29 | 0,8656 |
| | Üs | 8660,7* w _L ^{-1,616} | 0,8901 |
| | Polinom | 0,0299* w _L ² -3,415* w _L +111,01 | 0,8876 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -0,6769* w _L +50,667 | 0,9241 |
| | Üstel | 82,957* e ^(-0,032* w_L) | 0,941 |
| | Logaritmik | -29,41* ln (w _L)+131,58 | 0,9428 |
| | Üs | 3891,2* w _L ^{-1,4} | 0,9552 |
| | Polinom | 0,025* w _L ² -2,8772* w _L +97,068 | 0,9635 |

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aletinde pik kayma direnci açısıyla likit limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir. 0,005 mm/dak hızında yapılmış olan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde bağıntı denklemleri sonucu elde

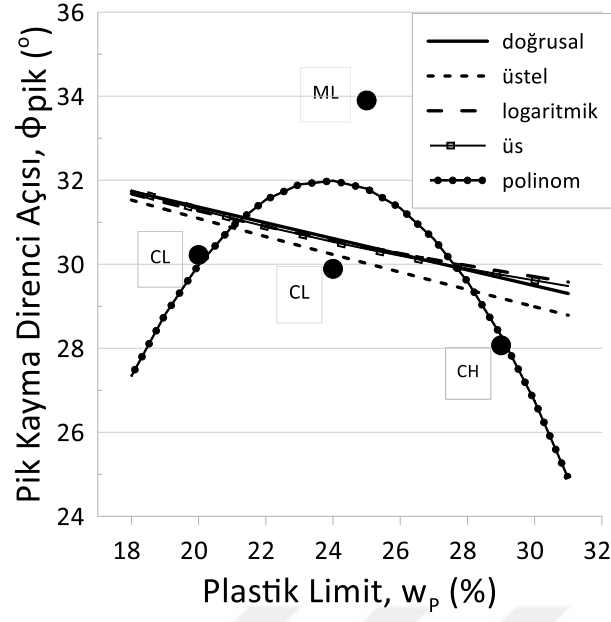
edilen korelasyon katsayılarına göre en yüksek korelasyon değerini polinom denklemi verirken en düşük değeri ise logaritmik denklem vermektedir.

Tablo 6.4. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için likit limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki

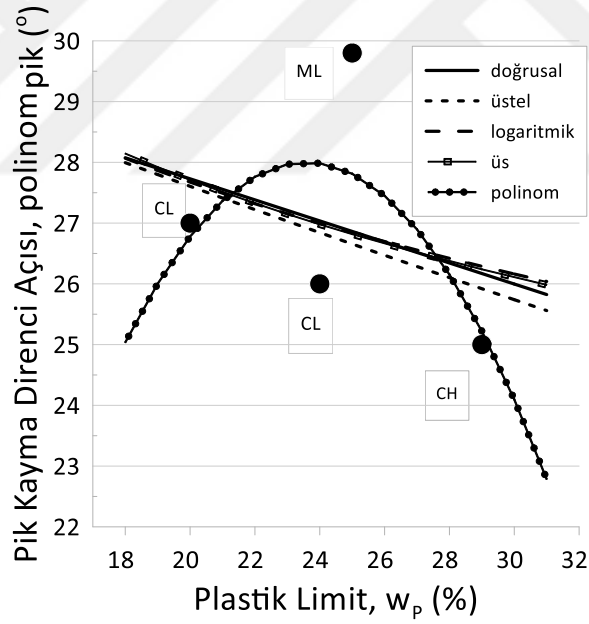
| Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|-------------------|--|----------------|
| Doğrusal | $-0,1551 * w_L + 33,544$ | 0,5647 |
| Üstel | $34,359 * e^{(-0,006 * B3)}$ | 0,5879 |
| Logaritmik | $-6,541 * \ln(B3) + 51,341$ | 0,5423 |
| Üs | $66,583 * w_L^{-0,243}$ | 0,5648 |
| Polinom | $-0,0061 * w_L^2 + 0,383 * w_L + 22,195$ | 0,5921 |

6.1.2. Plastik Limitin Kayma Direncine Etkisi

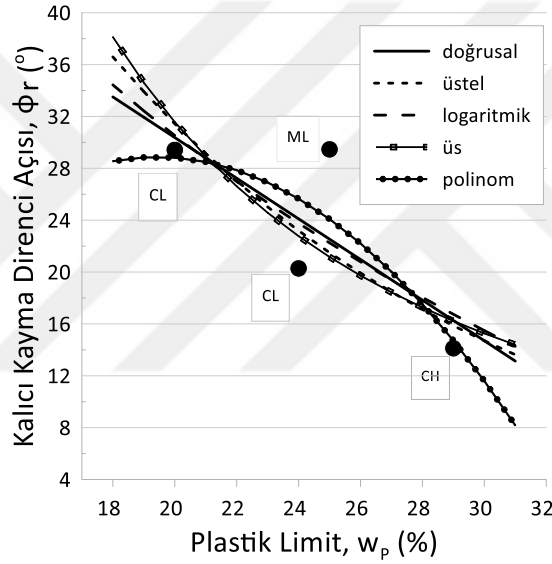
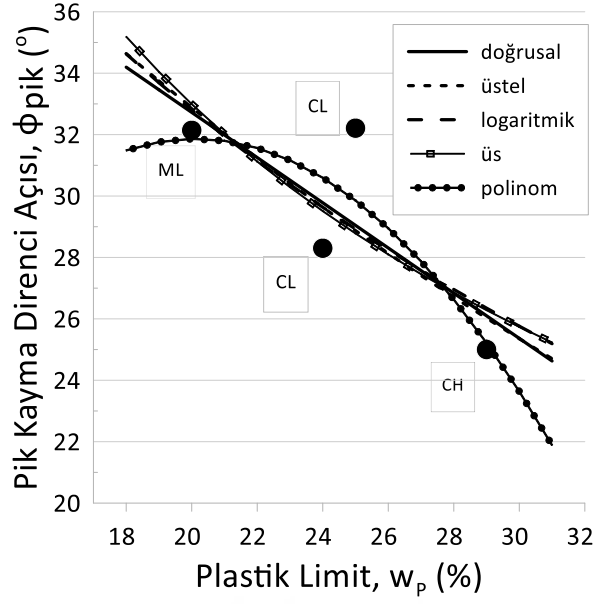
Kalıcı ve pik kayma direnci açılarının plastik limit ile ilişkisi incelendiğinde likit limit ile pik ve kalıcı kayma direnci açıları arasındaki ilişkideki gibi plastik limit değeri arttıkça kalıcı ve kayma direnci açılarının azaldığı görülmektedir. N1, N2, N3 ve N4 numunelerine ait plastik limit değerleri sırasıyla %20, %25, %29 ve %24'tür. Artan plastik limit değeriyle kayma direnci açılarının azalışı doğrusal, üstel, üs, logaritmik ve polinom eğrileriyle gösterilmiştir. Bu doğrultuda deney numuneleri üzerinde yapılan; 0,02 mm/dak hız için direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla plastik limit değerleri doğrultusundaki değişimi Şekil 6.4'de, 0,005 mm/dak hız için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla plastik limit değerleri doğrultusundaki değişim Şekil 6.5'te, 0,027 der/dak hız için halka kesme deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik ve kalıcı kayma direnci açısıyla plastik limit değerleri doğrultusundaki değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.3. 0,02 mm/dak hızda kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının plastik limit ile değişimi



Şekil 6.4. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi



Şekil 6.5. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için pik ve kalıcı kayma direnci açılarının plastik limit ile değişimi

Kalıcı ve pik kayma direnci açılarının plastik limit değeri ile ilişkisini göstermek amacıyla çizilen doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait bağıntı türü doğrultusunda elde edilen bağıntı denklemleri ve korelasyon katsayıları her bir deney türü ve hızı için tablolar halinde verilmiştir.

Direkt kesme kutusu deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastik limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. 0,1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek

olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. 1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip logaritmik denklemdir. Direkt kesme kutusu deney yöntemine ait üç hız göz önüne alındığında, pik kayma direnci açısının plastik limit ile ilişkisinde 0,1 mm/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.5. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limit arasındaki ilişki

| Hız(mm/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------|--------------|--|----------------|
| 0,02 mm/dak | Doğrusal | -0,1871 w _p +35,103 | 0,0801 |
| | Üstel | 35,762*e ^(-0,007* w_p) | 0,0953 |
| | Logaritmik | -3,863* ln (w _p)+42,842 | 0,0584 |
| | Üs | 47,19* w _p ^{-0,137} | 0,0714 |
| | Polinom | -0,1375* w _p ² +6,5504* w _p -46,022 | 0,5023 |
| 0,1 mm/dak | Doğrusal | -0,2088 w _p +36,34 | 0,5630 |
| | Üstel | 36,834*e ^(-0,007* w_p) | 0,5684 |
| | Logaritmik | -4,904* ln (w _p)+46,869 | 0,5315 |
| | Üs | 51,788* w _p ^{-0,159} | 0,5363 |
| | Polinom | -0,0285* w _p ² +1,1877* w _p +19,525 | 0,6653 |
| 1 mm/dak | Doğrusal | -0,3607* w _p +38,638 | 0,2619 |
| | Üstel | 40,51* e ^(-0,013* w_p) | 0,2872 |
| | Logaritmik | -8,247* ln (w _p)+56,109 | 0,2342 |
| | Üs | 74,931* w _p ^{-0,29} | 0,2582 |
| | Polinom | -0,0975* w _p ² +4,4168* w _p -18,887 | 0,4486 |

Halka kesme deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastik limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.6'da verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik

denklemdir. 0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. Halka kesme deney aletinde çalışılan üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limit ile ilişkisinde 0,027 der/dak hızında korelasyon katsayılarının, diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.6. Halka kesme deneyi için plastik limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|--|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -0,736* w _p +47,44 | 0,6174 |
| | Üstel | 55,308* e ^(-0,026* wp) | 0,6310 |
| | Logaritmik | -17,36* ln (w _p)+84,805 | 0,588 |
| | Üs | 206,207* w _p ^{-0,612} | 0,5992 |
| | Polinom | -0,0843* w _p ² +3,3923* w _p -2,2636 | 0,6963 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -0,409* w _p +38,141 | 0,2735 |
| | Üstel | 40,446* e ^(-0,015* wp) | 0,2925 |
| | Logaritmik | -9,592* ln (w _p)+58,719 | 0,2574 |
| | Üs | 86,178* w _p ^{-0,352} | 0,2762 |
| | Polinom | -0,061* w _p ² +2,58* w _p +2,1511 | 0,3329 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -0,7578* w _p +44,841 | 0,5158 |
| | Üstel | 53,907* e ^(-0,03* wp) | 0,5312 |
| | Logaritmik | -18,08* ln (w _p)+83,948 | 0,5023 |
| | Üs | 248,52* w _p ^{-0,707} | 0,5158 |
| | Polinom | -0,0465* w _p ² -1,5207* w _p +17,406 | 0,5347 |

Halka kesme deney aleti sonuçlarına göre kalıcı kayma direnci açısıyla plastik limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.7’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon

katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. 0,135 der/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limit ile ilişkisinde 0,027 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.7. Halka kesme deneyi için plastik limit değeri ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------------|--------------|--|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -1,5673* w _p +61,719 | 0,5967 |
| | Üstel | 143,72* e ^(-0,076* w_p) | 0,6366 |
| | Logaritmik | -37,1* ln (w _p)+141,67 | 0,572 |
| | Üs | 6771,7* w _p ^{-1,792} | 0,605 |
| | Polinom | -0,155* w _p ² -6,0277* w _p -29,731 | 0,6536 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -1,3594* w _p +55,498 | 0,3472 |
| | Üstel | 107,54* e ^(-0,067* w_p) | 0,3836 |
| | Logaritmik | -32,44* ln (w _p)+125,69 | 0,3383 |
| | Üs | 3402,3* w _p ^{-1,596} | 0,3746 |
| | Polinom | -0,0843* w _p ² -2,7689* w _p +5,7901 | 0,3602 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -1,3334* w _p +54,569 | 0,4885 |
| | Üstel | 101,77* e ^(-0,064* w_p) | 0,5091 |
| | Logaritmik | -32,03* ln (w _p)+124,06 | 0,4822 |
| | Üs | 2874,9* w _p ^{-1,542} | 0,4997 |
| | Polinom | -0,038* w _p ² +0,5286* w _p +32,149 | 0,4924 |

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastik limit değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.8’de verilmiştir. 0,005 mm/dak hızında yapılan konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde bağıntı denklemleri sonucu elde

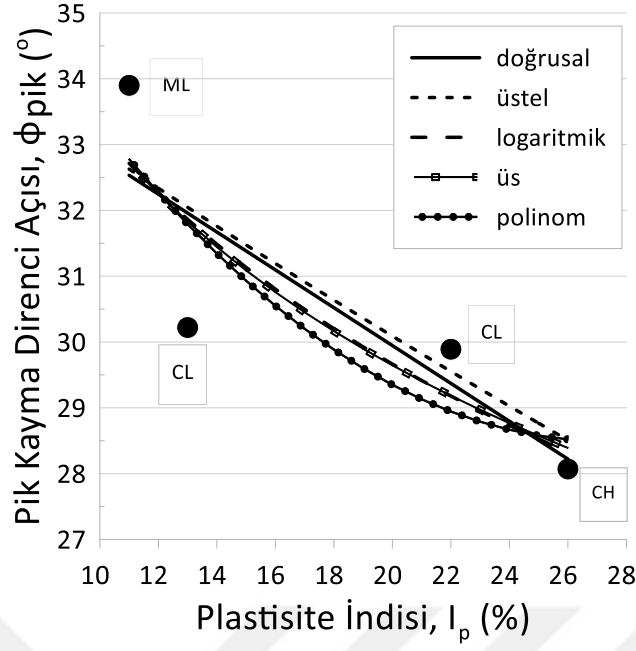
edilen korelasyon katsayılarına göre en yüksek korelasyon değerini polinom denklemi verirken en düşük değeri ise logaritmik denklem vermektedir.

Tablo 6.8. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için plastik limit değeri ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki

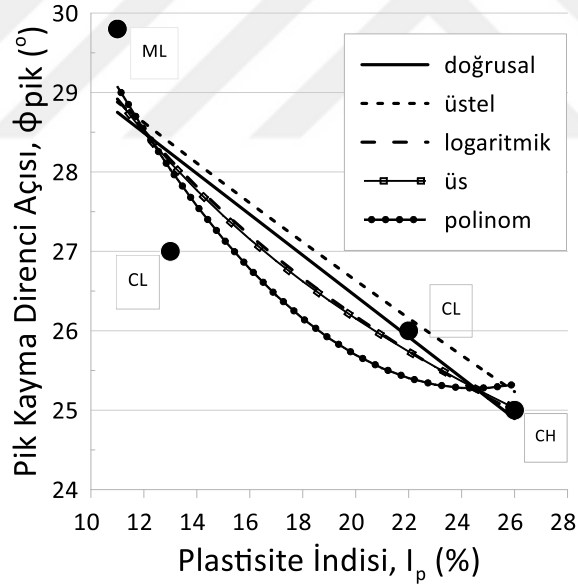
| Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------|--|----------------|
| Doğrusal | $-0,1732 * w_p + 31,193$ | 0,0958 |
| Üstel | $31,754 * e^{(-0,007 * w_p)}$ | 0,1109 |
| Logaritmik | $-3,732 * \ln(w_p) + 38,855$ | 0,0761 |
| Üs | $43,045 * w_p^{-0,147}$ | 0,0896 |
| Polinom | $-0,095 * w_p^2 + 4,4818 * w_p - 24,857$ | 0,3772 |

6.1.3. Plastisite İndisinin Kayma Direncine Etkisi

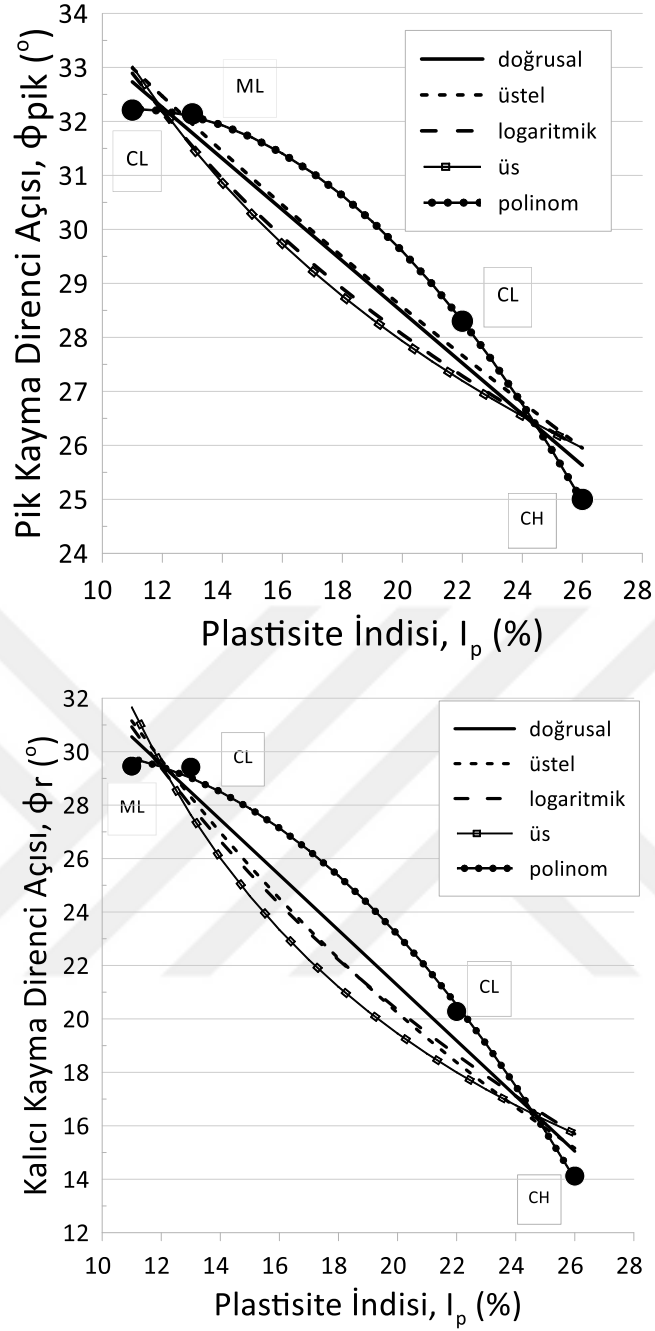
Pik ve kalıcı kayma direnci açılarının plastisite indisi ile ilişkisi incelendiğinde plastik limit ile kalıcı ve pik kayma direnci açıları arasındaki ilişkide olduğu gibi plastisite indisi değeri arttıkça pik ve kalıcı kayma direnci açılarının azaldığı görülmektedir. N1,N2, N3 ve N4 numunelerinin plastisite indisi değerleri sırasıyla %13, %11, %26 ve %22'dir. Artan plastisite indisi değeriyle kayma direnci açılarının azalışı doğrusal, üstel, üs, logaritmik ve polinom eğrileriyle gösterilmiştir. Bu doğrultuda deney numuneleri üzerinde yapılan; 0,02 mm/dak hız için direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla plastisite indisi değerleri doğrultusundaki değişimi Şekil 6.7'de, 0,005 mm/dak hız için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla plastisite indisi değerleri doğrultusundaki değişim Şekil 6.8'de, 0,027 der/dak hız için halka kesme deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik ve kalıcı kayma direnci içsel sürtünme açısıyla plastisite indisi değerleri doğrultusundaki değişimi Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.6. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının plastisite indisi ile değişimi



Şekil 6.7. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için plastisite indisi ile pik kayma direnci açısının değişimi



Şekil 6.8. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için plastisite indisi ile pik ve kalıcı kayma direnci açılarının değişimi

Pik ve kalıcı kayma direnci açılarının plastisite indisi değeriyle ilişkisini göstermek amacıyla çizilen doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait bağıntı türü doğrultusunda elde edilen bağıntı denklemleri ve korelasyon katsayıları her bir deney türü ve hızı için tablolar halinde verilmiştir.

Direkt kesme kutusu deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastisite indisi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.9’da verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve

korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üs, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemdir. 0,1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemdir. 1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üs, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemdir. Direkt kesme kutusuna ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limit ile ilişkisinde 0,1 mm/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.9. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki

| Hız(mm/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------|--------------|---|----------------|
| 0,02 mm/dak | Doğrusal | $-0,2875 I_p + 35,696$ | 0,7107 |
| | Üstel | $36,024 * e^{(-0,009 * I_p)}$ | 0,7248 |
| | Logaritmik | $-5,103 * \ln(I_p) + 44,952$ | 0,7391 |
| | Üs | $48,6 * I_p^{-0,165}$ | 0,7494 |
| | Polinom | $-0,0162 * I_p^2 - 0,8833 * I_p + 40,535$ | 0,7309 |
| 0,1 mm/dak | Doğrusal | $-0,1415 I_p + 33,772$ | 0,9712 |
| | Üstel | $33,877 * e^{(-0,005 * I_p)}$ | 0,9682 |
| | Logaritmik | $-2,423 * \ln(I_p) + 38,078$ | 0,9405 |
| | Üs | $38,906 * I_p^{-0,078}$ | 0,9363 |
| | Polinom | $-0,02079 * I_p^2 + 0,1492 * I_p + 31,41$ | 0,9984 |
| 1 mm/dak | Doğrusal | $-0,3525 * I_p + 36,144$ | 0,9392 |
| | Üstel | $36,782 * e^{(-0,012 * I_p)}$ | 0,9474 |
| | Logaritmik | $-6,177 * \ln(I_p) + 47,267$ | 0,9521 |
| | Üs | $53,391 * I_p^{-0,207}$ | 0,9557 |

Halka kesme deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastisite indisi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.10'da verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon

katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemidir. 0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemidir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemidir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limit ile ilişkisinde 0,135 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.10. Halka kesme deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|---|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | $-0,4735 * I_p + 37,941$ | 0,9611 |
| | Üstel | $39,339 * e^{(-0,016 * I_p)}$ | 0,9496 |
| | Logaritmik | $-8,087 * \ln(I_p) + 52,283$ | 0,9242 |
| | Üs | $64,62 * I_p^{-0,28}$ | 0,9091 |
| | Polinom | $-0,0319 * I_p^2 + 0,6957 * I_p + 28,441$ | 0,9999 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | $-0,3968 * I_p + 35,263$ | 0,9861 |
| | Üstel | $36,114 * e^{(-0,014 * I_p)}$ | 0,9873 |
| | Logaritmik | $-6,987 * \ln(I_p) + 47,878$ | 0,9726 |
| | Üs | $56,513 * I_p^{-0,248}$ | 0,9707 |
| | Polinom | $0,0234 * I_p^2 - 1,2543 * I_p + 42,228$ | 0,9865 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | $-0,5406 * I_p + 36,007$ | 0,9670 |
| | Üstel | $37,938 * e^{(-0,021 * I_p)}$ | 0,9738 |
| | Logaritmik | $-9,346 * \ln(I_p) + 52,704$ | 0,9895 |
| | Üs | $72,172 * I_p^{-0,36}$ | 0,9933 |
| | Polinom | $-0,0039 * I_p^2 - 0,3958 * I_p + 34,83$ | 0,9969 |

Halka kesme deney aletinde kalıcı kayma direnci açısıyla plastisite indisi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.11’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve

korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için korelasyon katsayısı en yüksek denklem polinom, en düşük ise üs denklemdir. 0,135 der/dak hız için korelasyon katsayısı en yüksek denklem polinom, en düşük ise doğrusal denklemdir. 1,35 der/dak hız için korelasyon katsayısı en yüksek denklem üstel, en düşük ise logaritmik denklemdir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limit ile ilişkisinde 0,135 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.11. Halka kesme deneyi için kalıcı kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------------|--------------|---|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | $-1,034 * I_p + 41,932$ | 0,9755 |
| | Üstel | $52,823 * e^{(-0,048 * I_p)}$ | 0,9478 |
| | Logaritmik | $-17,71 * \ln(I_p) + 73,398$ | 0,9444 |
| | Üs | $223,53 * I_p^{-0,815}$ | 0,9067 |
| | Polinom | $-0,0527 * I_p^2 + 0,9011 * I_p + 26,214$ | 0,9981 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | $-1,1718 * I_p + 43,284$ | 0,9688 |
| | Üstel | $56,286 * e^{(-0,055 * I_p)}$ | 0,9751 |
| | Logaritmik | $-20,55 * \ln(I_p) + 80,306$ | 0,9836 |
| | Üs | $316,89 * I_p^{-0,961}$ | 0,9840 |
| | Polinom | $-0,0607 * I_p^2 - 3,4005 * I_p + 61,388$ | 0,9920 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | $-0,968 * I_p + 39,324$ | 0,9670 |
| | Üstel | $48,109 * e^{(-0,046 * I_p)}$ | 0,9761 |
| | Logaritmik | $-16,79 * \ln(I_p) + 69,379$ | 0,9602 |
| | Üs | $199,68 * I_p^{-0,796}$ | 0,9652 |
| | Polinom | $0,0107 * I_p^2 - 1,3623 * I_p + 42,526$ | 0,9680 |

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi aletinde pik kayma direnci açısıyla plastisite indisi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.12’de verilmiştir. 0,005 mm/dak hıza ait

denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde korelasyon katsayısı en yüksek denklem üs, en düşük denklem doğrusal denklemdir.

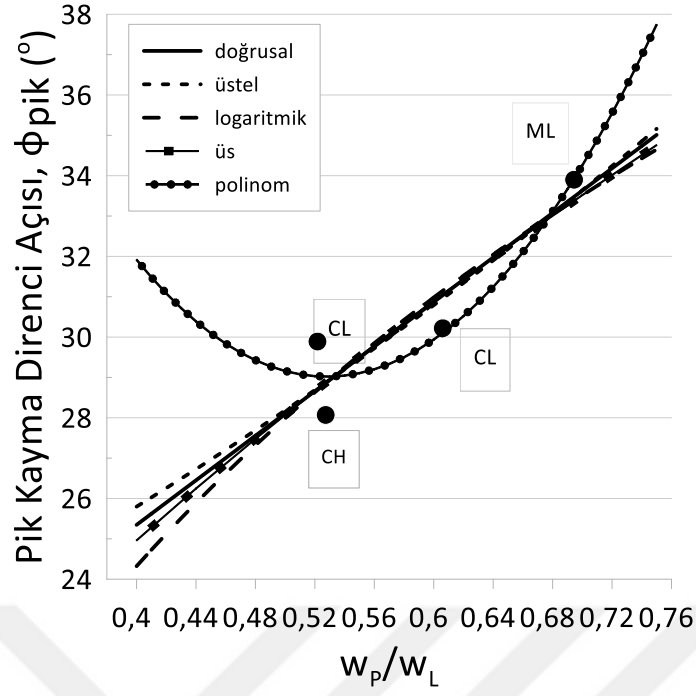
Tablo 6.12. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastisite indisi arasındaki ilişki

| Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|-------------------|--|----------------|
| Doğrusal | $-0,2571 * I_p + 31,579$ | 0,7939 |
| Üstel | $31,886 * e^{(-0,009 * I_p)}$ | 0,8103 |
| Logaritmik | $-4,579 * \ln(I_p) + 39,898$ | 0,8306 |
| Üs | $43,262 * I_p^{-0,168}$ | 0,8443 |
| Polinom | $0,0209 * I_p^2 - 1,0234 * I_p + 37,803$ | 0,8403 |

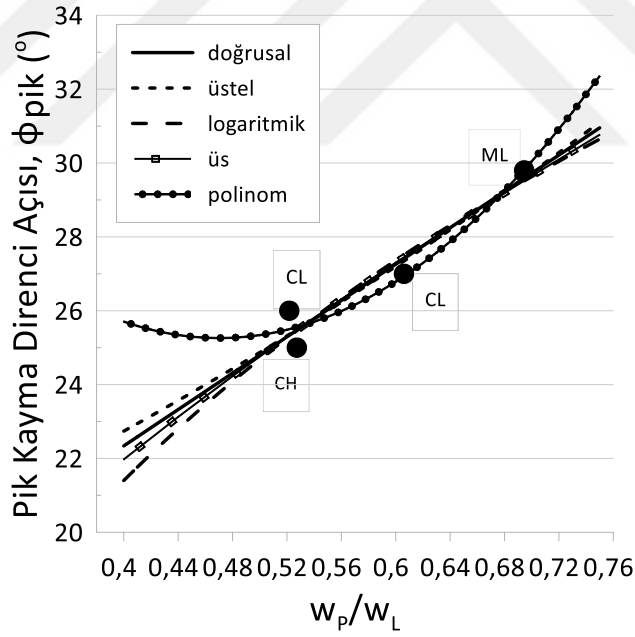
6.1.4. Plastik Limitin Likit Limite Oranının Kayma Direncine Etkisi

Bir diğer inceleme ise plastik limit ve likit limit (w_p/w_L) oranının pik ve kalıcı kayma direnci açılarıyla ilişkidir. Daha önce yapılan çalışmalara bakıldığında, aynı şekilde bu çalışmada da görüldüğü üzere plastik limitin likit limit oranı arttıkça kayma direnci açısının arttığı görülmektedir. N1, N2, N3 ve N4 numunelerine ait w_p/w_L oranı sırasıyla 0,61, 0,69, 0,53 ve 0,52'dir.

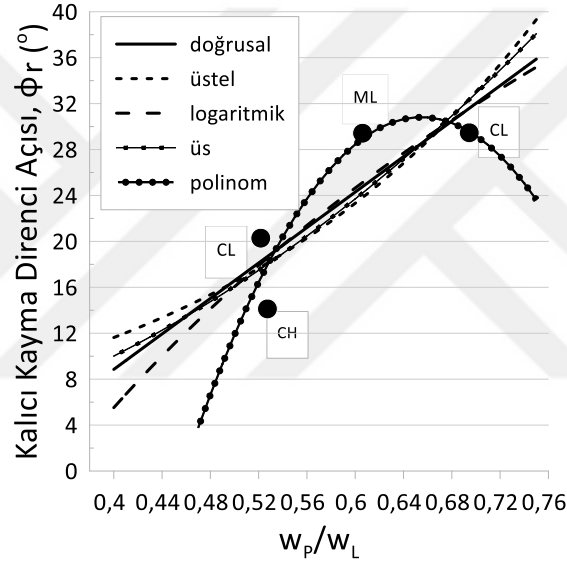
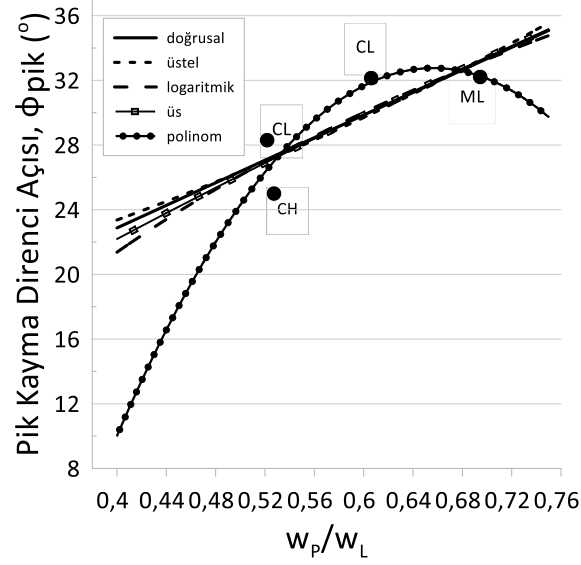
Plastik limitin likit limite oranının artmasıyla birlikte artan pik ve kalıcı kayma direnci açılarının meydana getirdiği Şekillere ait doğrusal, üstel, üs, logaritmik ve polinom eğrileriyle gösterilmiştir. Bu doğrultuda deney numuneleri üzerinde yapılan; 0,02 mm/dak hız için direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla plastik limitin likit limite oranı doğrultusundaki değişimi Şekil 6.10'da, 0,005 mm/dak hız için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik kayma direnci açısıyla plastik limitin likit limite oranı doğrultusundaki değişim Şekil 6.11'de, 0,027 der/dak hız için halka kesme deneyi sonuçlarıyla elde edilen pik ve kalıcı kayma direnci içsel sürtünme açısıyla plastik limitin likit limite oranı doğrultusundaki değişimi Şekil 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.9. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının plastik limitin likit limite oranıyla değişimi



Şekil 6.10. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi



Şekil 6.11. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kalıcı ve pik kayma direnci açılarının plastik limitin likit limite oranıyla değişimi

Pik ve kalıcı kayma direnci açılarının plastik limitin likit limite oranı ile ilişkisini göstermek amacıyla çizilen doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait bağıntı türü doğrultusunda elde edilen bağıntı denklemleri ve korelasyon katsayıları her bir deney türü ve hızı için tablolar halinde verilmiştir.

Direkt kesme kutusu deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastik limitin likit limite oran değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.13'te verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemdir. 0,1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en

yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. 1 mm/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. Direkt kesme kutusuna ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile ilişkisinde 1 mm/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.13. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki

| Hız (mm/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------|-----------------|--|----------------|
| 0,02 mm/dak | Doğrusal | 27,613* (w _P /w _L) +14,301 | 0,8399 |
| | Üstel | 18,108*e ^{(0,8848*(w_P/w_L))} | 0,8330 |
| | Logaritmik | 16,428* ln (w _P /w _L) +39,375 | 0,8214 |
| | Üs | 40,445* (w _P /w _L) ^{0,5267} | 0,8157 |
| | Polinom | 176,93*(w _P /w _L) ² -186,82*(w _P /w _L)+78,336 | 0,9072 |
| 0,1 mm/dak | Doğrusal | 10,965*(w _P /w _L) +24,943 | 0,7111 |
| | Üstel | 25,517*e ^{(0,343*(w_P/w_L))} | 0,7042 |
| | Logaritmik | 6,5134* ln ((w _P /w _L))+34,736 | 0,7286 |
| | Üs | 34,932* (w _P /w _L) ^{0,2089} | 0,7217 |
| | Polinom | -87,698*(w _P /w _L) ² +116,98*(w _P /w _L)-6,7974 | 0,8043 |
| 1 mm/dak | Doğrusal | 30,655* (w _P /w _L) +11,794 | 0,9104 |
| | Üstel | 16,344* e ^{(1,0177*(w_P/w_L))} | 0,8949 |
| | Logaritmik | 18,467* ln (w _P /w _L)+39,754 | 0,9128 |
| | Üs | 41,361* (w _P /w _L) ^{0,6135} | 0,8986 |
| | Polinom | -40,854*(w _P /w _L) ² +80,168*(w _P /w _L) -2,9922 | 0,9135 |

Halka kesme deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastik limitin likit limite oran değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.14’te verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için

korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. 0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem logaritmik denklem, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. Halka kesme deney aletine ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile ilişkisinde 0,135 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.14. Halka kesme deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|--|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | 34,901* (w _P /w _L) +8,9124 | 0,6682 |
| | Üstel | 18,108* e ^{(0,8848*(w_P/w_L))} | 0,6474 |
| | Logaritmik | 16,428* ln ((w _P /w _L)) +39,375 | 0,6884 |
| | Üs | 40,445* (w _P /w _L) ^{0,5267} | 0,6669 |
| | Polinom | 176,93*(w _P /w _L) ² -186,82*(w _P /w _L) +78,336 | 0,7964 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | 34,553* (w _P /w _L) +7,8244 | 0,9395 |
| | Üstel | 13,693* e ^{(1,2183*(w_P/w_L))} | 0,9289 |
| | Logaritmik | 20,925* ln ((w _P /w _L)) +39,399 | 0,9520 |
| | Üs | 41,7* (w _P /w _L) ^{0,7383} | 0,9426 |
| | Polinom | -158,45*(w _P /w _L) ² -226,58*(w _P /w _L)-49,522 | 0,9780 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | 42,035* (w _P /w _L) +1,5845 | 0,7638 |
| | Üstel | 10,109* e ^{(1,6119*(w_P/w_L))} | 0,7542 |
| | Logaritmik | 25,7* ln ((w _P /w _L)) +40,128 | 0,7889 |
| | Üs | 44,316* (w _P /w _L) ^{0,9854} | 0,7789 |
| | Polinom | -446,74* (w _P /w _L) ² -583,46* (w _P /w _L)-160,1 | 0,9321 |

Halka kesme deney aletinde kalıcı kayma direnci açısıyla plastik limitin likit limite oran değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve

korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.15'te verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. 0,135 der/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. 1,35 der/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. Halka kesme deney aletine ait üç hız göz önüne alındığında kalıcı kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile ilişkisinde 1,35 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.15. Halka kesme deneyi için kalıcı kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki

| Hız (der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------------|--------------|---|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | 77,223* (w _P /w _L)-22,089 | 0,6972 |
| | Üstel | 2,8889* e ^{(3,4809*(w_P/w_L))} | 0,6425 |
| | Logaritmik | 47,183* ln (w _P /w _L) +48,752 | 0,7191 |
| | Üs | 70,203* (w _P /w _L) ^{2,1259} | 0,6621 |
| | Polinom | -792,09*(w _P /w _L) ² +1037,2*(w _P /w _L)-308,72 | 0,8403 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | 98,379* (w _P /w _L)-35,593 | 0,8751 |
| | Üstel | 1,4573* e ^{(4,5365*(w_P/w_L))} | 0,8514 |
| | Logaritmik | 59,951* ln (w _P /w _L) +54,486 | 0,8967 |
| | Üs | 92,951* (w _P /w _L) ^{2,7659} | 0,8744 |
| | Polinom | -796,67*(w _P /w _L) ² +1063,9*(w _P /w _L)-323,93 | 0,9871 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | 30,435* (w _P /w _L) +11,438 | 0,8782 |
| | Üstel | 15,923* e ^{(1,0339*(w_P/w_L))} | 0,8647 |
| | Logaritmik | 18,466* ln (w _P /w _L) +39,268 | 0,8903 |
| | Üs | 40,99* (w _P /w _L) ^{0,6276} | 0,8803 |
| | Polinom | -176,24*(w _P /w _L) ² +244,03*(w _P /w _L)-52,347 | 0,9357 |

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aletinde pik kayma direnci açısıyla plastik limitin likit limite oran değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.16’da verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için korelasyon için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip denklem logaritmik denklemdir.

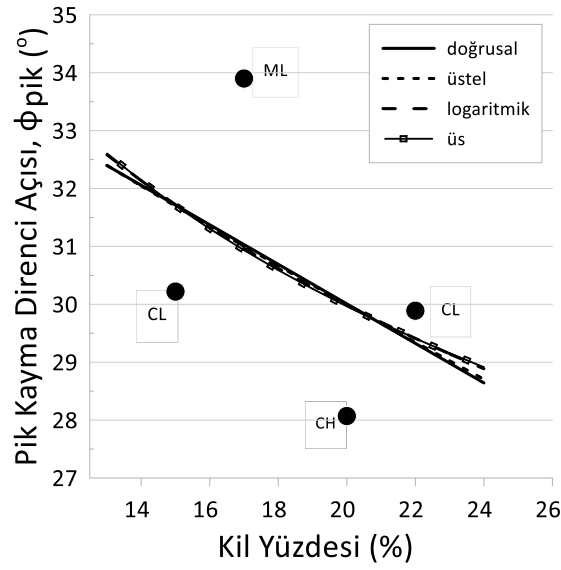
Tablo 6.16. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısı ile plastik limitin likit limite oranı arasındaki ilişki

| Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|-------------------|--|----------------|
| Doğrusal | $24,61 * (w_P/w_L)I_p + 12,495$ | 0,9315 |
| Üstel | $15,894 * e^{(0,8953 * (w_P/w_L))}$ | 0,9294 |
| Logaritmik | $14,707 * \ln(w_P/w_L) + 34,877$ | 0,9192 |
| Üs | $35,889 * (w_P/w_L)^{0,5354}$ | 0,9183 |
| Polinom | $90,636 * (w_P/w_L)^2 - 85,236 * (w_P/w_L) + 45,298$ | 0,9562 |

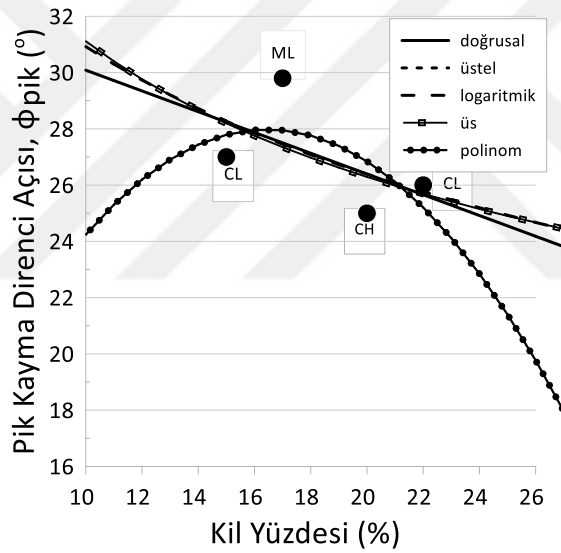
6.2. Numunelerin Diğer Geoteknik Özelliklerinin Kayma Direncine Etkisi

6.2.1 Kil Yüzdesinin Kayma Direncine Etkisi

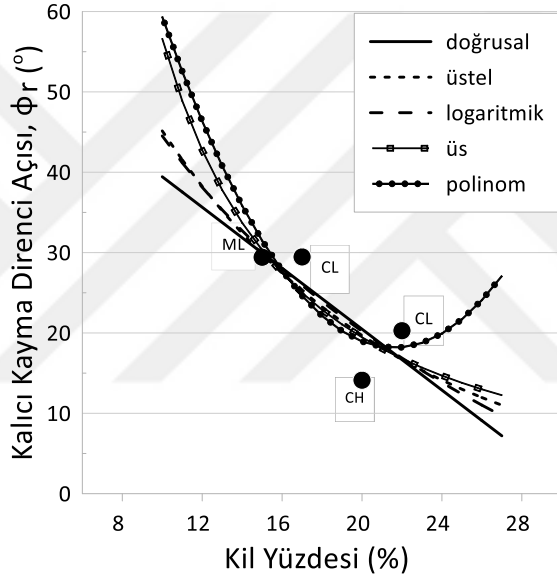
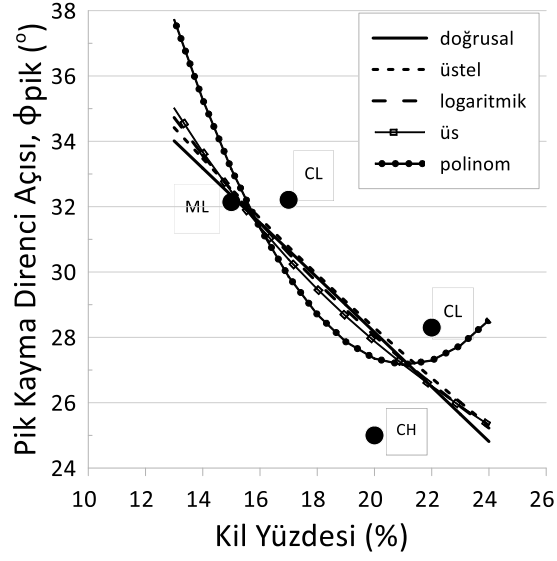
Geçmişte yapılan çalışmalarda numunelerin kil yüzdelерinin ve aktivite değeri de kayma direnci parametrelerinin değişiminde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları Kenney (1977), Kalteizois (1993), Lupini ve diğ. (1981), Mesri ve Cepeda- Diaz (1986) ve Hatipoğlu (2012)’dur. Bu doğrultuda kil yüzdeleri sırasıyla %15, %17, %20 ve %22 olan N1, N2, N3 ve N4 numunelerinin farklı hızlarda direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucuyla elde edilen kalıcı ve pik kayma direnci açılarıyla ilişkisi incelenmiştir. Şekil 6.13’te 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyiyle elde edilen pik kayma direnci açılarının kil yüzdesiyle ilişkisini gösteren doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom Şekilleri verilmiştir. 0,005 mm/dak hız için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinden elde edilmiş olan pik kayma direnci açısının kil yüzdesi karşısında değişimi ise Şekil 6.14’te, 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için pik ve kalıcı kayma direnci açılarının kil yüzdesiyle değişimi Şekil 6.15’te verilmiştir. Her bir şekil incelendiğinde artan kil yüzdesiyle birlikte pik ve kalıcı kayma direnci açılarının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.12. 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının kil yüzdesi ile değişimi



Şekil 6.13. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için kil yüzdesi ile pik kayma direnci açısının değişimi



Şekil 6.14. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kil yüzdesi ile kalıcı ve pik kayma direnci açılarının değişimi

Kalıcı ve pik kayma direnci açılarının kil yüzdeleri ile ilişkisini göstermek amacıyla çizilen doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait bağıntı türü doğrultusunda elde edilen bağıntı denklemleri ve korelasyon katsayıları her bir deney türü ve hızı için tablolar halinde verilmiştir.

Direkt kesme kutusu deney aletinde pik kayma direnci açısıyla kil yüzdesi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.17’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. 0,1 mm/dak hız için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan

denklem polinom, en düşük değere sahip denklem üstel denklemdir. 1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip denklem logaritmik denklemdir. Direkt kesme kutusuna ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile ilişkisinde 0,1 mm/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.17. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki

| Hız(mm/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------|--------------|---|----------------|
| 0,02 mm/dak | Doğrusal | -0,3414* (KY) +36,386 | 0,1887 |
| | Üstel | 37,38*e ^{(-0,011*(KY))} | 0,1922 |
| | Logaritmik | -6,028* ln (KY) +48,044 | 0,1760 |
| | Üs | 53,904* (KY) ^{-0,196} | 0,1806 |
| | Polinom | -0,093*(KY) ² +3,0996*(KY)+5,6805 | 0,2369 |
| 0,1 mm/dak | Doğrusal | -0,2434*(KY) +35,729 | 0,5414 |
| | Üstel | 36,054*e ^{(-0,008*(KY))} | 0,5347 |
| | Logaritmik | -4,5* ln (KY)+44,306 | 0,5535 |
| | Üs | 47,462* (KY) ^{-0,144} | 0,5473 |
| | Polinom | 0,04*(KY) ² -1,7234*(KY)+49,129 | 0,5918 |
| 1 mm/dak | Doğrusal | -0,5655* (KY) +40,262 | 0,4553 |
| | Üstel | 42,236* e ^{(-0,019*(KY))} | 0,4587 |
| | Logaritmik | -10,24* ln (KY)+59,553 | 0,4462 |
| | Üs | 80,955* (KY) ^{-0,345} | 0,4516 |
| | Polinom | -0,029*(KY) ² +0,5075*(KY) +30,547 | 0,4594 |

Halka kesme deney aletinde pik kayma direnci açısıyla kil yüzdesi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.18’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip denklem üstel denklemdir.

0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip denklem logaritmik denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip denklem üstel denklemdir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile ilişkisinde 1,35 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.18. Halka kesme deneyi için kil yüzdesi ile pik kayma direnci açısı arasındaki ilişki

| Hız (der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|--|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -0,8364* (KY)+44,886 | 0,5639 |
| | Üstel | 49,531* e ^{(74,484*(KY))} | 0,5351 |
| | Logaritmik | -15,5* ln ((KY)) +74,484 | 0,5798 |
| | Üs | 136* (KY) ^{-0,529} | 0,5521 |
| | Polinom | 0,1615*(KY) ² -6,8119*(KY) +98,988 | 0,6364 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -0,7486* (KY) +41,969 | 0,6481 |
| | Üstel | 45,925* e ^{(-0,027*(KY))} | 0,6571 |
| | Logaritmik | -13,55* ln (KY)+67,495 | 0,6348 |
| | Üs | 114,46* (KY) ^{-0,484} | 0,6453 |
| | Polinom | -0,051*(KY) ² +1,1384* (KY) +24,884 | 0,6585 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -1,079* (KY) +46,236 | 0,7396 |
| | Üstel | 55,72* e ^{(-0,041*(KY))} | 0,7202 |
| | Logaritmik | -19,82* ln ((KY)) +83,88 | 0,7464 |
| | Üs | 234,21* (KY) ^{-0,755} | 0,7284 |
| | Polinom | 0,091* (KY) ² -4,446* (KY)+76,721 | 0,7577 |

Halka kesme deney aletinde kalıcı kayma direnci açısıyla kil yüzdesi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.19’da verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen Tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip denklem üs denklemdir.

0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan logartimik denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üstel denklemdir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile ilişkisinde 1,35 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.19. Halka kesme deneyi için kil yüzdesi ile kalıcı kayma direnci açısı arasındaki ilişki

| Hız (der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------------|--------------|---|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -1,8966* (KY) +58,406 | 0,6180 |
| | Üstel | 103,53* e ^{(-0,083* (KY))} | 0,5360 |
| | Logaritmik | -35,06* ln (KY)+125,25 | 0,6320 |
| | Üs | 1967,8* (KY) ^{-1,541} | 0,5535 |
| | Polinom | 0,306*(KY) ² -13,219*(KY)+160,92 | 0,6735 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -2,4122* (KY) +66,819 | 0,7732 |
| | Üstel | 169,81* e ^{(-0,113* (KY))} | 0,7785 |
| | Logaritmik | -43,86* ln (KY)+149,68 | 0,7647 |
| | Üs | 8391* (KY) ^{-2,062} | 0,7733 |
| | Polinom | -0,0585*(KY) ² -0,2477*(KY)+47,221 | 0,7748 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -2,039* (KY) +59,621 | 0,8079 |
| | Üstel | 121,06* e ^{(-0,095* (KY))} | 0,7782 |
| | Logaritmik | -37,38* ln (KY)+130,55 | 0,8123 |
| | Üs | 3277* (KY) ^{-1,737} | 0,7844 |
| | Polinom | 0,123*(KY) ² -6,59*(KY)+100,83 | 0,8181 |

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aletinde pik kayma direnci açısıyla kil yüzdesi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.20'de verilmiştir. 0,005 mm/dak hızında bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde için korelasyon

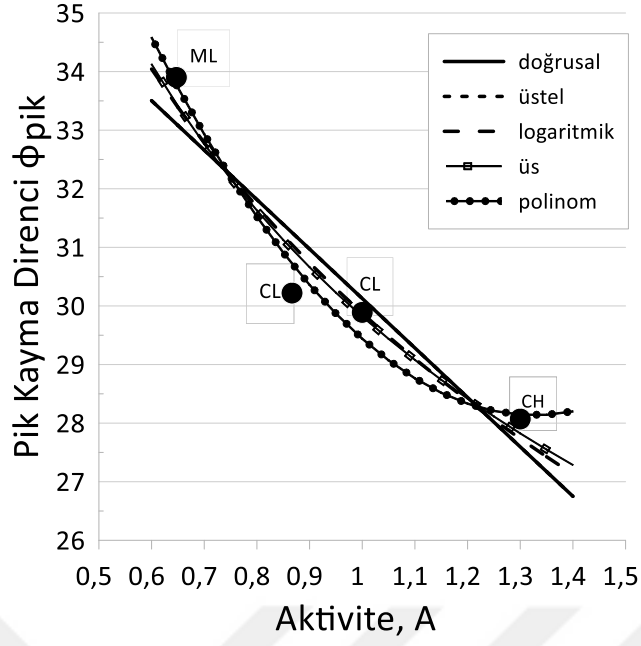
katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir.

Tablo 6.20. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısı ile kil yüzdesi arasındaki ilişki

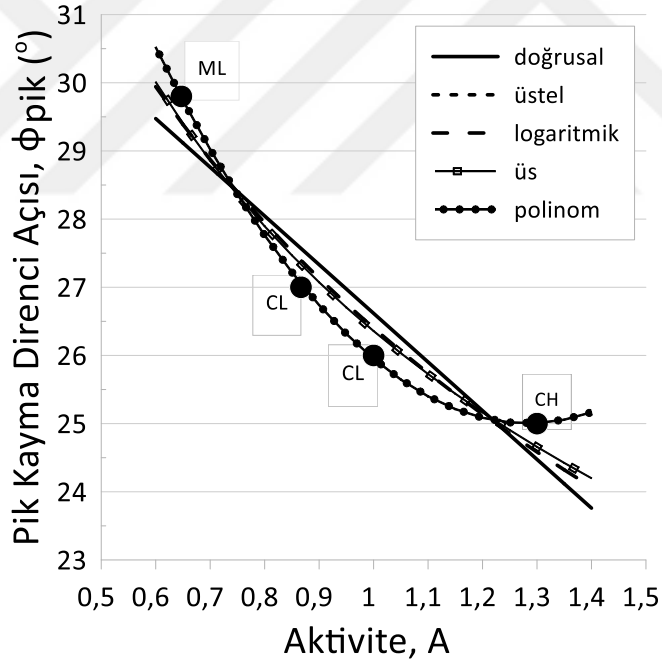
| Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|-------------------|---|----------------|
| Doğrusal | -0,369* KY +33,776 | 0,3077 |
| Üstel | 34,61* e ^{(-0,014* (KY))} | 0,3170 |
| Logaritmik | -6,547*ln(KY)+45,983 | 0,2899 |
| Üs | 54,447* (KY) ^{-0,243} | 0,3002 |
| Polinom | -0,09* (KY) ² +2,961* (KY) +3,6259 | 0,3708 |

6.2.2. Aktivite Değerinin Kayma Direncine Etkisi

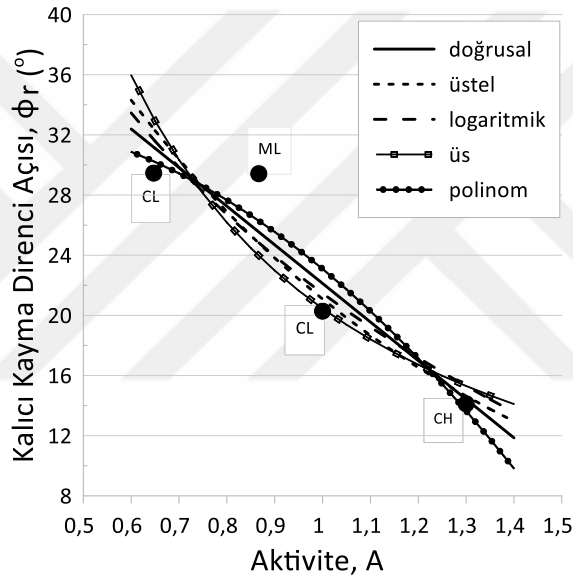
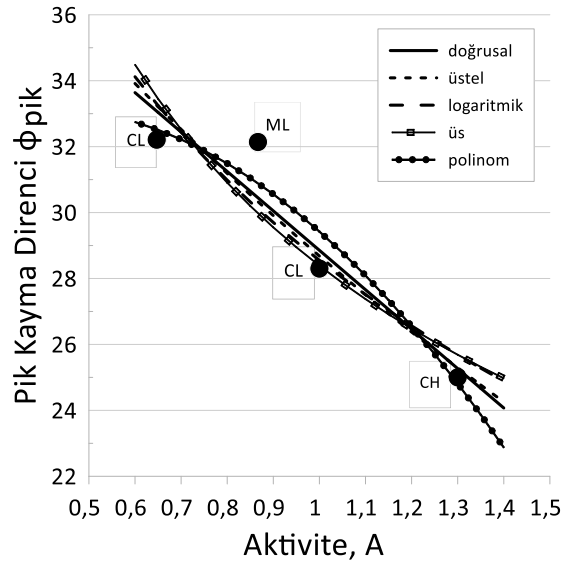
Aktivite değerleri sırasıyla 0,87, 0,65, 1,3 ve 1,0 olan N1, N2, N3 ve N4 numunelerinin farklı hızlarda direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonucuyla elde edilen kalıcı ve pik kayma direnci açılarıyla ilişkisi incelenmiştir. Şekil 6.16'da 0,02 mm/dak hızda direkt kesme kutusu deneyiyle elde edilen pik kayma direnci açılarının aktivite değeriyle ilişkisini gösteren doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom Şekilleri verilmiştir. 0,005 mm/dak hız için konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyiyle elde edilmiş olan pik kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişimi Şekil 6.17'de, 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kalıcı ve pik kayma direnci açılarının kil yüzdesiyle değişimi Şekil 6.18'de verilmiştir. Her bir Şekil incelendiğinde artan aktivite değeriyle birlikte pik ve kalıcı kayma direnci açılarının azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.15. 0,02 mm/dak hızda kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açılarının aktivite ile değişimi



Şekil 6.16. 0,005 mm/dak hızda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi için pik kayma direnci açısının aktivite ile değişimi



Şekil 6.17. 0,027 der/dak hızda halka kesme deneyi için kalıcı ve pik kayma direnci açılarının aktivite ile değişimi

Kalıcı ve pik kayma direnci açılarının aktivite değeriyle değişimini göstermek amacıyla çizilen doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait bağıntı türü doğrultusunda elde edilen bağıntı denklemleri ve korelasyon katsayıları her bir deney türü ve hızı için tablolar halinde verilmiştir.

Direkt kesme kutusu deney aletinde pik kayma direnci açısıyla aktivite değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.21’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,02 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemdir. 0,1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek

olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs denklemidir. 1 mm/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemidir. Direkt kesme kutusuna ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile ilişkisinde 1 mm/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.21. Direkt kesme kutusu deneyi için pik kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişki

| Hız(mm/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------------|--------------|---|----------------|
| 0,02 mm/dak | Doğrusal | -8,4407* (A) +38,568 | 0,8896 |
| | Üstel | 39,54*e ^{(-00,274* (A))} | 0,9057 |
| | Logaritmik | -8,16* ln (A) +29,875 | 0,9434 |
| | Üs | 29,82* (A) ^{-0,264} | 0,9537 |
| | Polinom | 12,195*(A) ² -32,367*(A)+49,612 | 0,9735 |
| 0,1 mm/dak | Doğrusal | -3,6165* (A) +34,673 | 0,9215 |
| | Üstel | 34,881* e ^{(-0,117* (A))} | 0,9219 |
| | Logaritmik | -3,315* ln (A)+30,963 | 0,8788 |
| | Üs | 30,95* (A) ^{-0,107} | 0,8776 |
| | Polinom | -2,2195*(A) ² +0,738*(A) +32,663 | 0,9372 |
| 1 mm/dak | Doğrusal | -9,349*(A) +38,714 | 0,9597 |
| | Üstel | 40,094*e ^{(-0,314* (A))} | 0,9668 |
| | Logaritmik | -8,871* ln (A)+29,099 | 0,9807 |
| | Üs | 29,025* (A) ^{-0,297} | 0,9812 |
| | Polinom | 7,0757*(A) ² -23,231*(A)+45,121 | 0,9846 |

Halka kesme deney aletinde pik kayma direnci açısıyla aktivite değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.22’de verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem üs

denklemdir. 0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik denklemdir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında pik kayma direnci açısının aktivite değeri ile ilişkisinde 0,135 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.22. Halka kesme deneyi için pik kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|--|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -11,959* (A)+40,814 | 0,8892 |
| | Üstel | 43,609* e ^{(-0,419*(A))} | 0,8931 |
| | Logaritmik | -10,9* ln ((A))+28,552 | 0,8377 |
| | Üs | 28,388* (A) ^{-0,381} | 0,8370 |
| | Polinom | -10,085*(A) ² +7,8279*(A) +31,681 | 0,9178 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -9,8149* (A) +37,478 | 0,8592 |
| | Üstel | 39,047* e ^{(-0,348*(A))} | 0,8613 |
| | Logaritmik | -9,362* ln (A)+27,38 | 0,8871 |
| | Üs | 27,285* (A) ^{-0,332} | 0,8850 |
| | Polinom | 10,211*(A) ² -29,848* (A) +46,725 | 0,9013 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -12,897* (A) +38,571 | 0,8150 |
| | Üstel | 42,024* e ^{(-0,501*(A))} | 0,8272 |
| | Logaritmik | -11,94* ln ((A))+25,331 | 0,7931 |
| | Üs | 25,118* (A) ^{-0,463} | 0,8015 |
| | Polinom | -1,783* (A) ² -9,399* (A)+36,957 | 0,8157 |

Halka kesme deney aletinde kalıcı kayma direnci açısıyla aktivite değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.23'te verilmiştir. Her bir hız için bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde 0,027 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem logaritmik

denklemdir. 0,135 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemdir. 1,35 der/dak hız için için korelasyon katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem üstel, en düşük değere sahip denklem logaritmik denklemdir. Halka kesme deneyine ait üç hız göz önüne alındığında kalıcı kayma direnci açısının aktivite değeri ile ilişkisinde 0,027 der/dak hızında korelasyon katsayılarının diğer hızlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.23. Halka kesme deneyi için kalıcı kayma direnci açısı ile aktivite arasındaki ilişki

| Hız(der/dak) | Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|----------------------|--------------|---|----------------|
| 0,027 der/dak | Doğrusal | -25,664* (A) +47,789 | 0,8728 |
| | Üstel | 71,206* e ^{(-1,217* (A))} | 0,8898 |
| | Logaritmik | -23,48* ln (A)+21,465 | 0,8289 |
| | Üs | 20,454* (A) ^{-1,105} | 0,8327 |
| | Polinom | -17,132*(A) ² +7,9474*(A)+32,274 | 0,8904 |
| 0,135 der/dak | Doğrusal | -27,628* (A) +48,534 | 0,7823 |
| | Üstel | 71,884* e ^{(-1,294* (A))} | 0,7853 |
| | Logaritmik | -26,16* ln (A)+20,125 | 0,7961 |
| | Üs | 19,009* (A) ^{-1,219} | 0,7914 |
| | Polinom | 21,781*(A) ² -70,36*(A)+68,259 | 0,8043 |
| 1,35 der/dak | Doğrusal | -22,424* (A) +43,28 | 0,7537 |
| | Üstel | 58,822* e ^{(-1,079* (A))} | 0,7806 |
| | Logaritmik | -20,85* ln (A)+20,253 | 0,7392 |
| | Üs | 19,424* (A) ⁻¹ | 0,7613 |
| | Polinom | 1,1745*(A) ² -24,729*(A)+44,344 | 0,7538 |

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney aletinde pik kayma direnci açısıyla kil yüzdesi değeri arasındaki doğrusal, üstel, logaritmik, üs ve polinom eğrilerine ait denklem ve korelasyon katsayısı değerleri Tablo 6.24'te verilmiştir. 0,005 mm/dak hızında bağıntı türüne ait denklem ve korelasyon katsayıları verilen tablo incelendiğinde için korelasyon

katsayıları içerisinde en yüksek olan denklem polinom, en düşük değere sahip olan denklem doğrusal denklemdir.

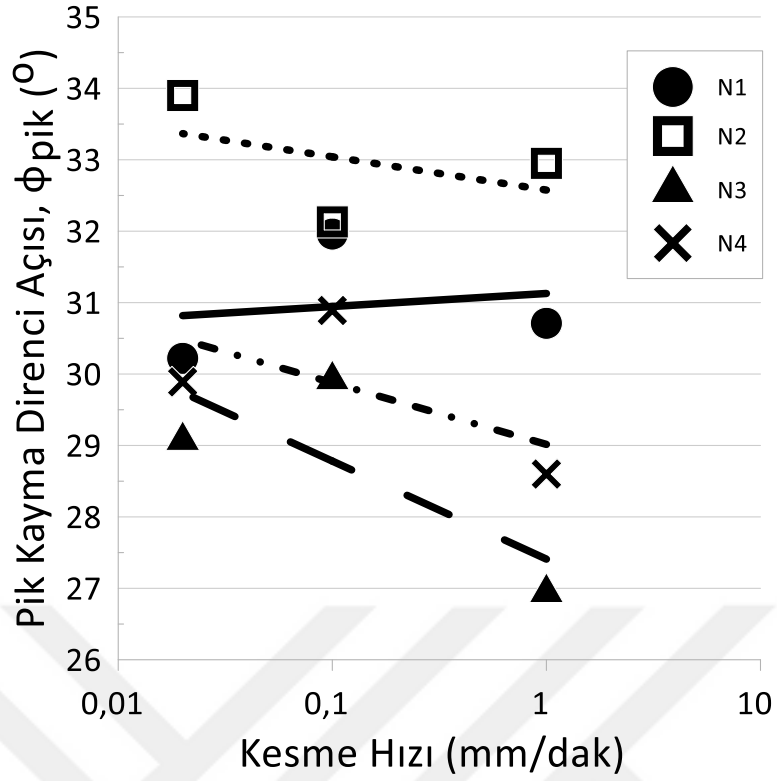
Tablo 6.24. Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde pik kayma direnci açısıyla aktivite arasındaki ilişki

| Bağıntı tipi | Bağıntı | R ² |
|--------------|---|----------------|
| Doğrusal | -7,1424* A +33,76 | 0,8893 |
| Üstel | 34,532* e ^{(-0,262* (A))} | 0,9039 |
| Logaritmik | -6,931*ln(A)+26,402 | 0,9505 |
| Üs | 26,358* (A) ^{-0,254} | 0,9604 |
| Polinom | 11,825* (A) ² -30,343* (A) +44,469 | 0,9996 |

6.3. Hız Faktörünün Kayma Direncine Etkisi

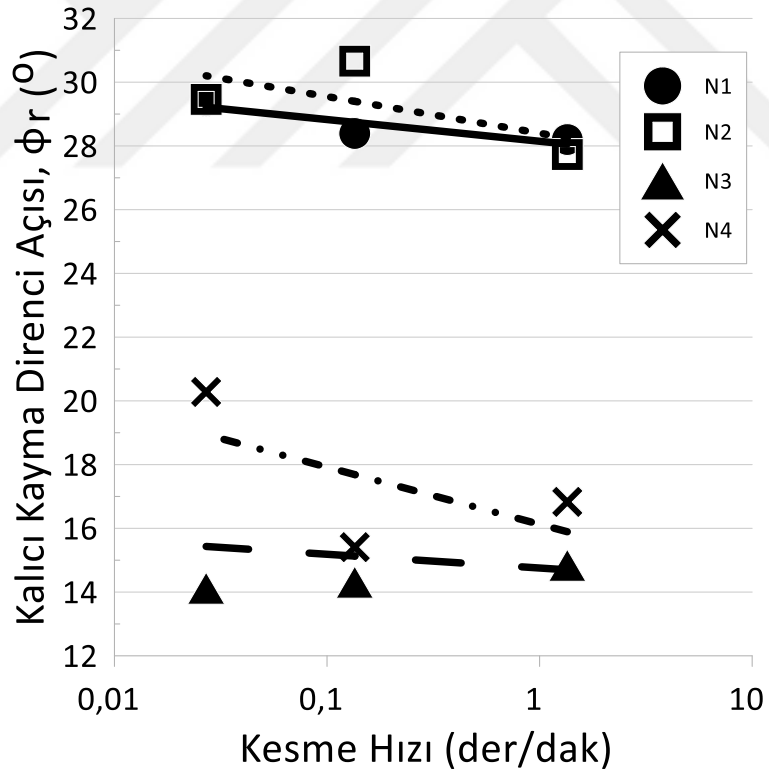
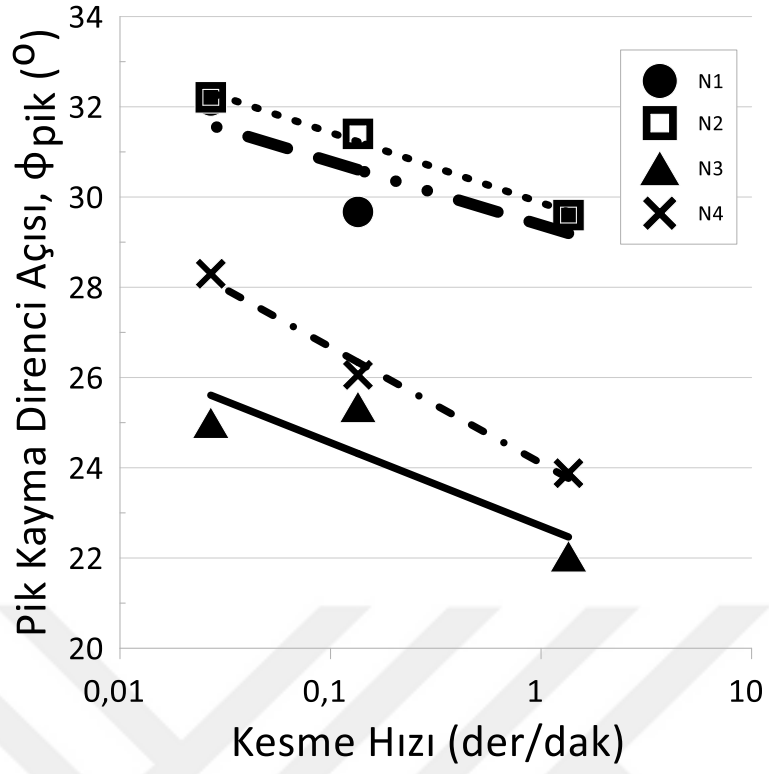
Direkt kesme kutusu deney aletinde 0,02, 0,1 ve 1 mm/dak hızlarında çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen pik kayma direnci açıları doğrultusunda genel olarak hız arttıkça pik kayma direnci açısının azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.19'da görüldüğü üzere kesme hızının logaritmasıyla pik kayma direnci açılarının değişimi verilmiştir. Sadece N1 numunesi için hız arttıkça kayma direnci açısının 0,5° arttığı görülmüştür. Diğer numuneler içinse genel durum geçerli olmaktadır. N2 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı 1°, N3 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı 2,1° ve N4 numunesinde hız arttıkça pik kayma direnci açısının 1,3° azaldığı gözlemlenmektedir.

Halka kesme deneyinde 0,027, 0,135 ve 1,35 der/dak hızlarında çalışılmıştır. Yapılan çalışmalarla pik ve kalıcı kayma direnci açıları elde edilmiştir. Kesme hızının logaritması değiştikçe kalıcı ve pik kayma direnci açılarına ait değişimler Şekil 6.20'de verilmiştir. Halka kesme deneyinde, hız değeri arttıkça pik kayma direnci açısının 0,6-4,4° arasında azaldığı görülmüştür. N1 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı 0,6°, N2 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı 2,6°, N3 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı 3° ve N4 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı 4,4° azalmıştır.



Şekil 6.18. Direkt kesme kutusu deneyinde pik kayma direncinin hız ile ilişkisi

Halka kesme deneyinde, hız değeri arttıkça kalıcı kayma direnci açısının genel olarak $0,8-3,4^{\circ}$ arasında azaldığı görülmüştür. N1 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı $1,2^{\circ}$, N2 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı $0,8^{\circ}$, N4 numunesi için hız arttıkça pik kayma direnci açısı $3,4^{\circ}$ azalmıştır. N3 numunesi için ise hız arttıkça pik kayma direnci açısı $0,6^{\circ}$ artmıştır.



Şekil 6.19. Halka kesme deneyinde pik ve kalıcı kayma direnci açılarının hız ile değişimi

6.4. Direkt Kesme Kutusu Deneyi ve Halka Kesme Deneyi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Zeminlerin kayma direnci halka kesme deneyi, direkt kesme kutusu deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi gibi yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında 4 farklı zemin numunesi olan N1, N2, N3 ve N4 numuneleri üzerinde halka kesme deneyi, direkt kesme kutusu deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde halka kesme deneyi ile direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarında elde edilen pik kayma direnci açılarının kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yavaş, orta ve hızlı hızlarda olmak üzere direkt kesme kutusu deneyleri sırasıyla 0,02, 0,1 ve 1 mm/dak hızlarında, halka kesme kutusu deneyleri ise sırasıyla bu hızlara karşılık gelen değerleri 0,027, 0,135 ve 1,35 der/dak hızlarında her bir deney aleti için 100, 200 ve 300 kPa normal gerilmeler altında gerçekleştirilmiştir. Belirlenen direkt kesme kutusu deneylerine ait hızların, halka kesme deneyindeki hız karşılığını belirten formülasyon aşağıdaki bağıntıda belirtilmiştir.

$$\frac{2 * \pi * (D_2 + D_1)}{360 * 2} * V_{\text{halka}} = V_{\text{kesme}} \quad (6.1.)$$

Eşitlik 6.1’de yer alan ifadeler içerisinde D_2 halka kesme deneyine ait numune dış yarıçapını, D_1 ise iç yarıçapını temsil ederken, V_{halka} ve V_{kesme} ise sırasıyla halka kesme deneyi ve direkt kesme kutusu deney yöntemlerine ait hızları temsil etmektedir.

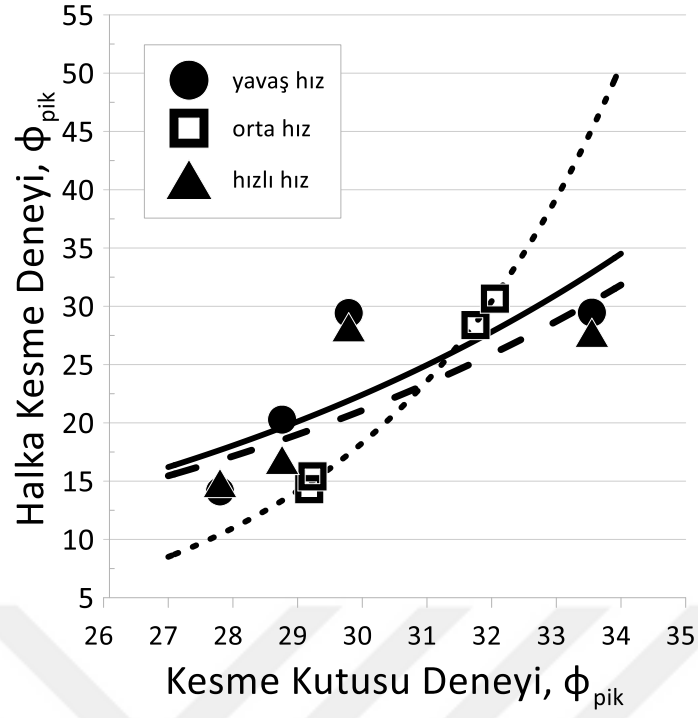
Kayma direncinin belirlenmesinde deney yöntemlerinden halka kesme deneyi, direkt kesme kutusu deneyine göre daha uygundur. Halka kesme deneyinde kesme yüzeyinin kesit alanı boyunca sabit olması diğer deney yöntemleriyle kıyaslandığında, deney sonuçlarının güvenilirliği açısından oldukça büyük bir avantajdır. Tekrarlı kesme kutusu deneylerinde kesme yüzeyinde kalıcı kayma direncine erişilmek istendiğinde, kesme yüzeyinin kesit alanının sabit olmaması bu deney yöntemi için sınırlayıcı bir faktördür. Fakat numune yerleştirilmesi ve kullanım kolaylığı açısından direkt kesme kutusu deneyi daha uygundur. Halka kesme deneyinde numune yerleştirilme şekli düşünüldüğünde örselenmemiş numune kullanılabilmesi neredeyse imkansızdır. Şekil 6.22’de direkt kesme kutusu deneyiyle halka kesme deneyi arasındaki pik kayma direnci açısı sonuçları incelenmiştir. Tablo 6.25’te halka kesme ve direkt kesme kutusu deney sonuçlarıyla elde edilmiş olan pik kayma direnci açılarının değerleri, gerekli deney aleti doğrultusunda dönüştürülen hızlarıyla birlikte bağıntı türü ve korelasyon katsayılarıyla birlikte verilmiştir. Hızlı, orta ve yavaş hızlar için

korelasyon katsayılarına bakıldığında en yüksek değerin orta hıza ait 0,8946 olduğu görülmektedir.

Tablo 6.25. Deney yöntemlerinden elde edilen pik kayma direnci açılarının karşılaştırılması

| Hız | Numune No | Halka kesme (Φ_{pik}) | Kesme kutusu (Φ_{pik}) | Bağıntı | R^2 |
|-------|-----------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------|
| Yavaş | N1 | 32,14 | 30,22 | $0,5462 * \Phi_{pik(kesme)}^{1,1682}$ | 0,6425 |
| | N2 | 32,21 | 33,90 | | |
| | N3 | 25,00 | 28,07 | | |
| | N4 | 28,30 | 29,89 | | |
| Orta | N1 | 29,67 | 31,96 | $0,0012 * \Phi_{pik(kesme)}^{2,9254}$ | 0,8946 |
| | N2 | 31,40 | 32,13 | | |
| | N3 | 25,35 | 29,92 | | |
| | N4 | 26,06 | 30,89 | | |
| Hızlı | N1 | 29,58 | 30,71 | $0,1541 * \Phi_{pik(kesme)}^{1,5018}$ | 0,6195 |
| | N2 | 29,60 | 32,95 | | |
| | N3 | 22,04 | 26,94 | | |
| | N4 | 23,88 | 28,60 | | |

Şekil 6.2’de de görüldüğü üzere pik kayma direnci açıları için halka kesme kutusu deneyi ile direkt kesme kutusu deneyi arasındaki ilişki incelendiğinde, genel olarak direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarının halka kesme kutusu deneyi sonuçlarından $0,73-4,8^\circ$ daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.20. Direkt kesme kutusu deney yöntemiyle halka kesme deneyi yönteminden elde edilen pik kayma direnci açılarının karşılaştırılması

7. GENEL SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında 3 adet killi zemin numunesi ve 1 adet siltli zemin numunesi üzerinde zeminlerin pik ve kalıcı kayma direnci parametrelerini belirleyebilmek amacıyla direkt kesme kutusu deneyi, halka kesme deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Doygun olmayan zemin numunelerinde direkt kesme kutusu ve halka kesme deney yöntemlerini karşılaştırmak, aynı zamanda kayma direncinin hızla değişimini belirlemek amacıyla üç farklı hızda, her bir hız için 3 farklı normal gerilme altında deneyler yapılmıştır.

Doygun olmayan zemin numuneleri üzerinde halka kesme deneyi ve direkt kesme kutusu deneyine ait pik kayma direnci açısı değerleri karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen pik kayma direnci açıları için direkt kesme kutusu deneyi sonuçlarının, halka kesme deneyi sonuçlarından genellikle daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. İki deney yöntemi arasındaki pik kayma direnci açıları arasındaki fark $0,7-4,8^{\circ}$ arasında değişmektedir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyiyle diğer deney yöntemlerinden elde edilen kayma direnci parametrelerinin karşılaştırılamamasının sebebi, konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyinde kullanılan numunelerin suya doymuş olması ve artık boşluk suyu basıncının oluşumunu önlemek amacıyla $0,005$ mm/dak gibi yavaş bir hızda kesilmesinden dolayı zaman kısıtlaması göz önünde bulundurularak kesme işleminin düşük seviyede sonlandırılması sebebiyle gerekli kıyaslamaların yapılmaması gereğine karar verilmiştir.

Halka kesme deney yönteminin diğer deney yöntemlerine göre kesme yüzey alanının sabit olması bu deney yönteminin en önemli avantajlarından biridir. Fakat örselenmemiş numunenin genel olarak kullanılamaması, halka kesme deney yönteminin dezavantajıdır. Direkt kesme kutusu deney yönteminin belirli bir deformasyon seviyesine kadar izin vermesi sebebiyle kalıcı kayma direnci parametreleri elde etmek istendiğinde, çevrimlere ihtiyaç duyulması sonucunda kesme yüzeyinin sabit kalmama ihtimalinin yüksek olması, bu deney yönteminin en büyük dezavantajlarından birisidir. Bir diğeri ise deney yönteminin çalışma sistemi göz önüne alındığında numunenin kesme yüzey alanında en zayıf noktadan geçme ihtimalidir. Fakat deney düzeneğinin yaygın olması ve kullanım kolaylığının bulunması direkt kesme kutusu deney yönteminin üstünlüklerindedir.

Konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deney yönteminde boşluk suyu basıncının ölçülerek drenaj kontrolünün yapılabilmesi oldukça önemli bir avantajken, doymuş numune

elde etmek için geçen süre, konsolidasyon ve boşluk suyu basıncının oluşumunu önlemek amacıyla yapılan yavaş kesim işlemleri bu deney yönteminin uzun sürmesine neden olmaktadır. Ayrıca numuneye uygulanan şekil değiştirmenin sınırlı olması bu deney yönteminin en büyük dezavantajıdır.

Direkt kesme kutusu deney yöntemi ve halka kesme kutusu deney yöntemleri üzerinde hızın kayma direnci açısına etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda direkt kesme kutusunda tek bir killi zemin numunesi haricinde genel olarak hız arttıkça pik kayma direnci açısının azaldığı görülmüştür. Halka kesme kutusu deney yönteminde ise pik ve kalıcı kayma dirençleri için hız arttıkça kayma direnci açısı değerlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Bölüm 3.5'te belirtilen daha önce yapılan çalışmalara bakıldığında da hız arttıkça kayma direnci açısının azaldığı sonucuna varılmıştır.

Ayrıca çalışma kapsamında zeminlerin endeks özelliklerinin kayma direnci açısına etkisi de incelenmiştir. 1 mm/dak, 0,01 mm/dak ve 0,02 mm/dak hızlarında direkt kesme kutusu deneyi ve 0,005 mm/dak hızında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yöntemleriyle elde edilen pik kayma direnci açılarıyla, 1,35 der/dak, 0,135 der/dak ve 0,027 der/dak hızlarında halka kesme deney yönteminden elde edilen pik ve kalıcı kayma direnci açılarının zemin endeks özellikleriyle kıyaslaması yapılmıştır. 4 adet deney numunesinin likit limiti %33 ile %46 arasında, plastik limiti %20 ile %29 arasında, plastisite indisi %11 ile %26 arasında, plastik limitin likit limite oranı 0,52 ile 0,69 arasında, kil yüzdesi %15 ile %22 arasında ve aktivite değeri 0,65 ile 1,30 arasında değişen değerlerinin, kayma direnci açısı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yapılan tüm çalışmalar sonucunda, plastik limit, likit limit, plastisite indisi, kil yüzdesi ve aktivite değerlerinin artışıyla birlikte tüm deney yöntemlerinden pik ve kalıcı kayma direnci açısı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Buna karşılık plastik limitin likit limite oranının artmasıyla birlikte kayma direnci açısı değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, çalışma kapsamında halka kesme deneyi, direkt kesme kutusu deneyi ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi yöntemleriyle zeminlerin kayma direnci belirlenerek, deney yönteminin, hız faktörünün etkisi ve endeks özellikleriyle kayma direnci arasındaki bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bu bağıntılar genel bir sonuç vermekle birlikte bu sonuçların sınırlı sayıdaki numune ve hızlarda elde edildiği göz önünde bulundurularak deney sayılarının artırılıp yeni bulgu ve bağıntılarla geliştirilmesi mümkündür.

KAYNAKÇA

ASTM D-6467. (2000). Standard Test Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

ASTM D2488-09a. (2009). Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure). *ASTM International, West Conshohocken, USA*

ASTM D3080-04. (2004). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.*

ASTM D3080/D3080M-11. (2011). Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained. *ASTM International Standard Methods, USA.*

Bayın, A. (2011). *Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deney Yöntemi İle Kalıcı Kayma Direncinin Belirlenmesi.* Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Beren, M. (2014). *Zemin Kesme Kutusu Deneyinde Kesme Hızının Zemin Parametrelerine Etkisi.* Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Bromhead, E. N. (1979). A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering, 12(5), 40–44.*

Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design Principles and Practices*. Prentice Hall, New Jersey.

Gibson, R. E. (1953). Experimental Determination of the True Cohesion and True Angle of Internal Friction in Clays. *Proc. 3rd ICSMFE, 1, 126–130.*

Hatipoğlu, M. (2012). *Kalıcı Kayma Mukavemetinin Laboratuvar Deneyleri ile Belirlenmesi.* İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Hawkins, A. B. ve Privett, K. D. (1985). Measurement and Use of Residual Shear Strength of Cohesive Soils. *Ground Engineering, 22–29.*

Head, K. H. (2006). *Manual of Soil Laboratory Testing. Pentech Press (2. bs., C. 2).* London.

Holtz, R. D. ve Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction To Geotechnical Engineering.* New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D. ve Sheahan, T. C. (2015). *Geoteknik Mühendisliğine Giriş.* A. Erken (Ed.), (15. bs., s. 540). Ankara.

- Kalteziotis, N.** (1993). The residual shear strength of some Hellenic clayey soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 11(2), 125–145.
- Kenney, T. C.** (1977). Residual Strengths of Mineral Mixtures. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, (ss. 155–160). Toronto, Japonya.
- Koltuk, S.** (2005). *Zeminlerin Kalıcı Kayma Mukavemetinin Halka Kesme Deneyi ile Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E. ve Vaughan, P. R.** (1981). The Drained Residual Strength Of Cohesive Soils. *Geotechnique*, 31(2), 181–213.
- Mesri, G. ve Cepeda-Diaz, A. F.** (1986). Residual shear strength of clays and shales. *Geotechnique*, 36(2), 269–274.
- Mitchell, J. K.** (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Olson, E.** (1974). Shearin Strengths of Kaolinite, Illite and Montmorillonite. *Journal of the Geotechnical Division*, 100(11), 1215–1229.
- Önalp, A. ve Arel, E.** (2018). *Geoteknik Bilgisi 1 Zeminler ve Mekaniği Çözümlü Problemlerle*. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özaydın, K.** (1989). *Zemin Mekaniği*. Meva Matbaacılık ve Yayıncılık LTD. ŞTİ, İstanbul
- SATI, Y.** (2016). *Sıkıştırılmış ince daneli zeminlerin kayma mukavemetinin drenajlı koşullarda incelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Skempton, A. W.** (1964). Long-Term Stability of Clay Slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77–102.
- Skempton, A. W.** (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique*, 35(1), 3–18.
- Sorensen, K. K. ve Okkels, N.** (2013). Correlation Between Drained Shear Strength and Plasticity Index of Undisturbed Overconsolidated Clays. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013*, 1(1957), 423–428.
- Stark, T. D. ve Eid, H.** (1994). Drained Residual Strength of Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5), 856–871.
- Ural, N. ve Önalp, A.** (2005). Dinamik Üç Eksenli Deneyinin Monterey Kumu İle Kalibrasyonu. *Deprem Sempozyumu*, 1157–1161.

Watry, S. M. ve Lade, P. V. (2000). Residual shear strengths of bentonites on Palos Verdes Peninsula, California. *Slope Stability*, 289, 323–342.

Wesley, L. D. (2003). Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits. *Geotechnique*, 53(7), 669–672.

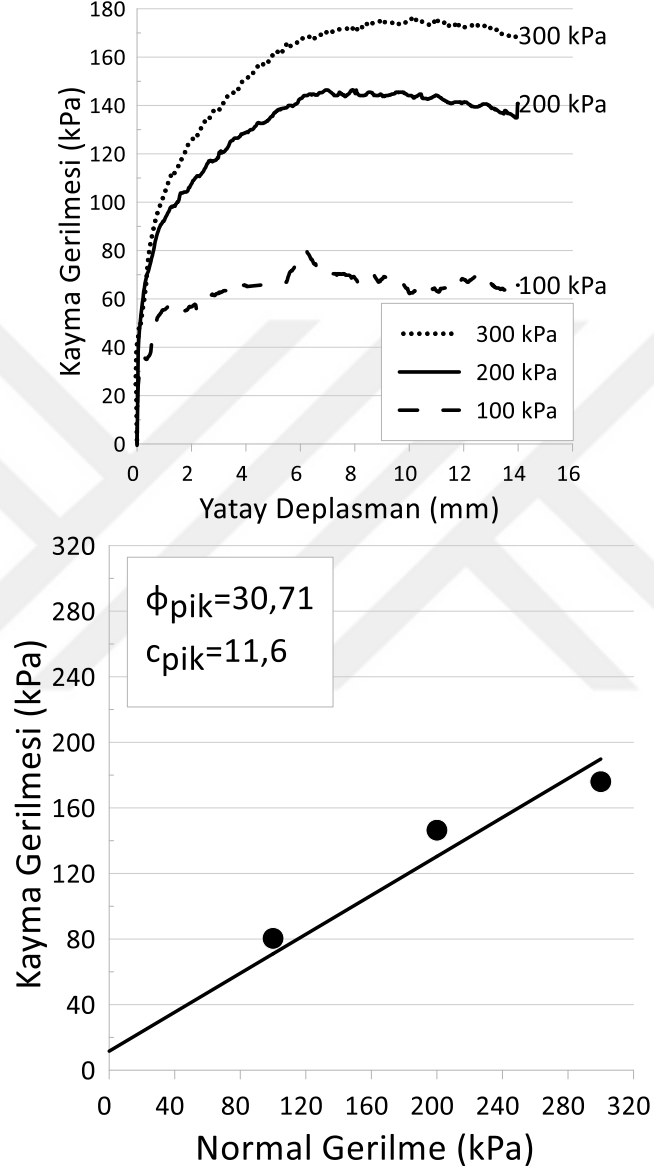


EKLER

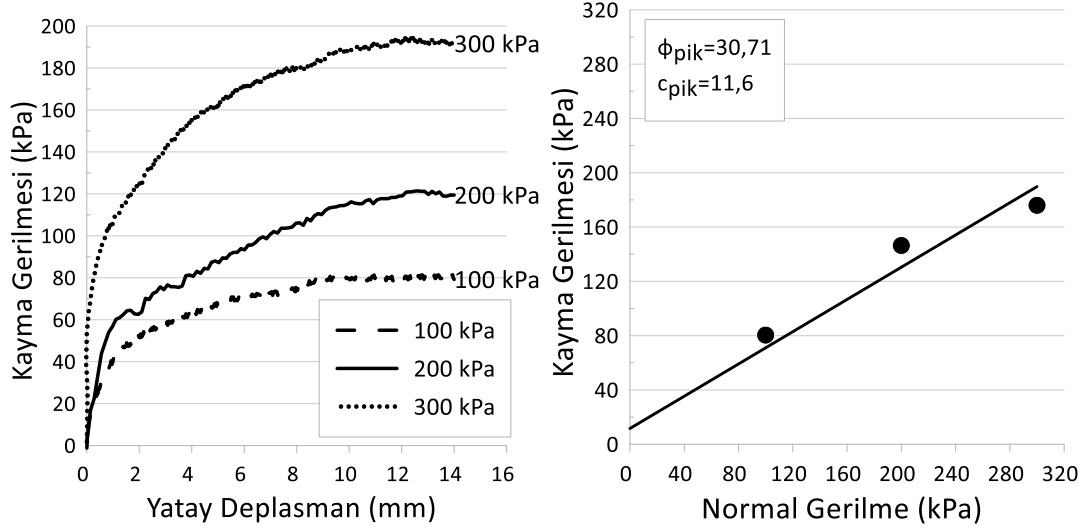
EK A

A.1. Direkt Kesme Kutusu Deneyi Sonuçları

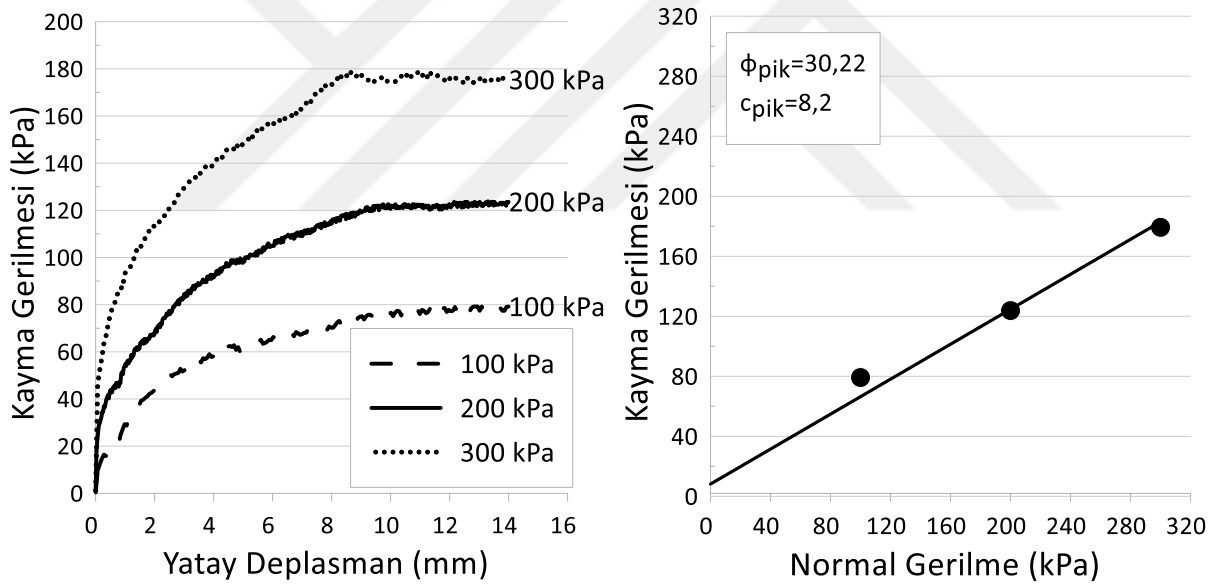
A.1.1. N1 numunesinin direkt kesme kutusu deneyi sonuçları



N1 numunesine ait 1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

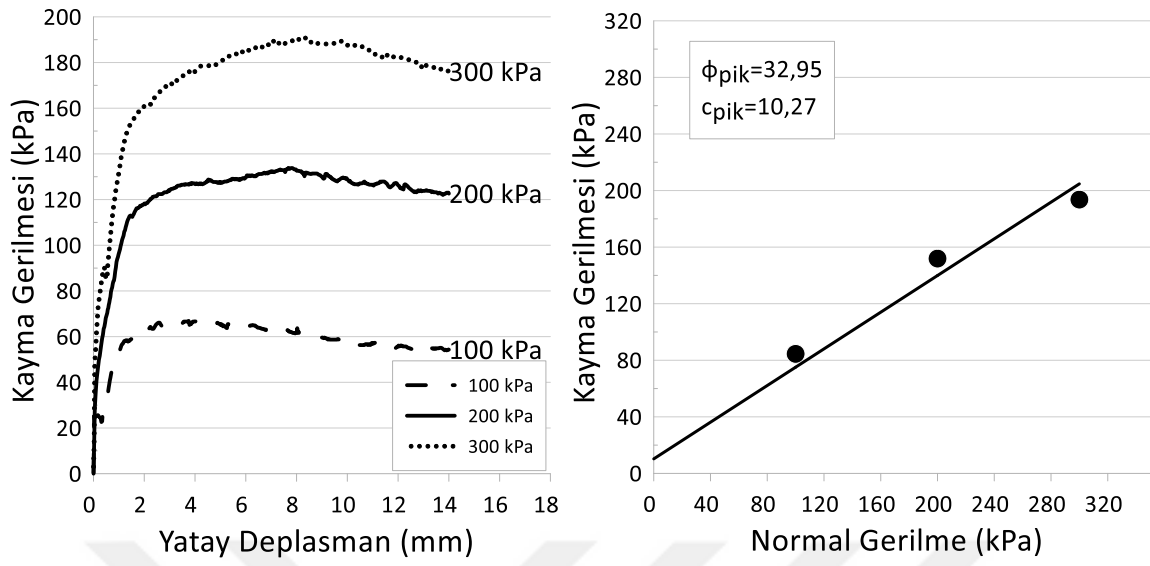


N1 numunesine ait 0,1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

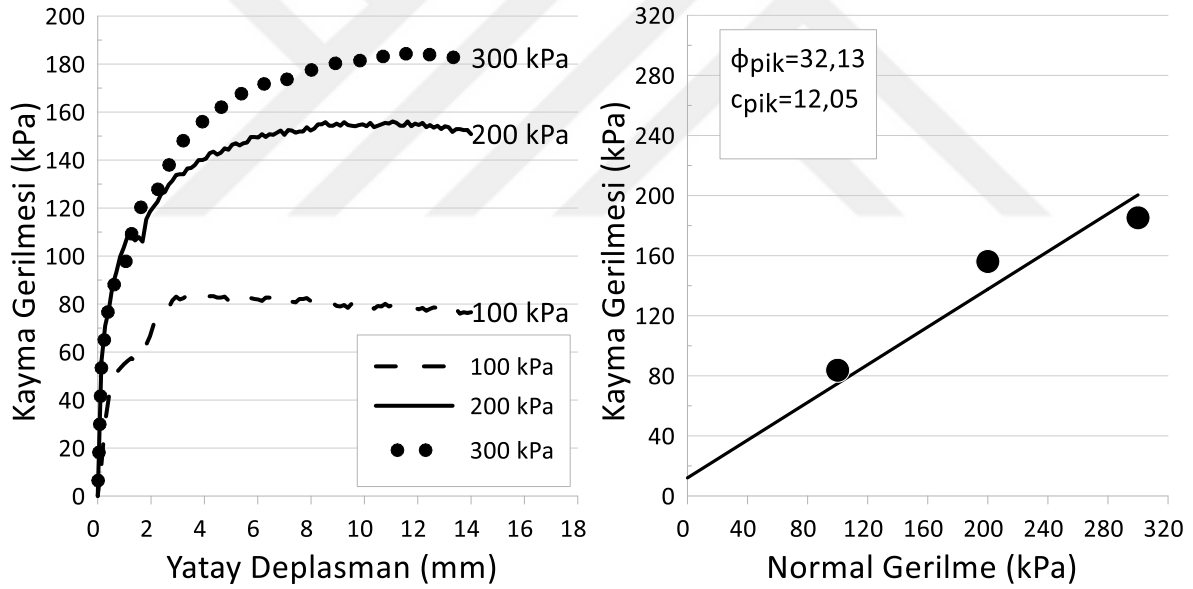


N1 numunesine ait 0,02 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

A.1.2 N2 numunesine ait direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

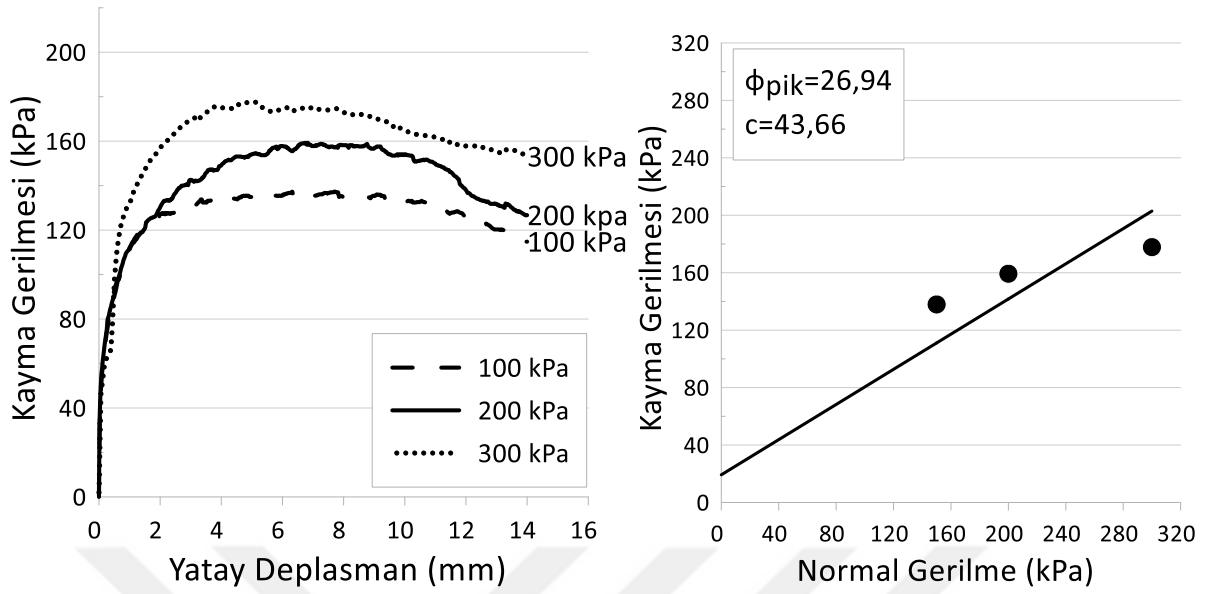


N2 numunesine ait 1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

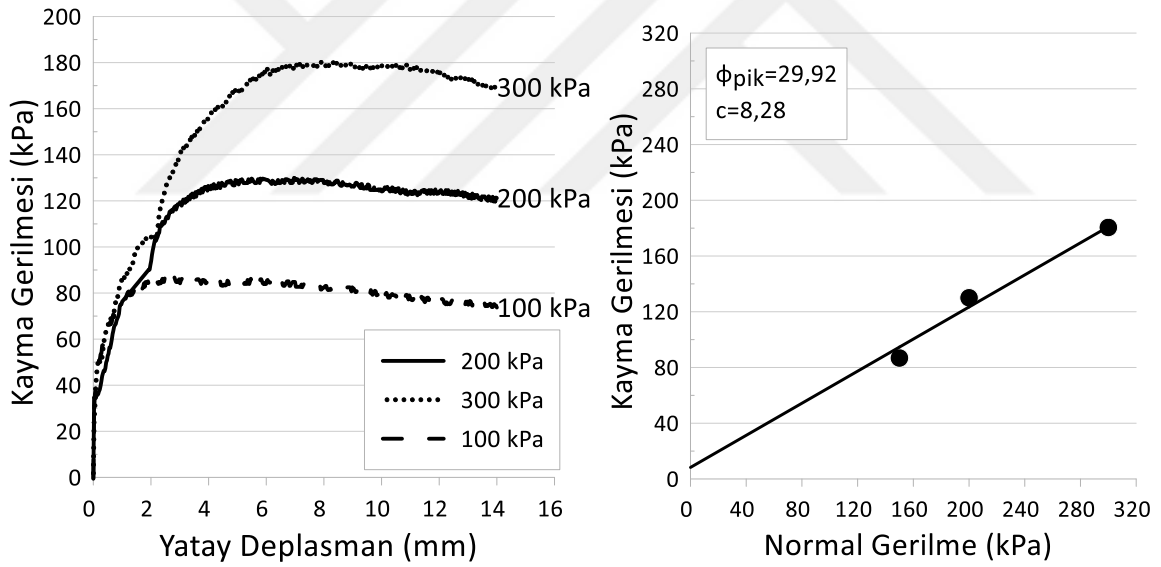


N2 numunesine ait 0,1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

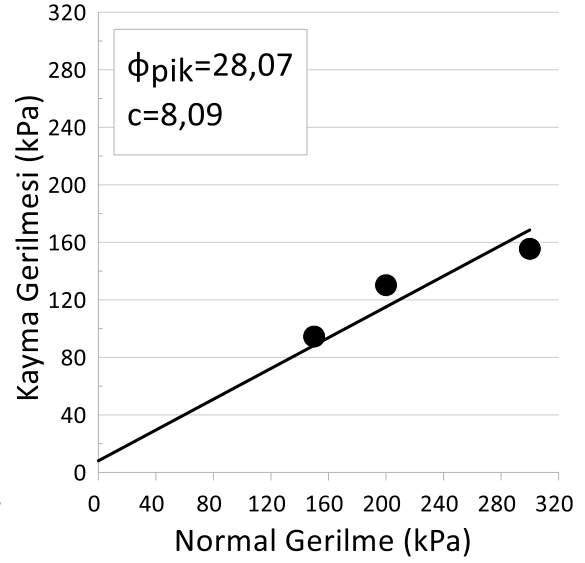
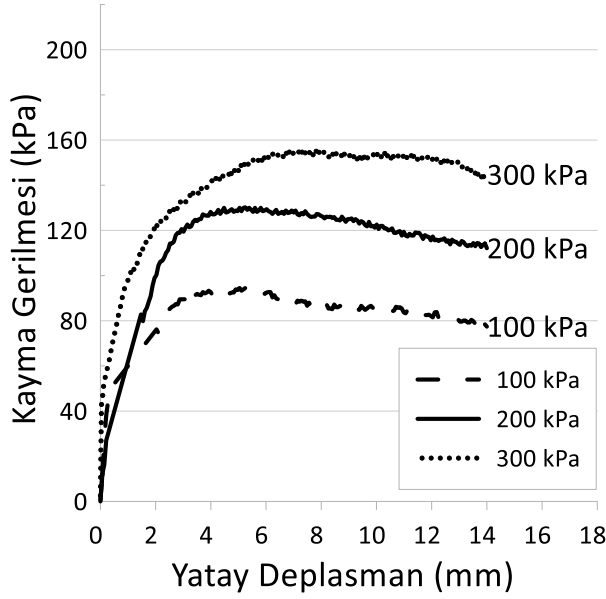
A.1.3. N3 numunesine ait direkt kesme kutusu deneyi sonuçları



N3 numunesine ait 1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

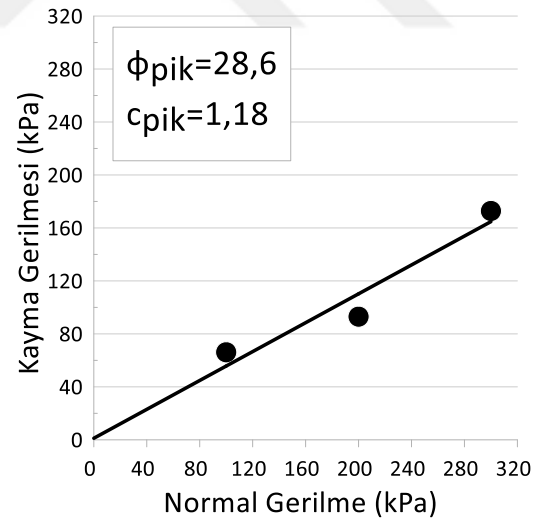
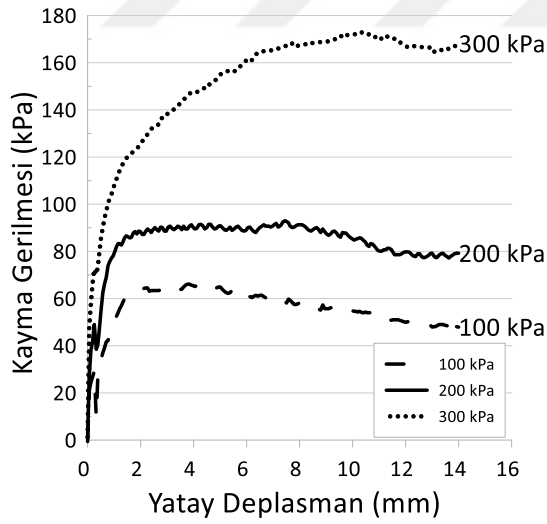


N3 numunesine ait 0,1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

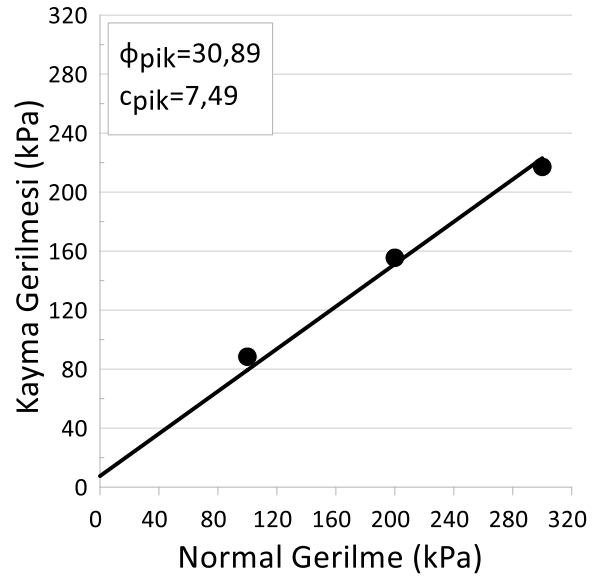
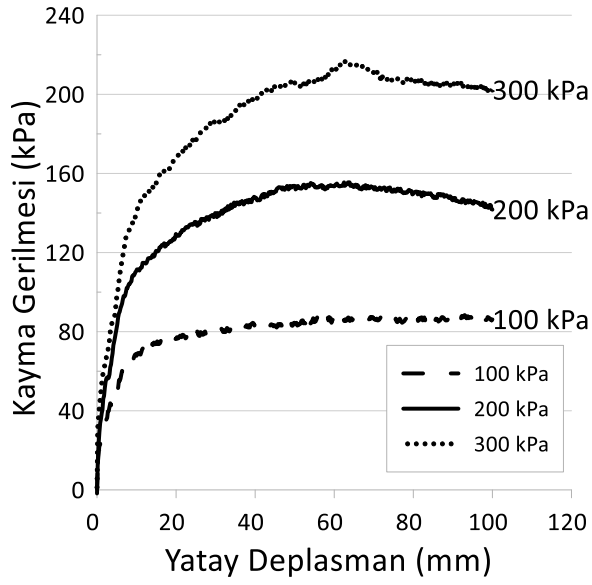


N3 numunesine ait 0,02 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

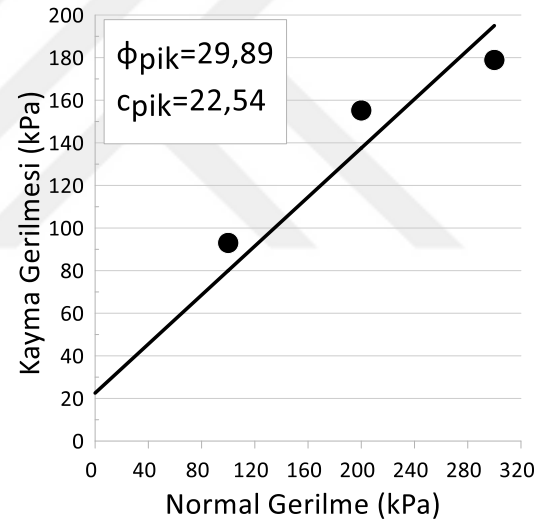
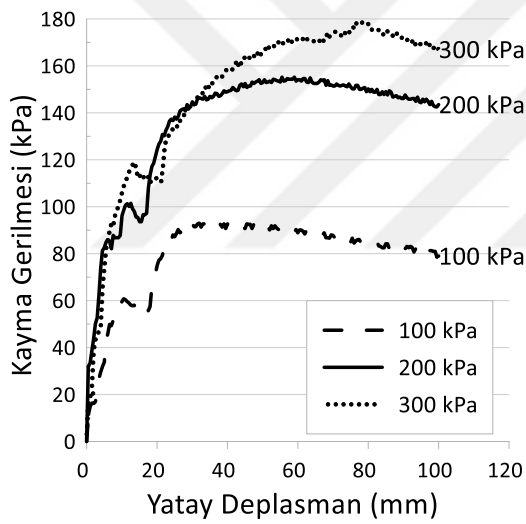
A.1.4 N4 numunesine ait direkt kesme kutusu deneyi sonuçları



N4 numunesine ait 1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları



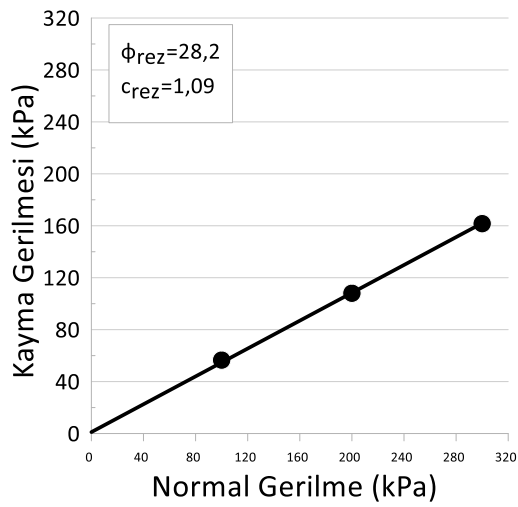
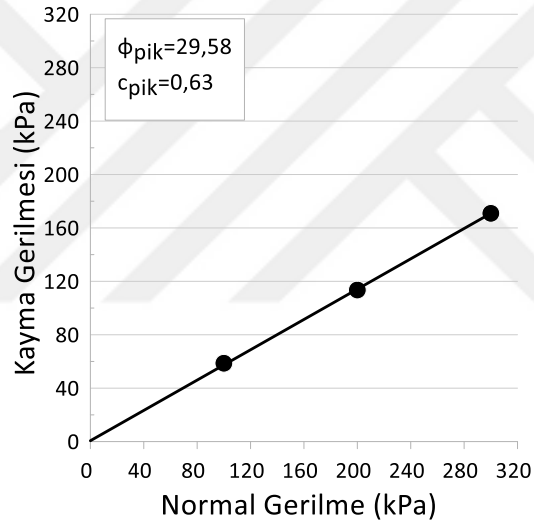
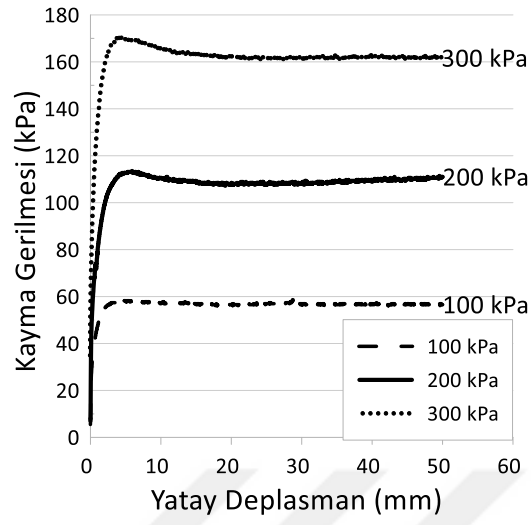
N4 numunesine ait 0,1 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları



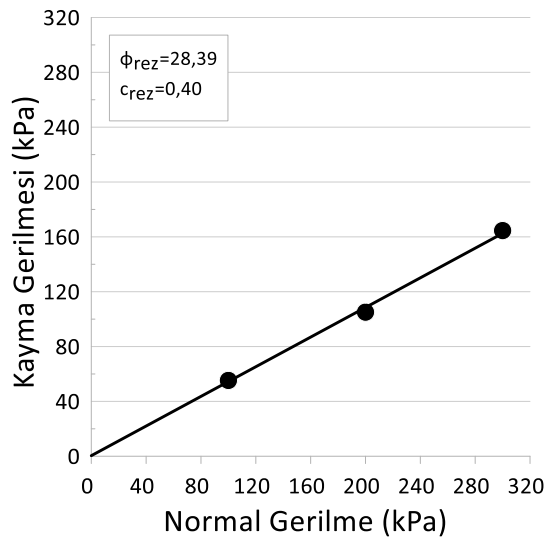
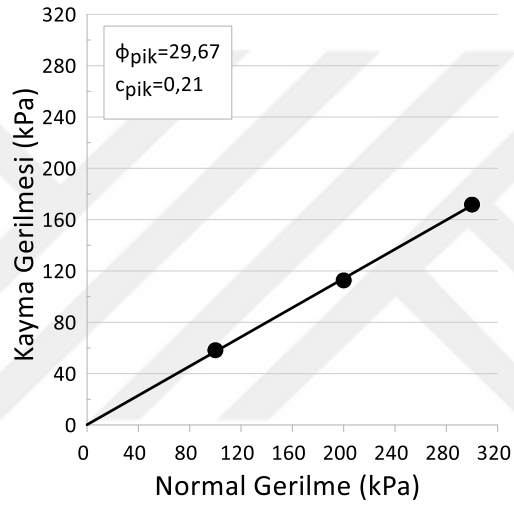
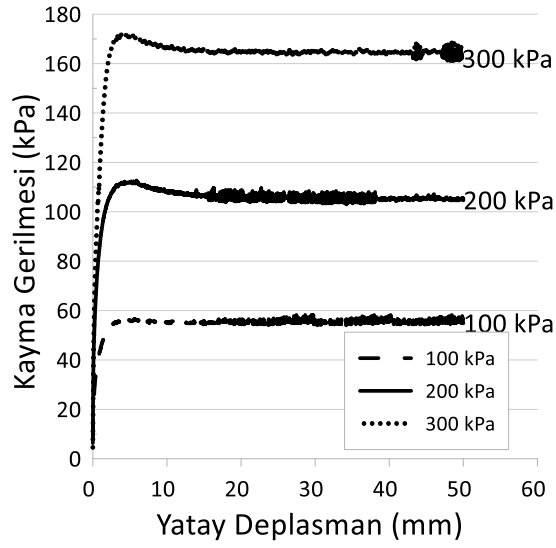
N4 numunesine ait 0,02 mm/dak hızında direkt kesme kutusu deneyi sonuçları

A.2 Halka Kesme Deneyi Sonuçları

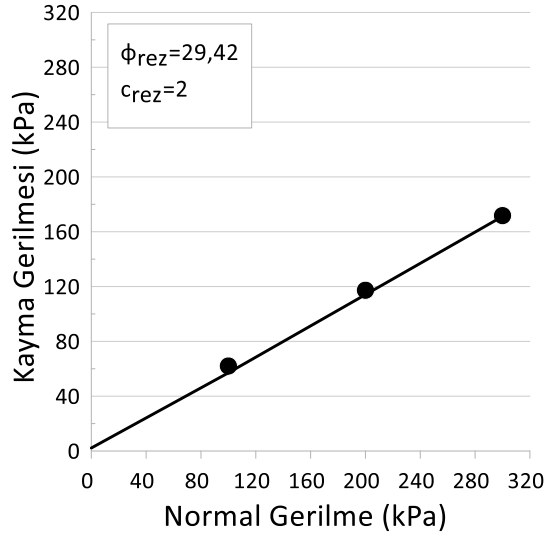
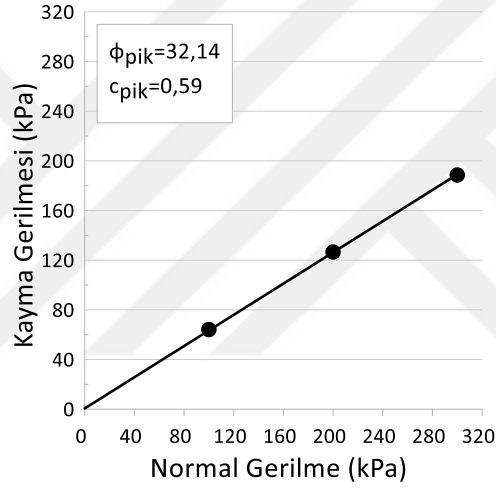
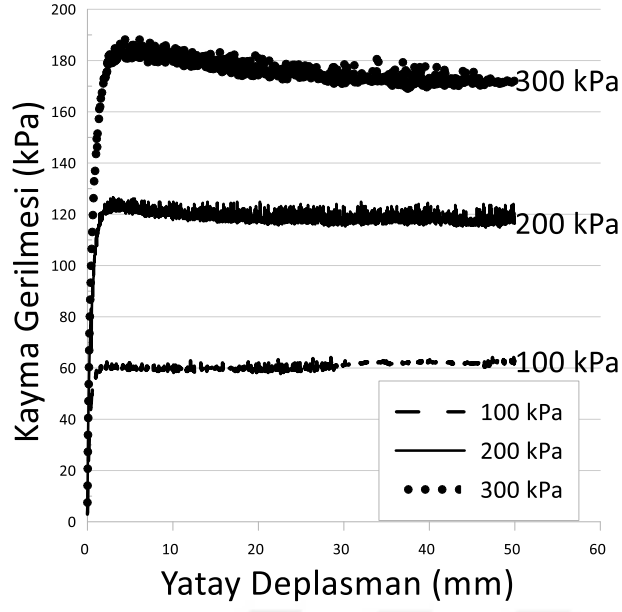
A.2.1 N1 numunesinin halka kesme deneyi sonuçları



N1 numunesine ait 1,35 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

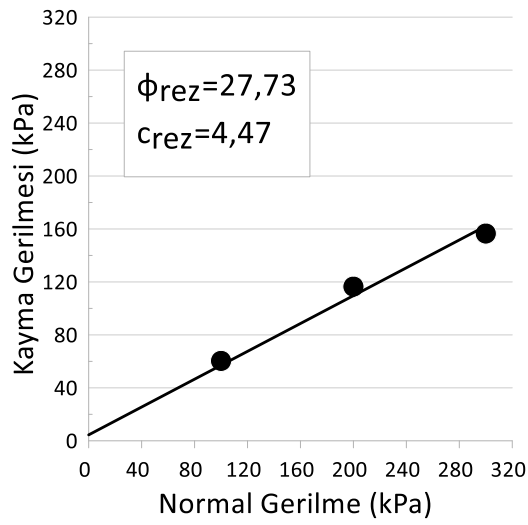
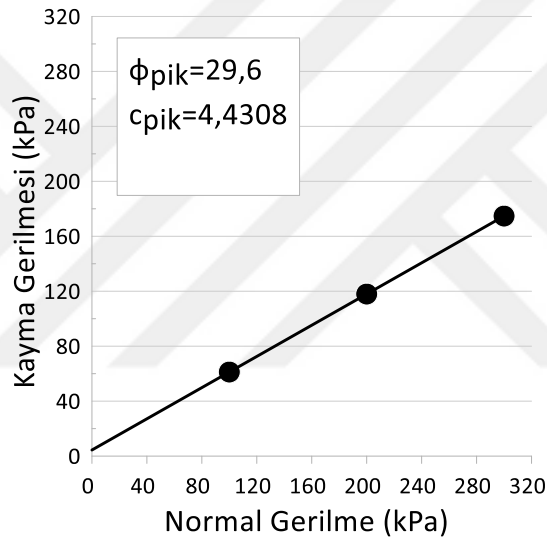
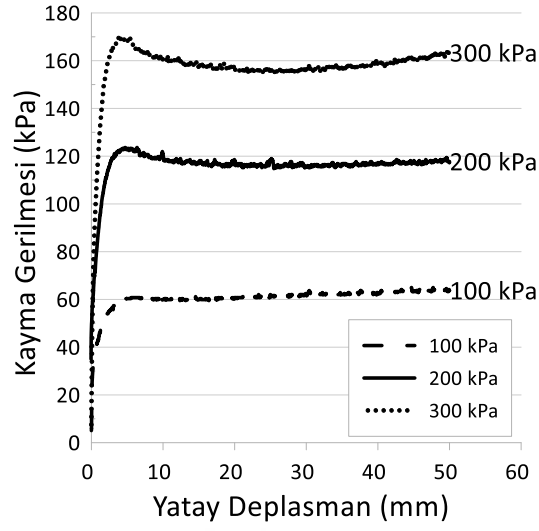


N1 numunesine ait 0,135 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

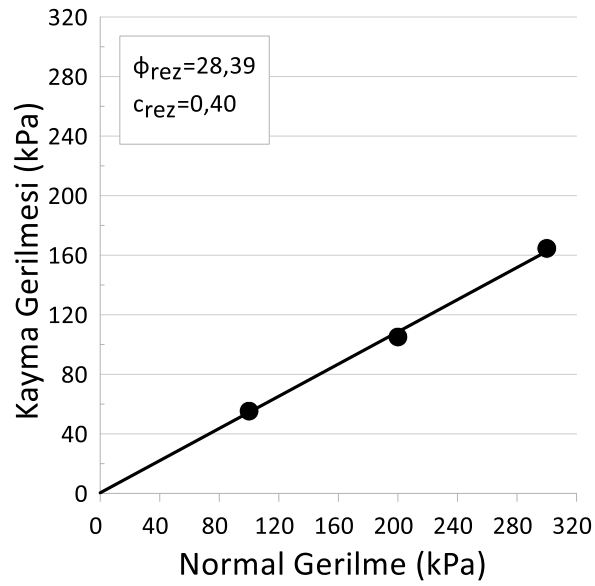
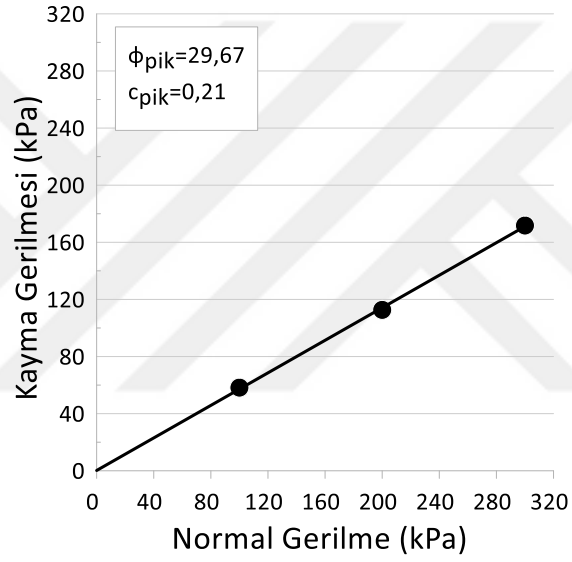
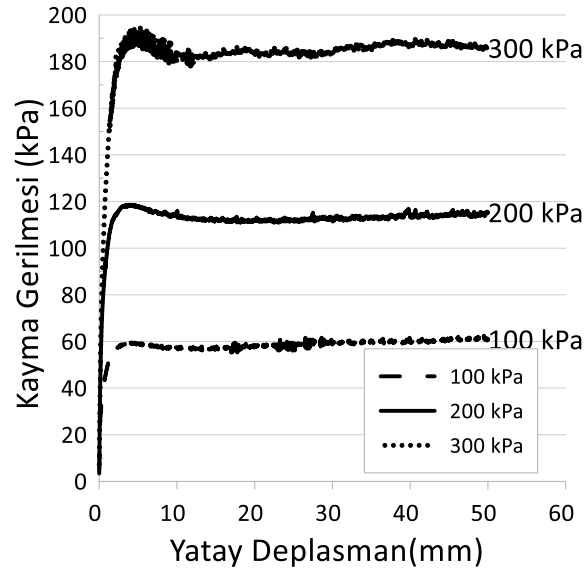


N1 numunesine ait 0,027 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

A.2.2 N2 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları

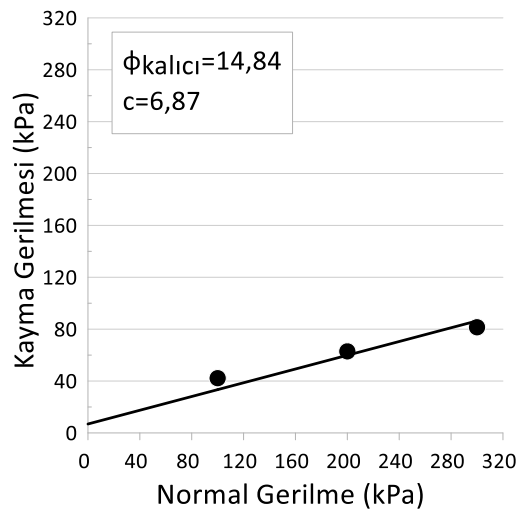
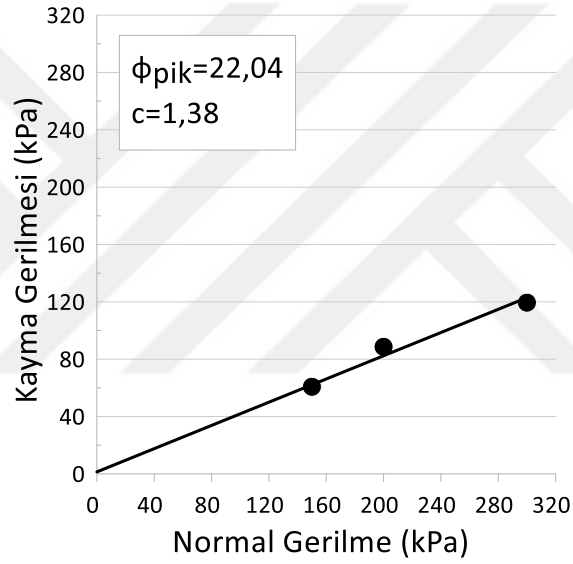
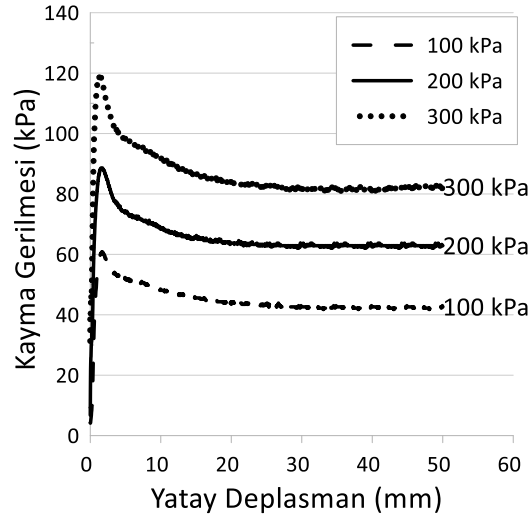


N2 numunesine ait 1,35 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

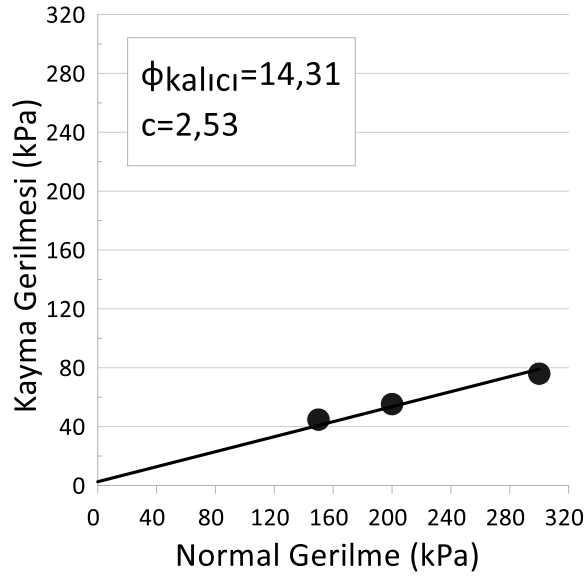
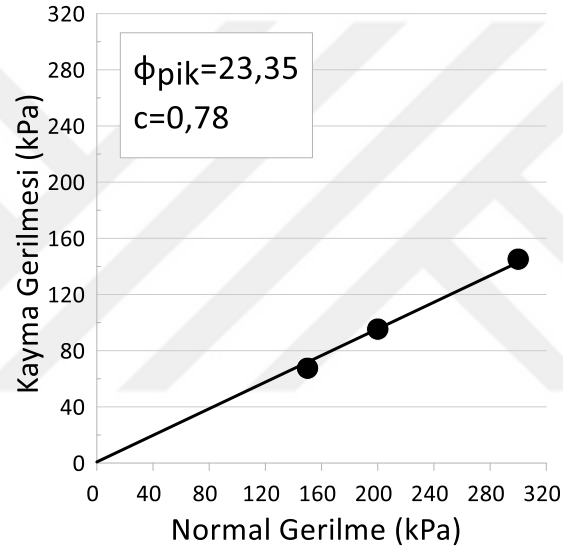
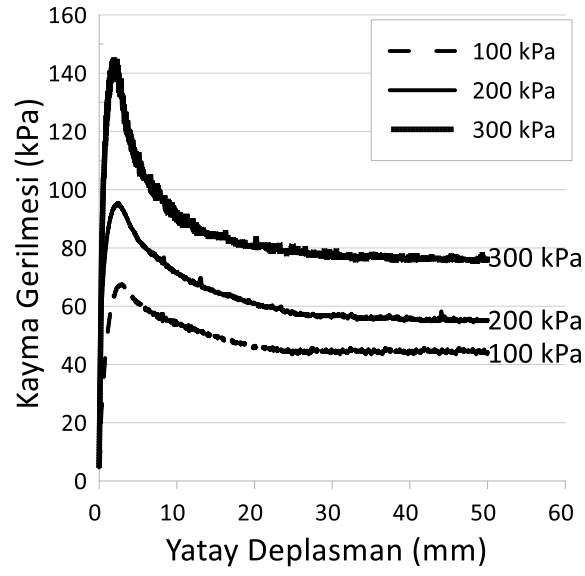


N2 numunesine ait 0,135 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

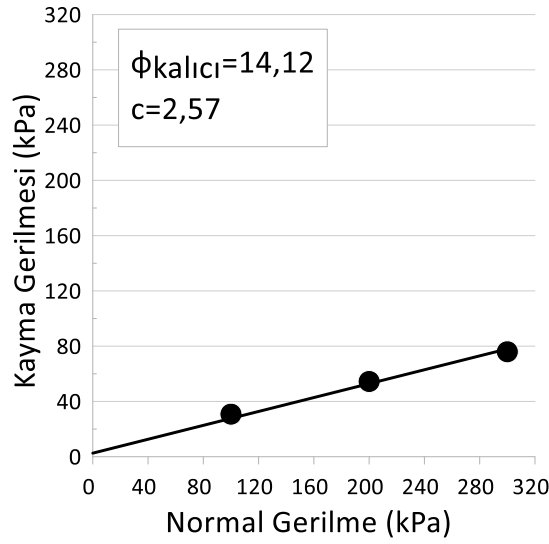
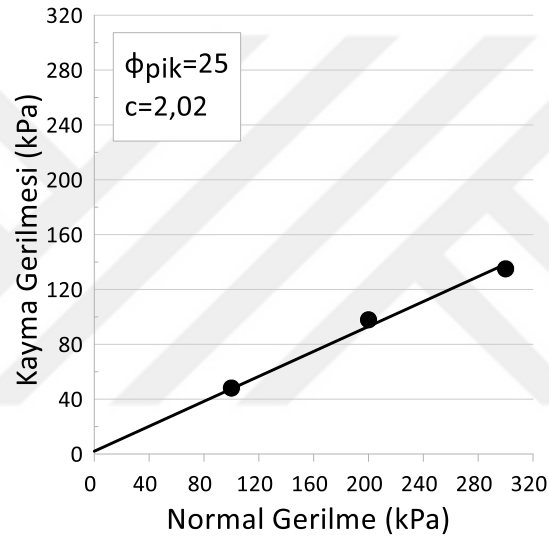
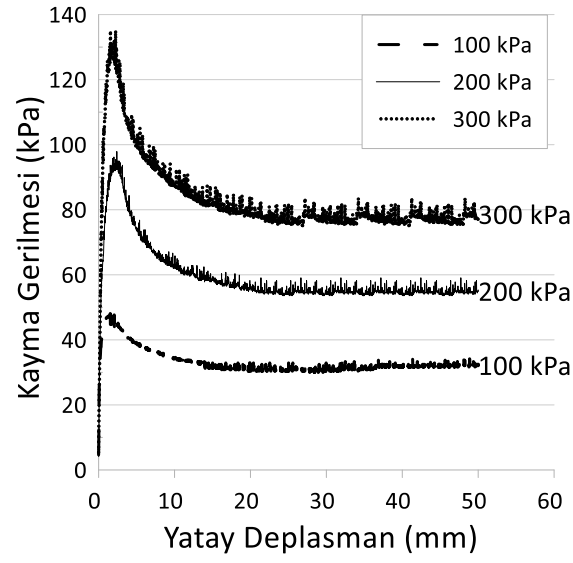
A.2.3 N3 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları



N3 numunesine ait 1,35 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

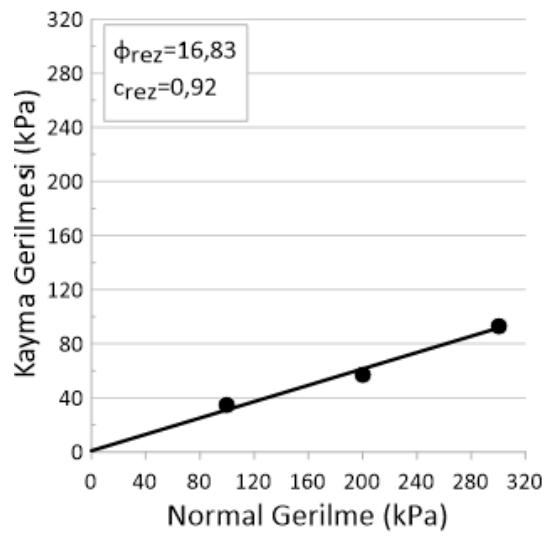
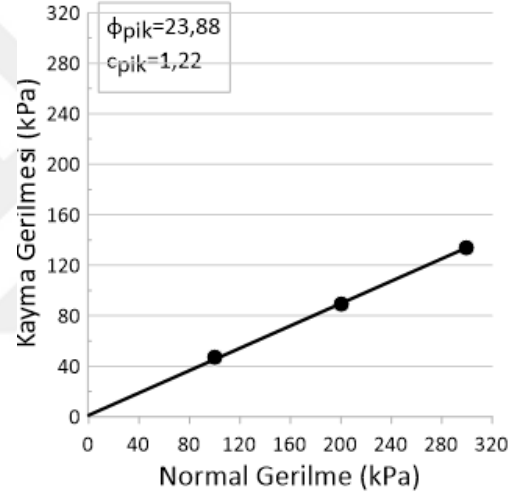
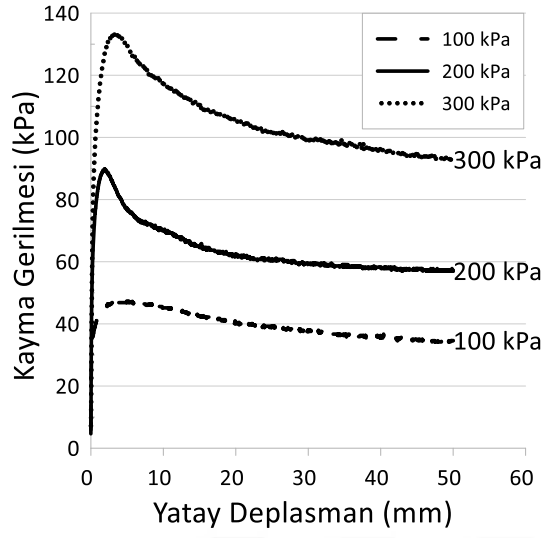


N3 numunesine ait 0,135 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

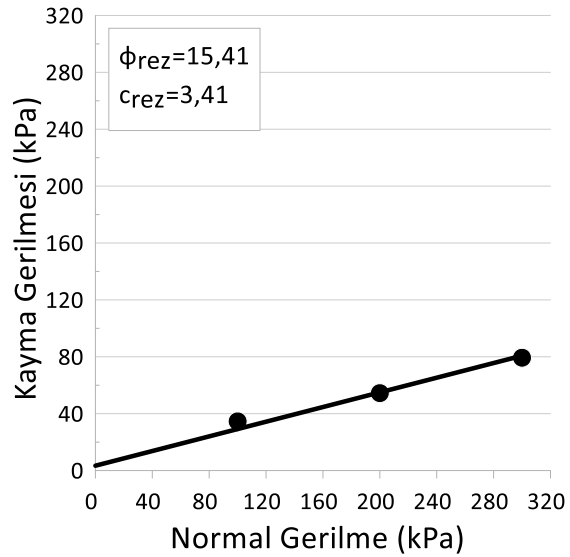
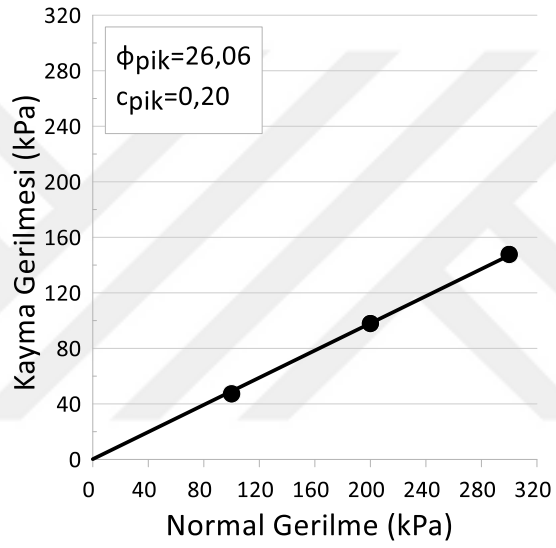
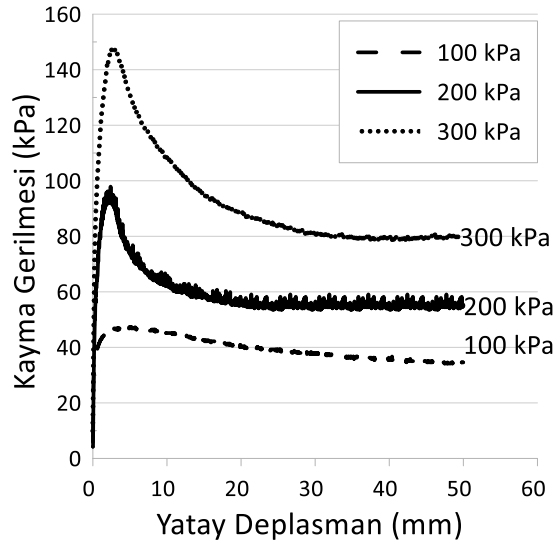


N3 numunesine ait 0,027 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

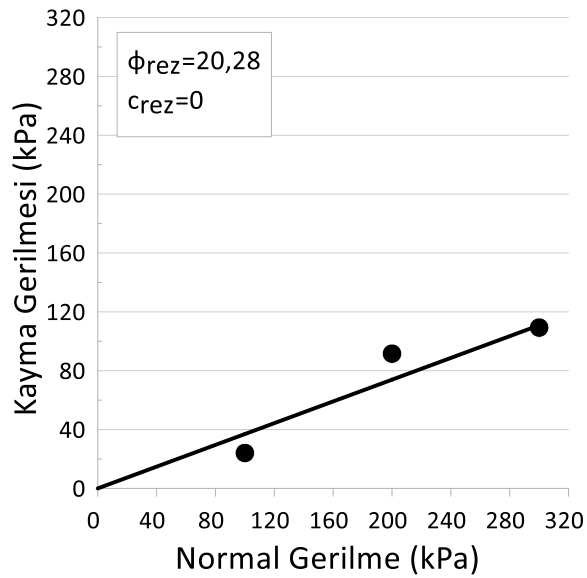
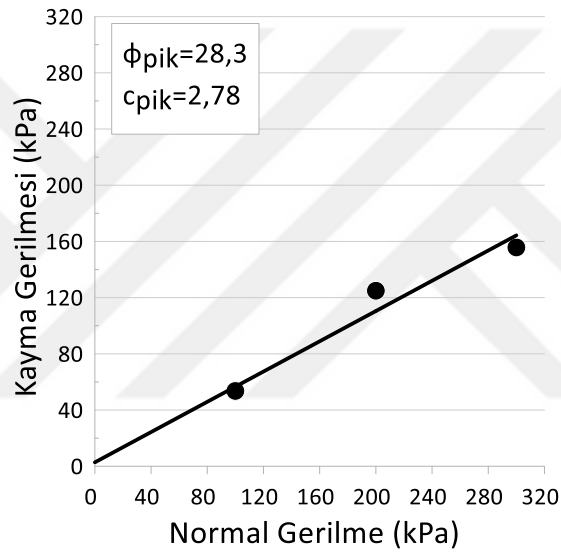
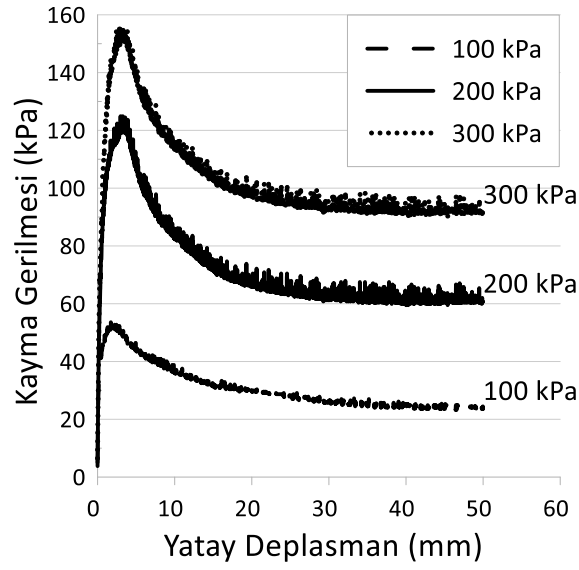
A.2.4. N4 numunesine ait halka kesme deneyi sonuçları



N4 numunesine ait 1,35 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları



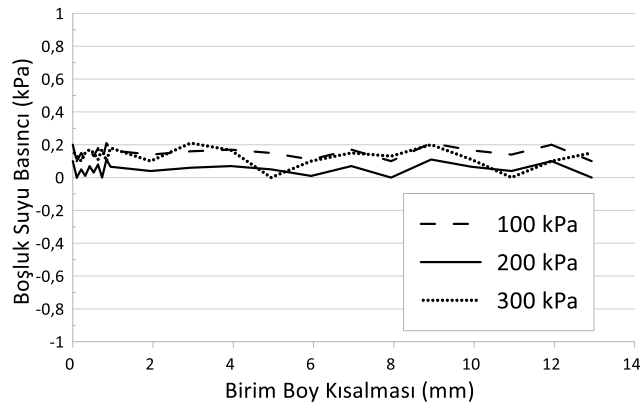
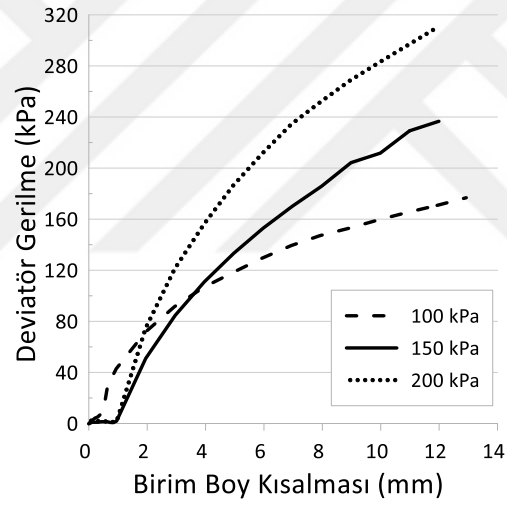
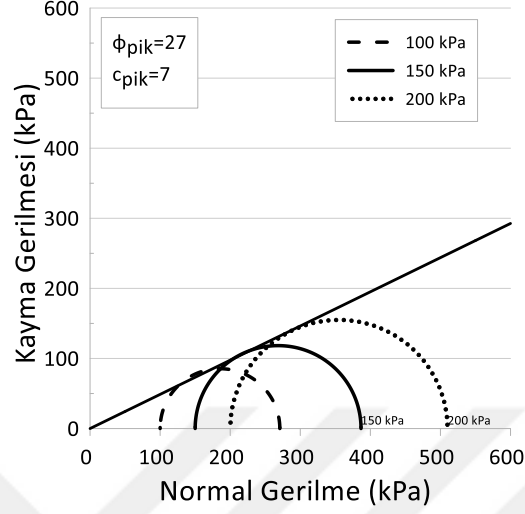
N4 numunesine ait 0,135 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları



N4 numunesine ait 0,027 der/dak hızında halka kesme deneyi sonuçları

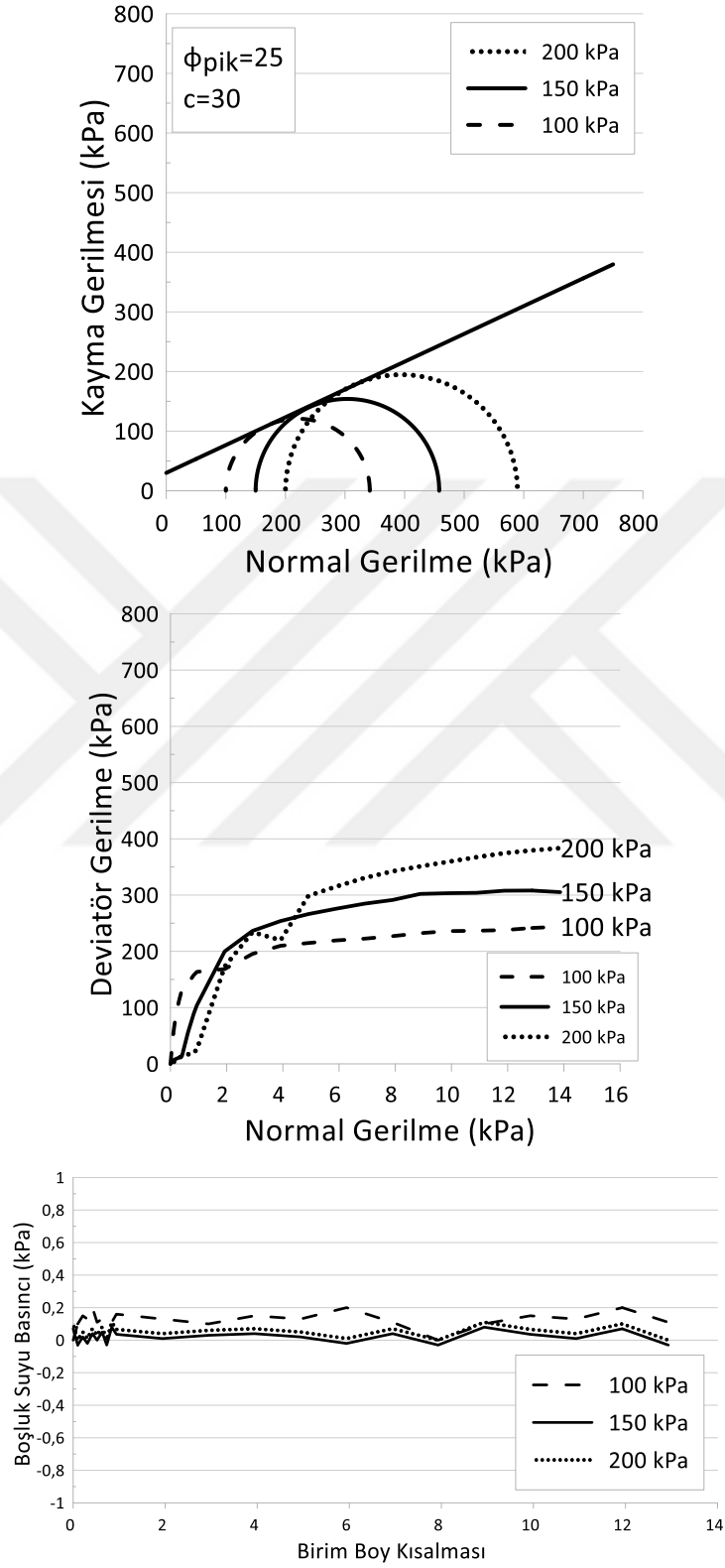
A.3 Konsolidasyonlu-Drenajlı Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

A.3.1 N1 numunesine ait konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları



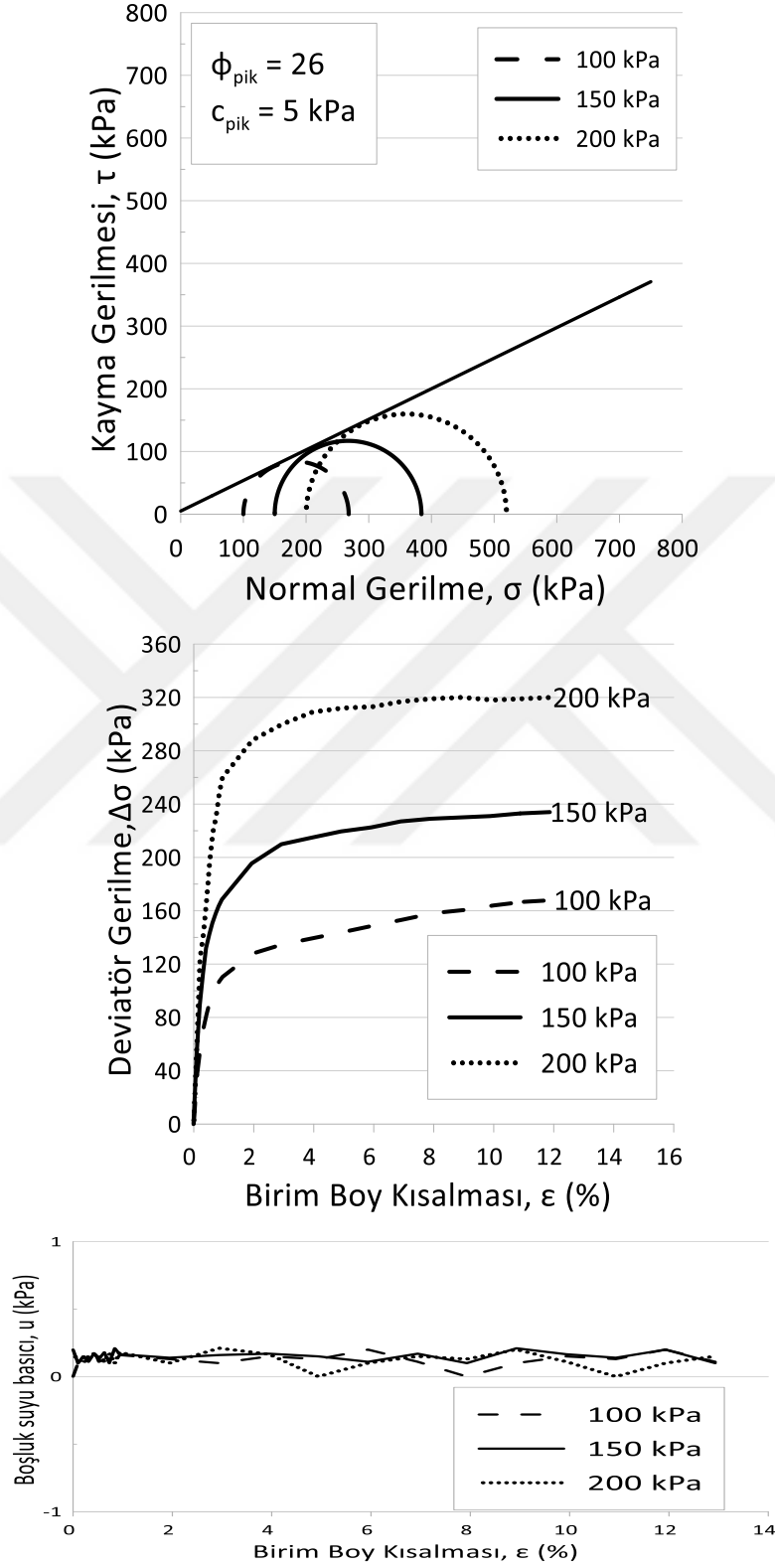
N1 numunesine ait 0,005 mm/dak hızında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları

A.3.2. N3 numunesine ait konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları



N3 numunesine ait 0,005 mm/dak hızında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları

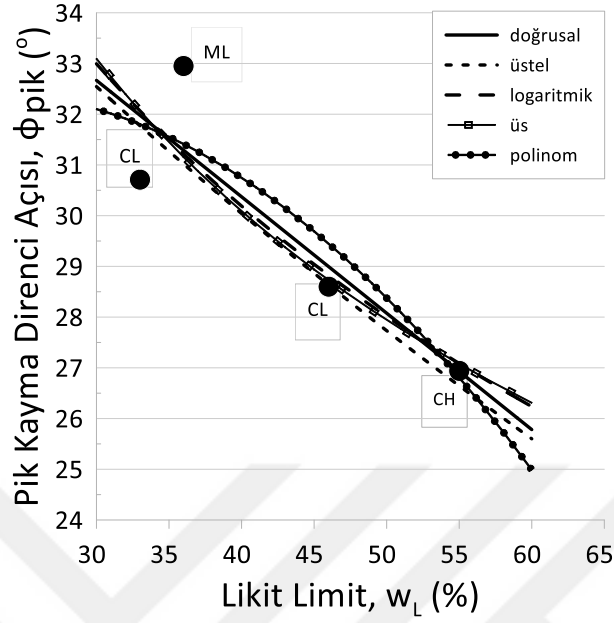
A.3.3. N4 numunesine ait konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları



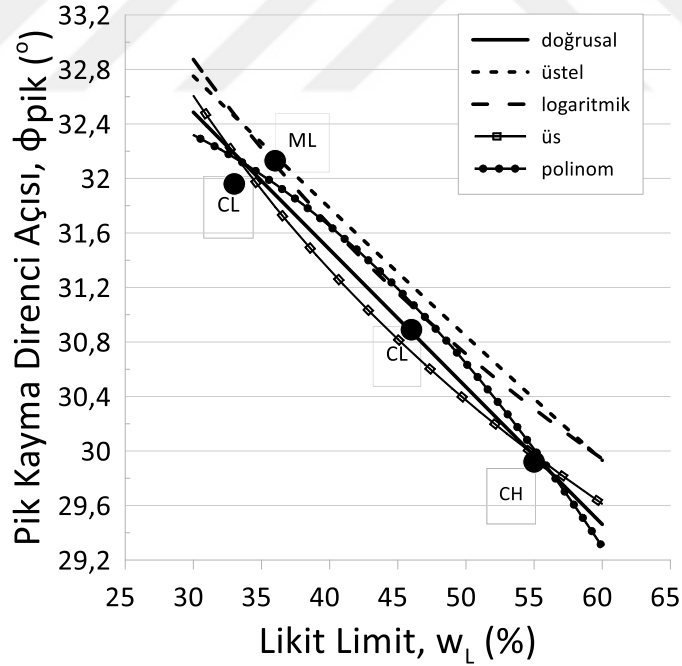
N4 numunesine ait 0,005 mm/dak hızında konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi sonuçları

EK B

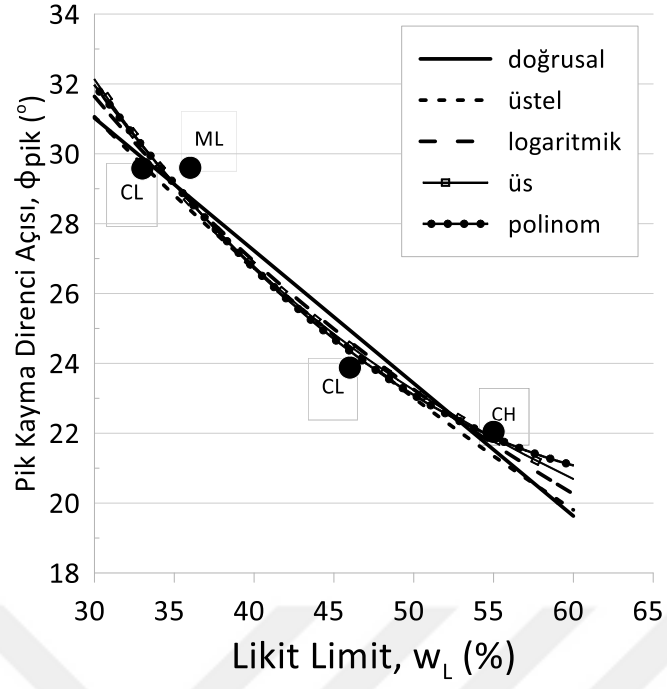
B.1. Likit Limitin Pik Kayma Direncine Etkisi



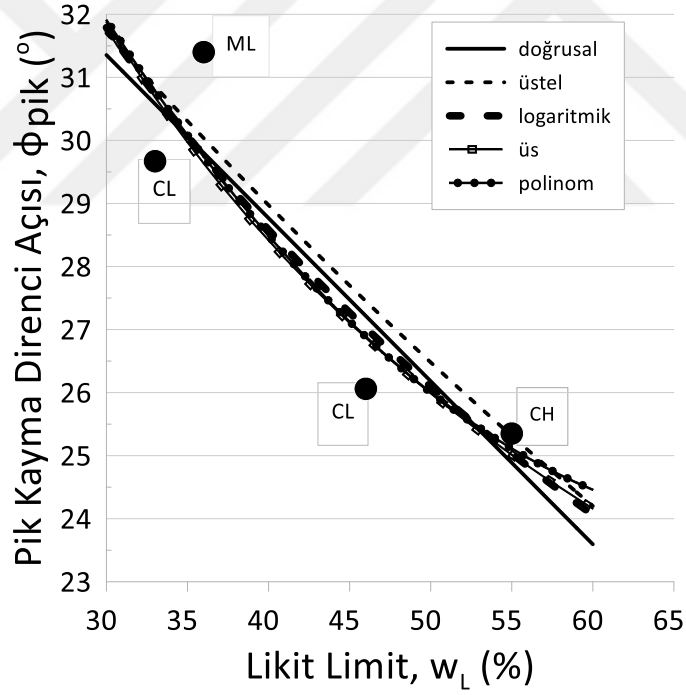
Direkt kesme kutusu deneyinde 1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının likit limit ile değişimi



Direkt kesme kutusu deneyinde 0,1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

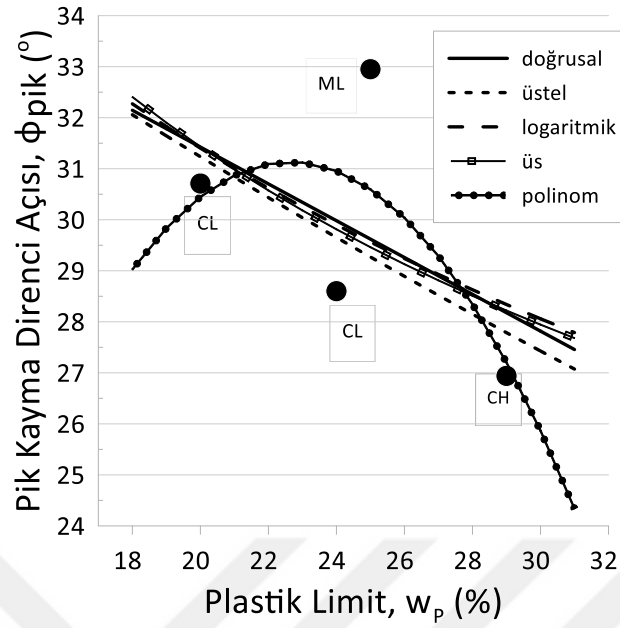


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda pik kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

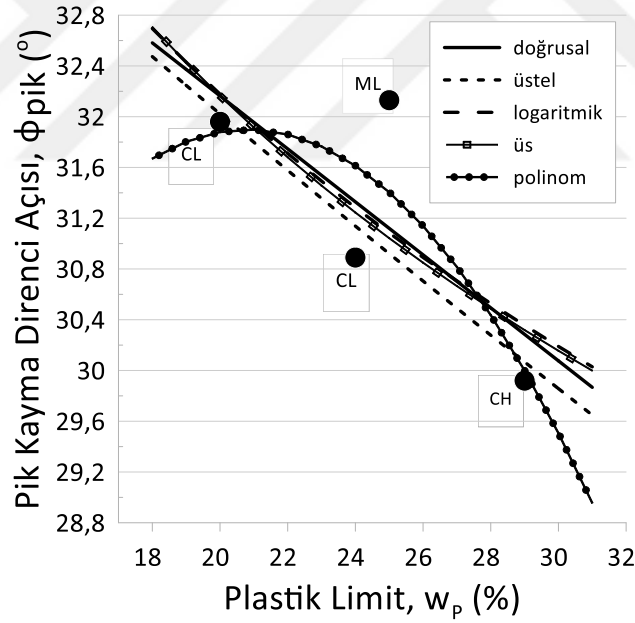


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda pik kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

B.2. Plastik Limitin Pik Kayma Direncine Etkisi

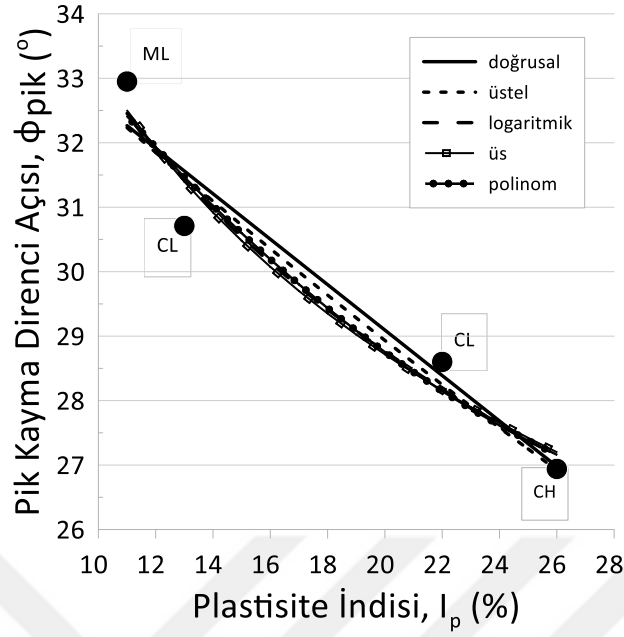


Direkt kesme kutusu deneyinde 1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi

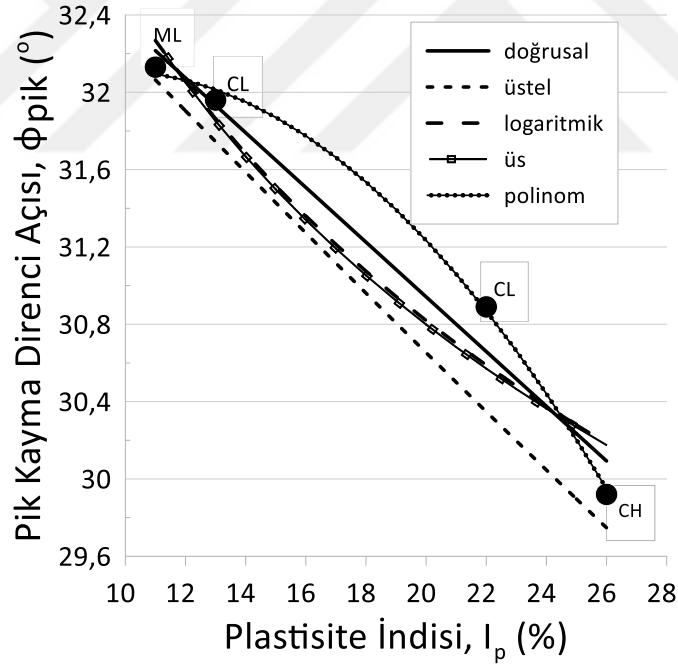


Direkt kesme kutusu deneyinde 0,1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi

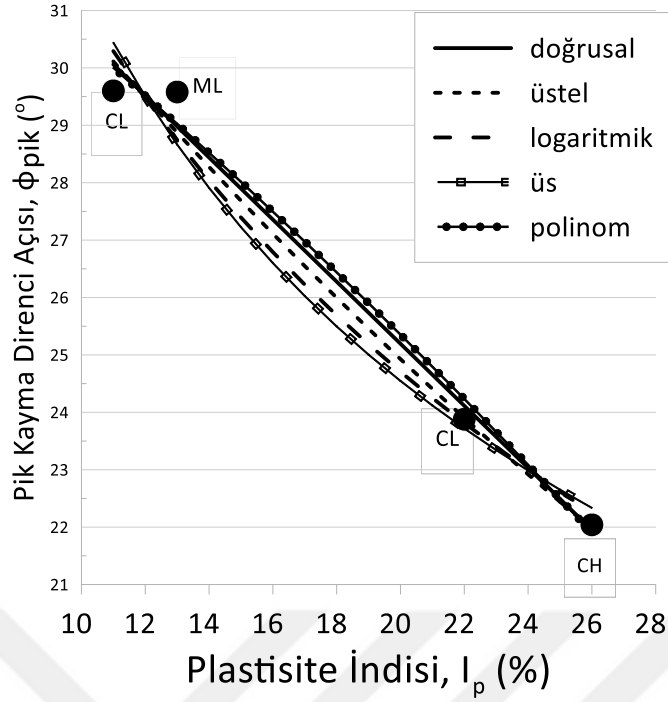
B.3. Plastisite İndisinin Pik Kayma Direncine Etkisi



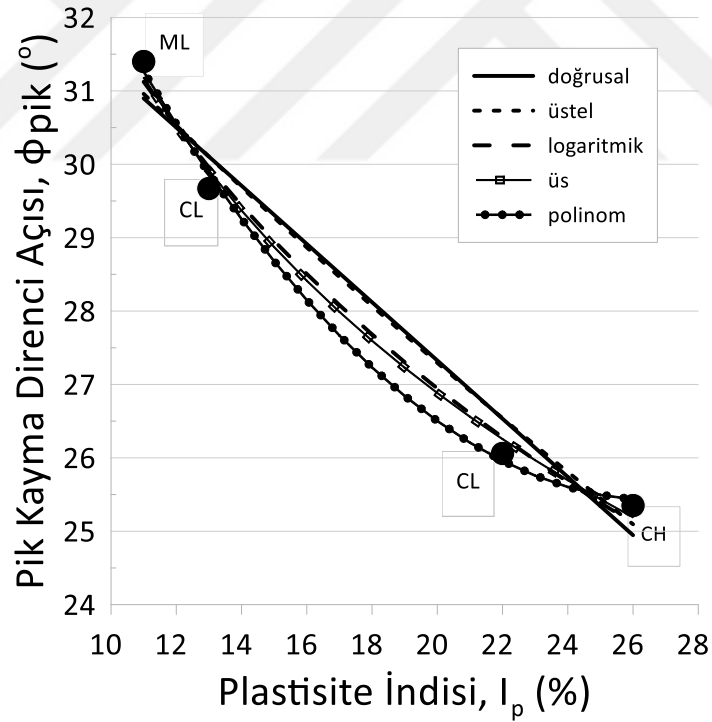
Direkt kesme kutusu deneyinde 1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi



Direkt kesme kutusu deneyinde 0,1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

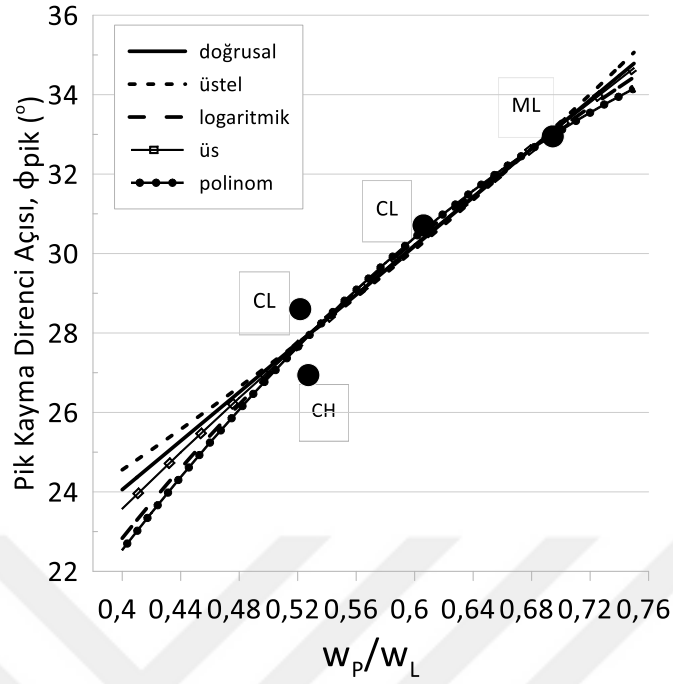


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda pik kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

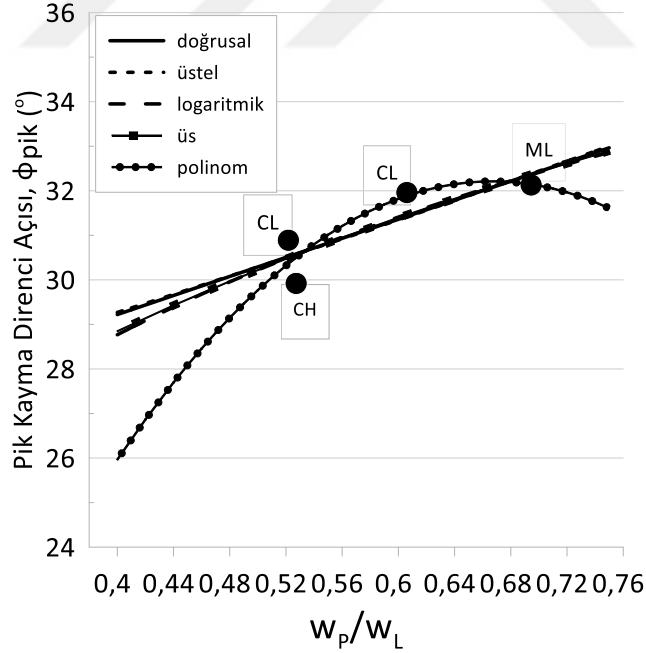


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda pik kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

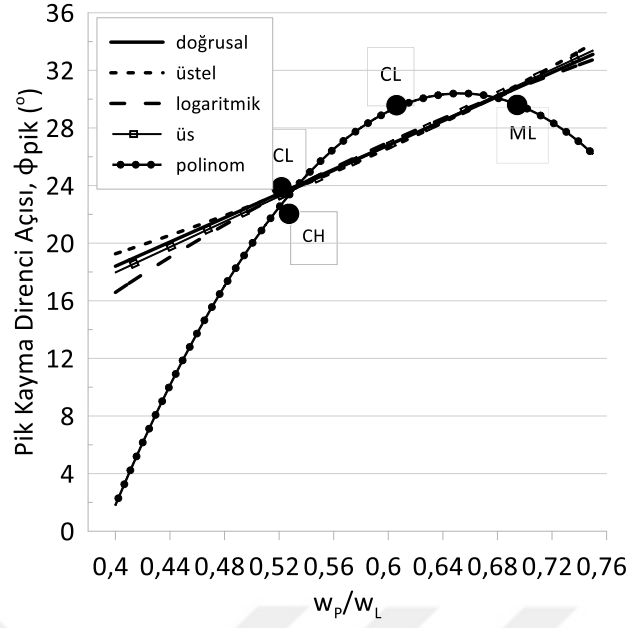
B.4. Plastik Limitin Likit Limite Oranının Pik Kayma Direncine Etkisi



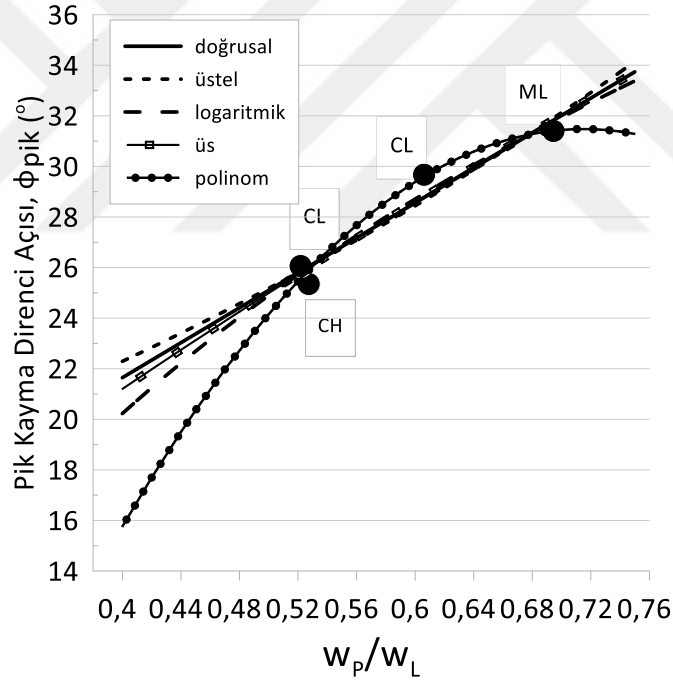
Direkt kesme kutusu deneyinde 1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi



Direkt kesme kutusu deneyinde 0,1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi

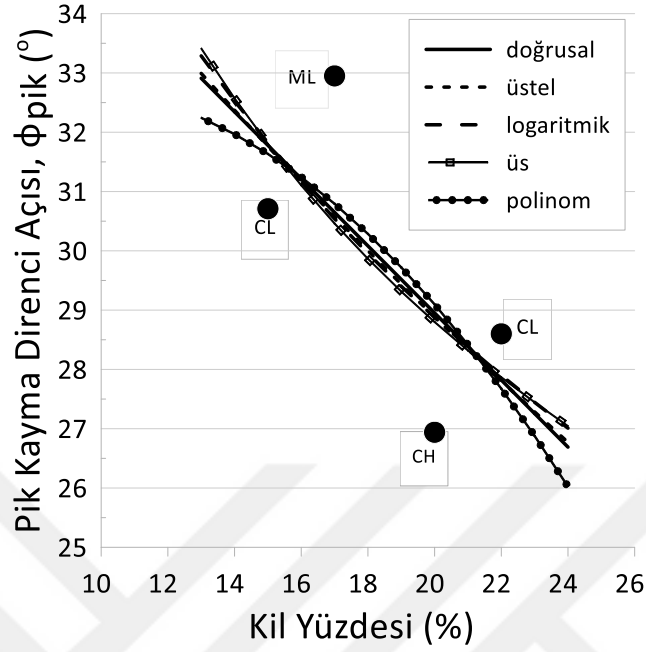


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi

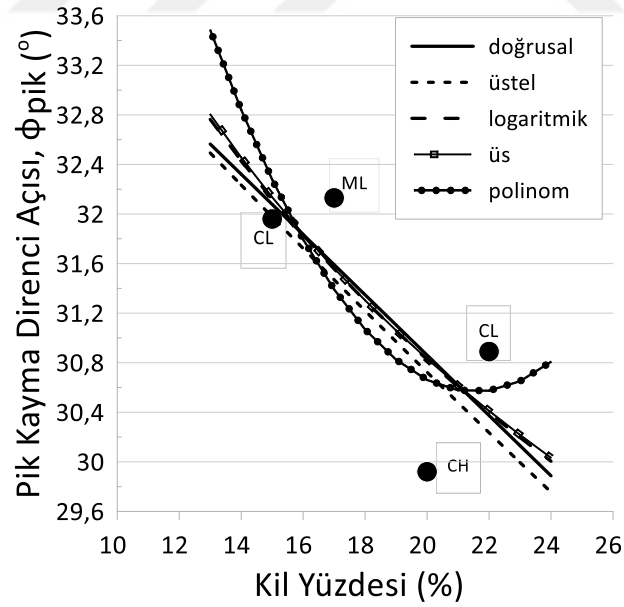


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda pik kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi

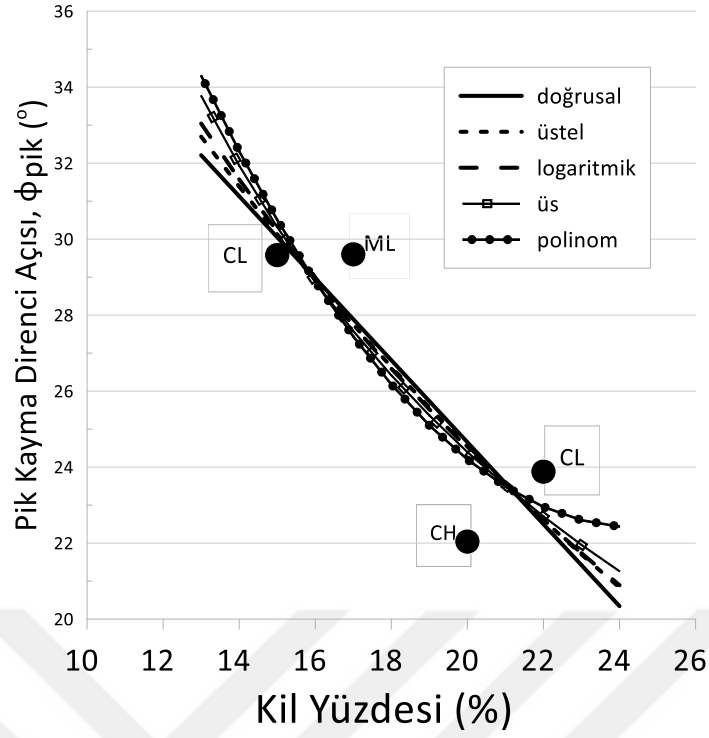
B.5 Kil Yüzdesinin Pik Kayma Direncine Etkisi



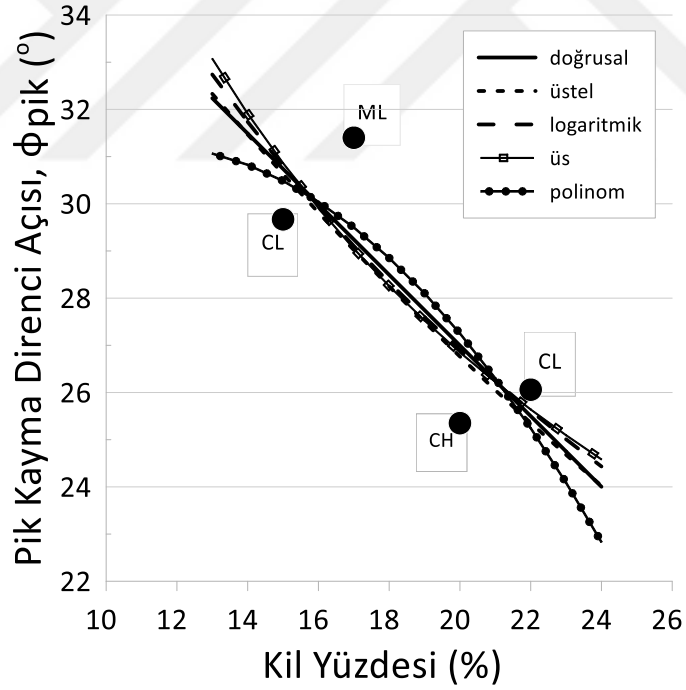
Direkt kesme kutusu deneyinde 1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi



Direkt kesme kutusu deneyinde 0,1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

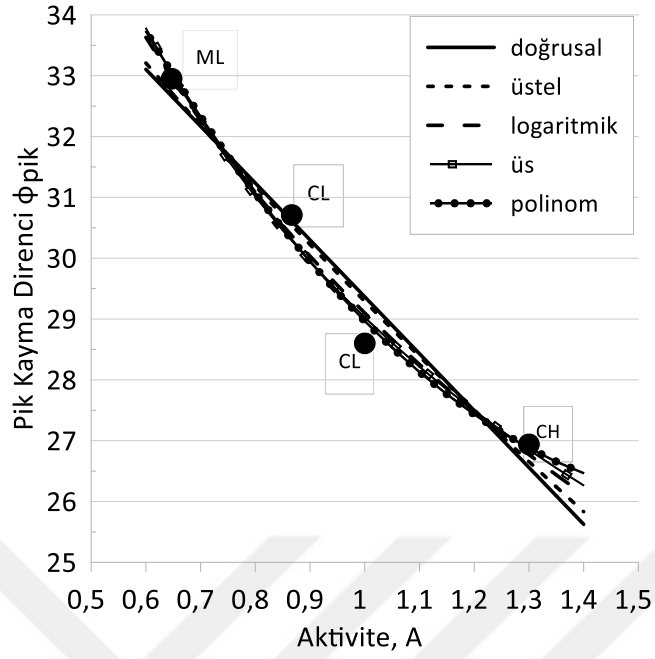


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

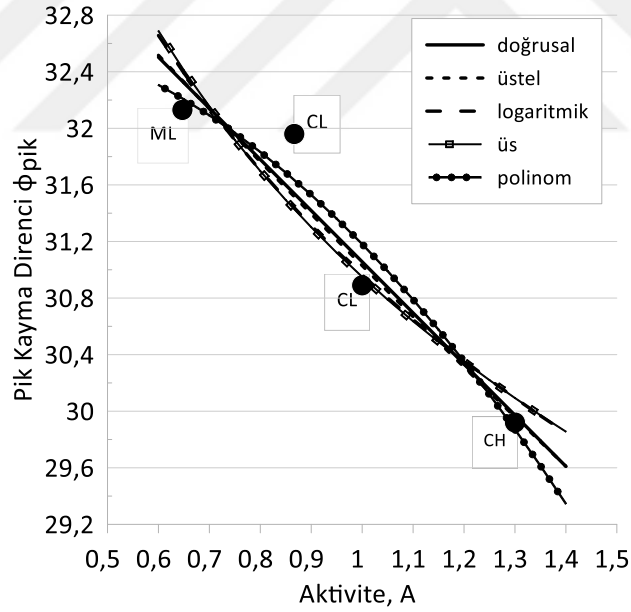


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda pik kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

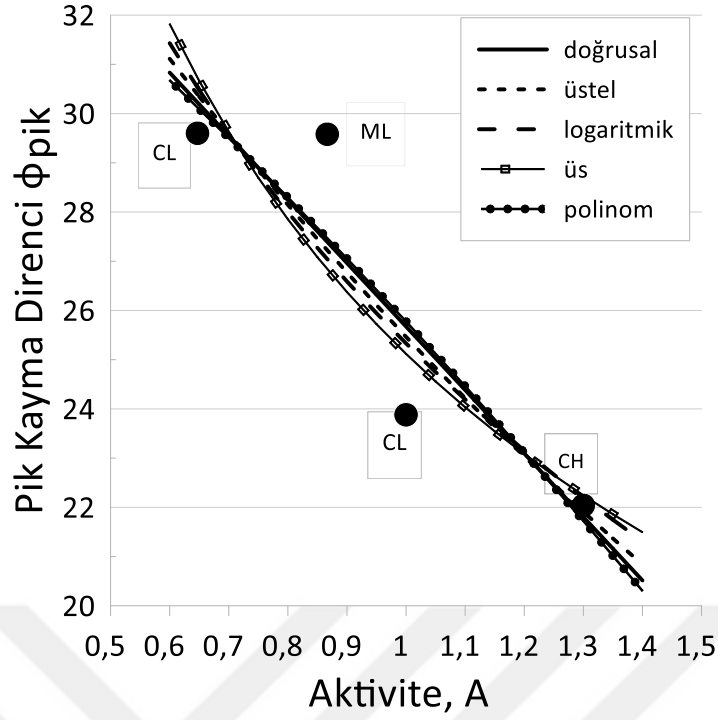
B.6. Aktivite Değerinin Pik Kayma Direncine Etkisi



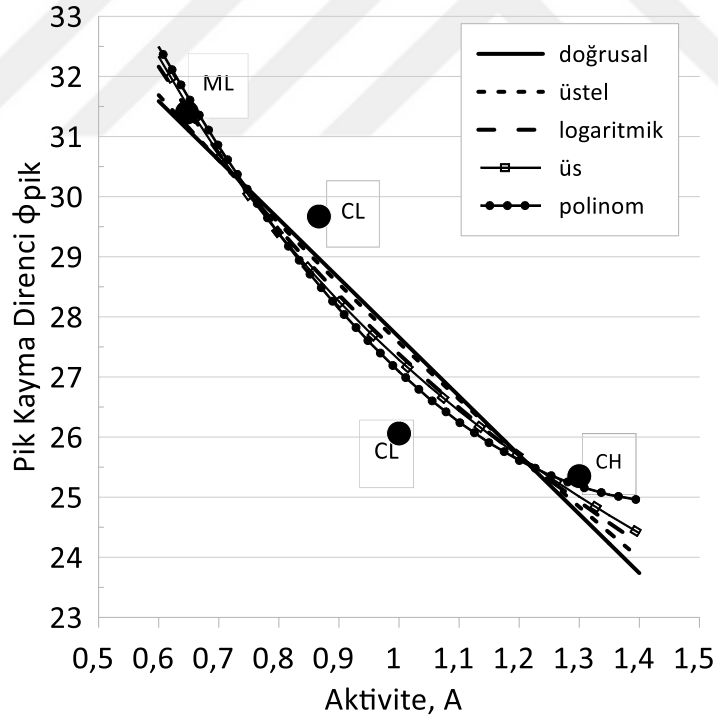
Direkt kesme kutusu deneyinde 1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişimi



Direkt kesme kutusu deneyinde 0,1 mm/dak hızda pik kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişimi

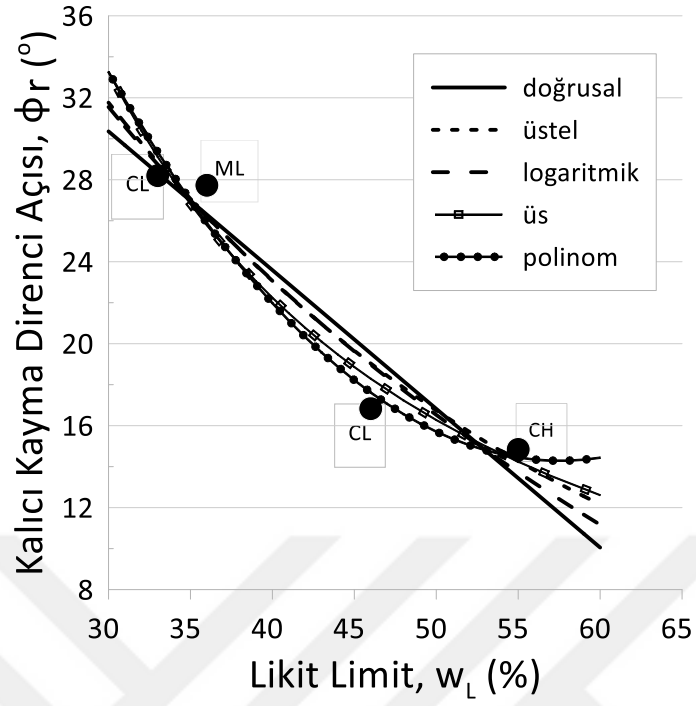


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda pik kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişimi

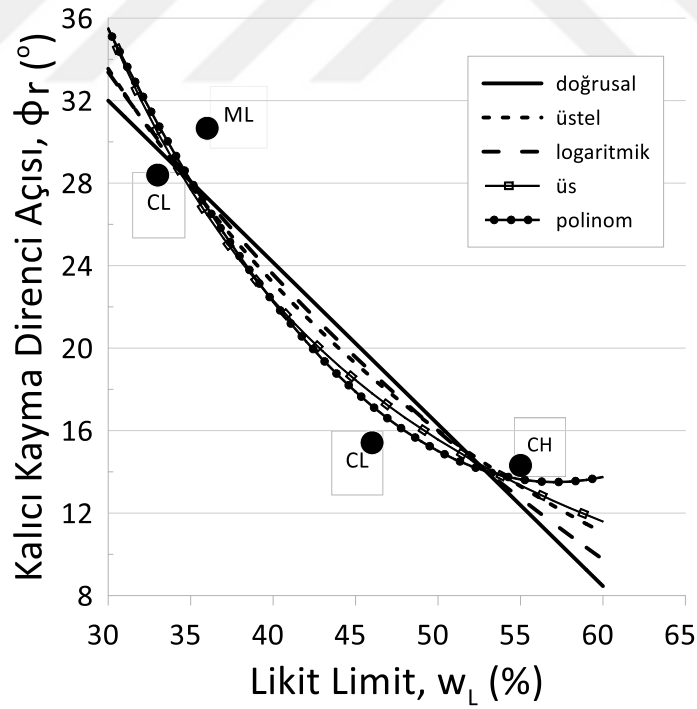


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda pik kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişim

B.7. Likit Limitin Kalıcı Kayma Direncine Etkisi

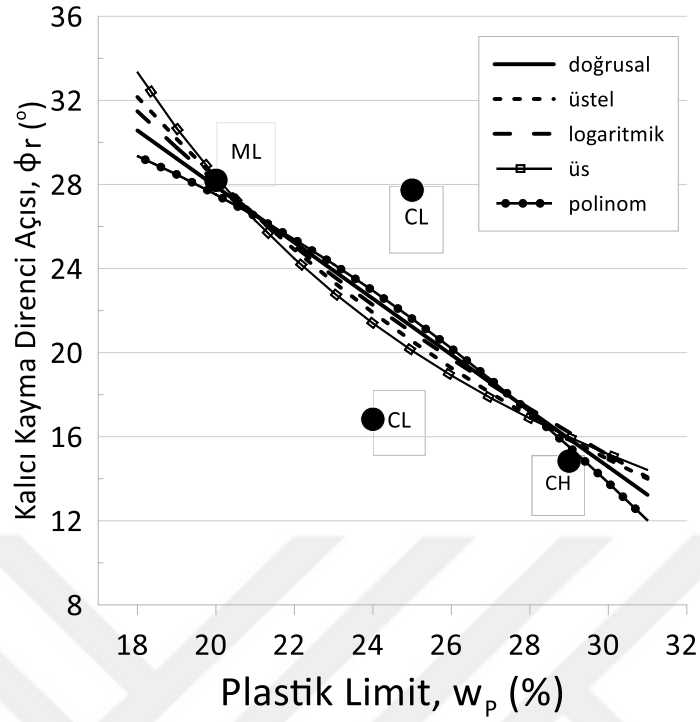


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

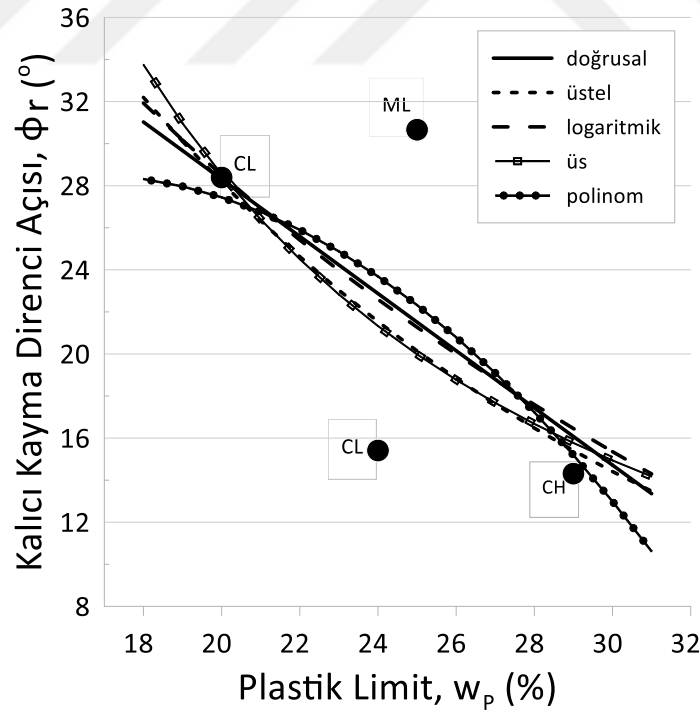


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının likit limit ile değişimi

B.8. Plastik Limitin Kalıcı Kayma Direncine Etkisi

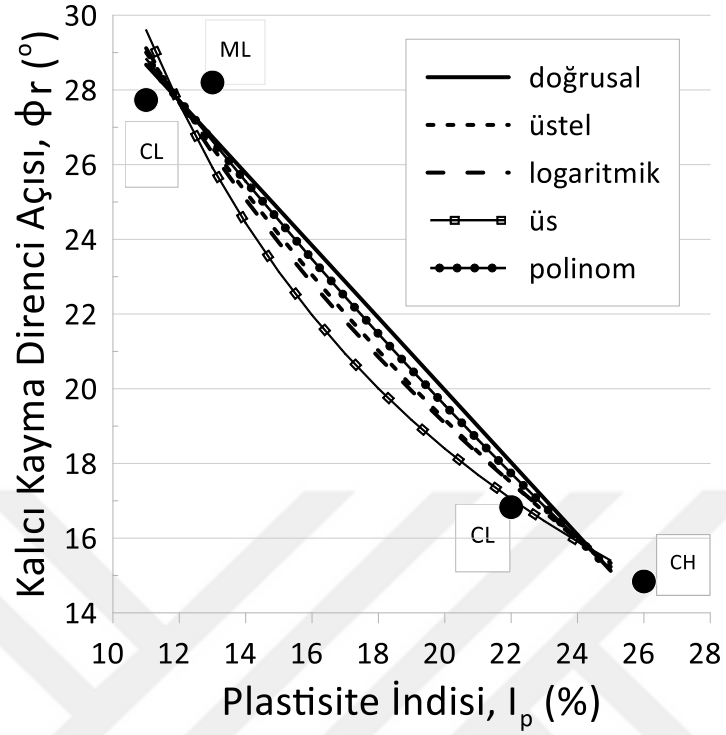


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi

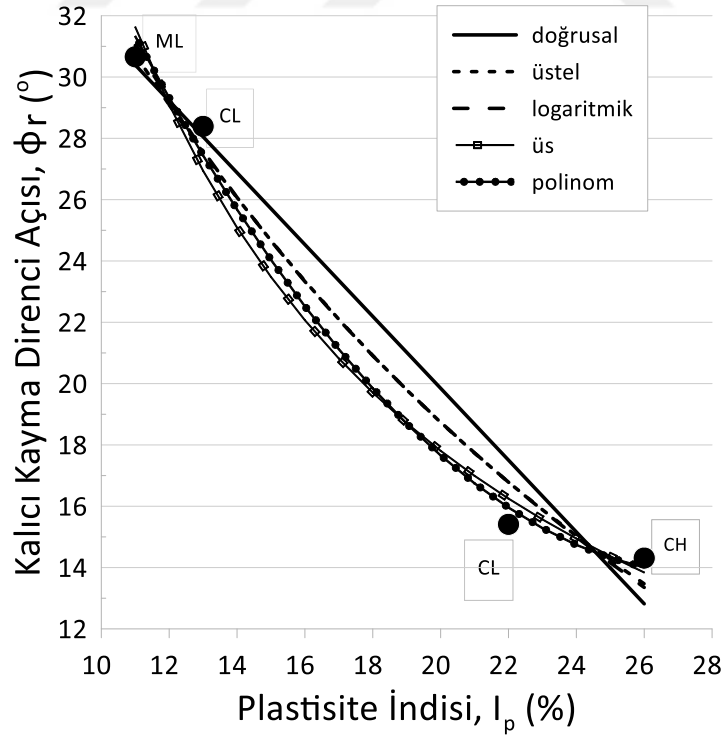


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının plastik limit ile değişimi

B.9. Plastisite İndisinin Kalıcı Kayma Direncine Etkisi

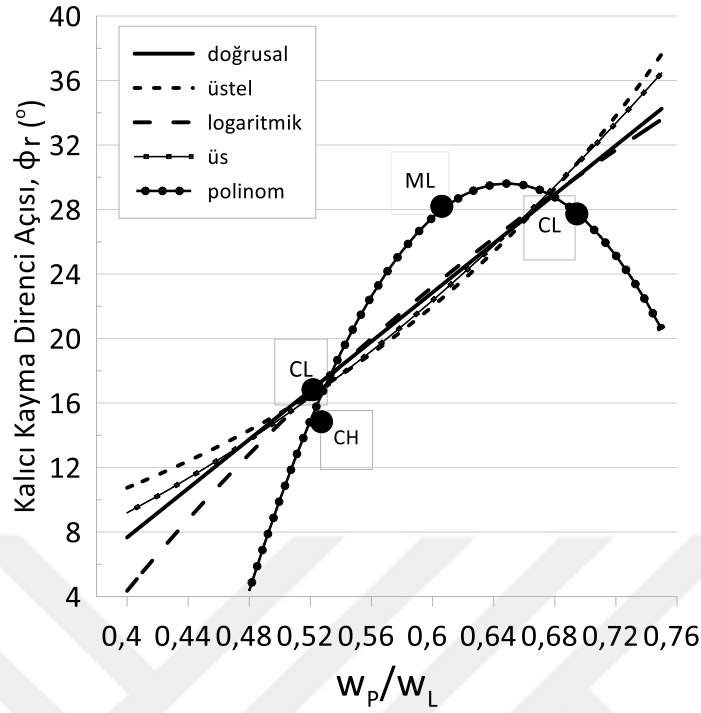


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

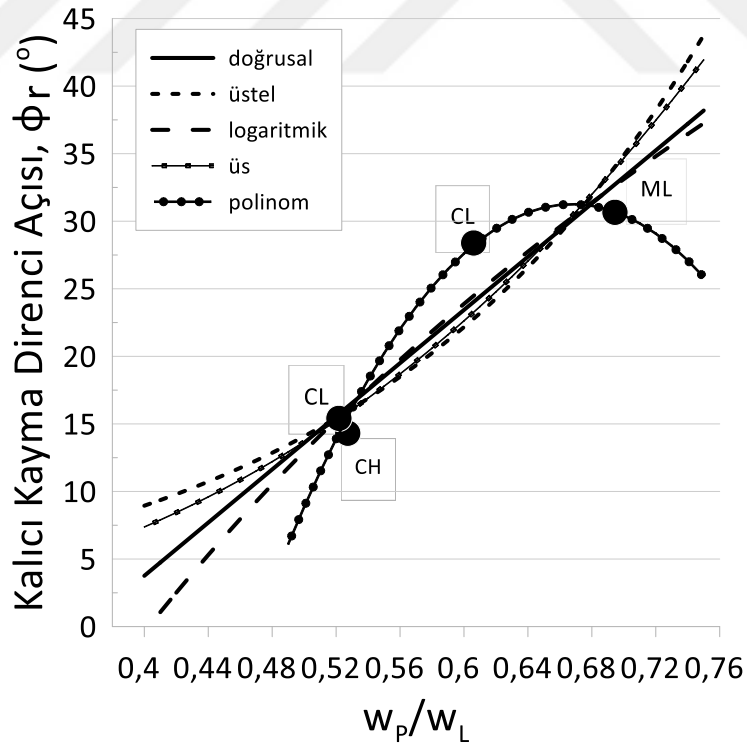


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının plastisite indisi ile değişimi

B.10. Plastik Limitin Likit Limite Oranının Kalıcı Kayma Direncine Etkisi

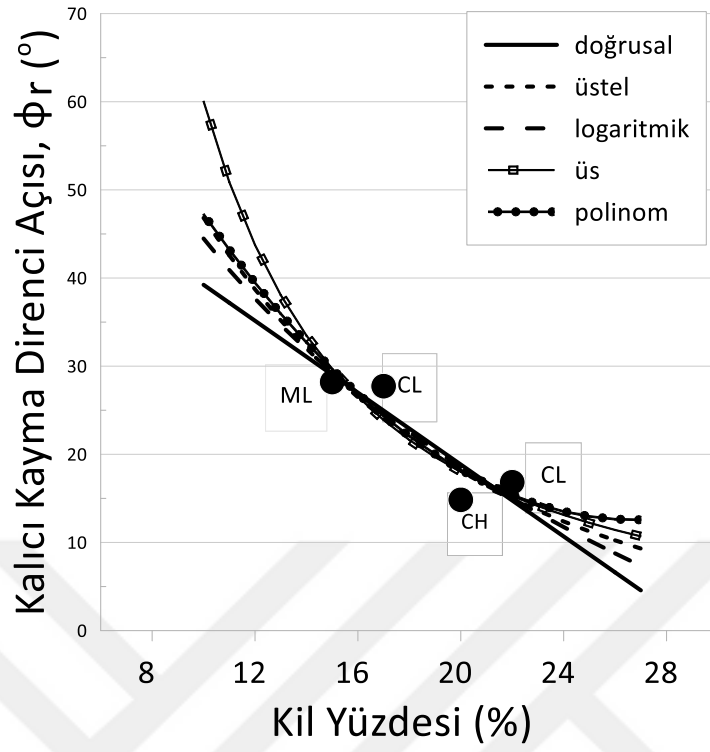


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi

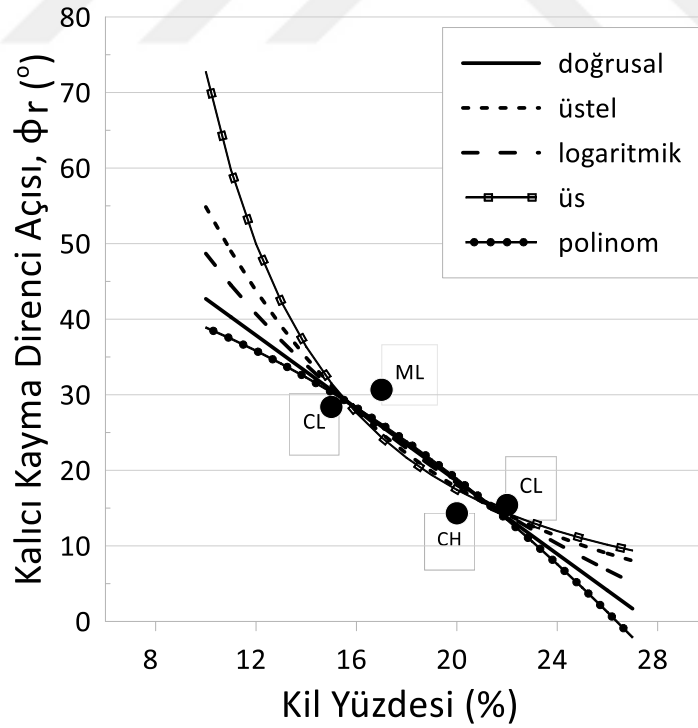


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının plastik limitin likit limite oranı ile değişimi

B.11. Kil Yüzdesinin Kalıcı Kayma Direncine Etkisi

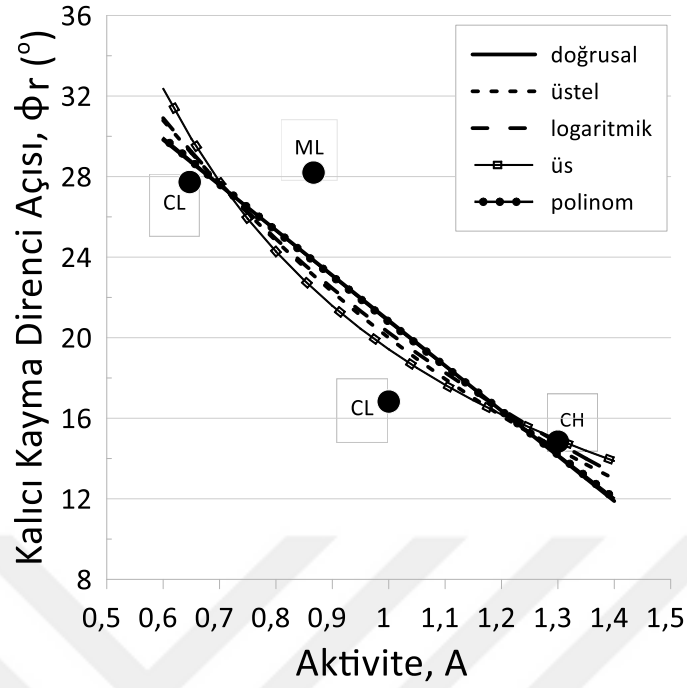


Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

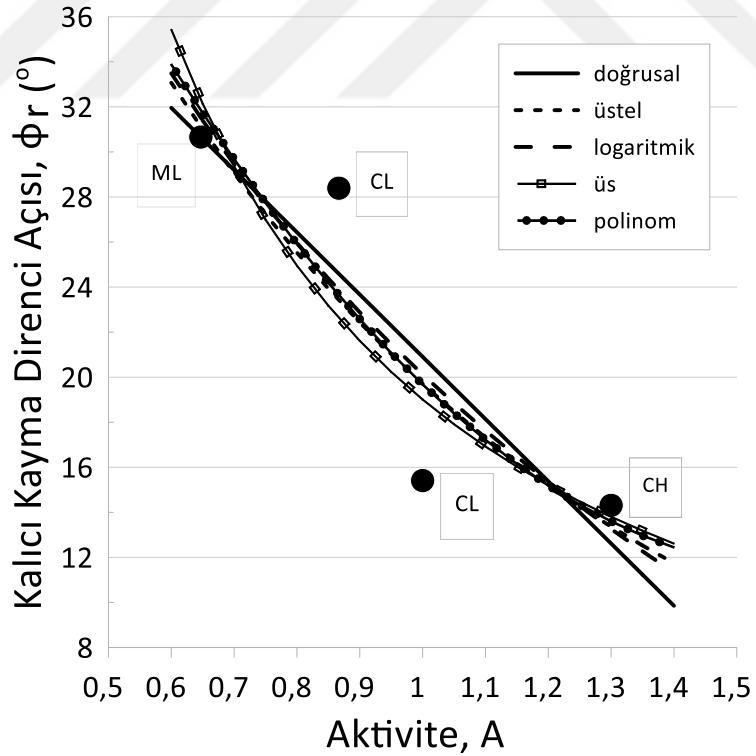


Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının kil yüzdesi ile değişimi

B.12. Aktivite Değerinin Kalıcı Kayma Direncine Etkisi



Halka kesme deneyinde 1,35 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişimi



Halka kesme deneyinde 0,135 der/dak hızda kalıcı kayma direnci açısının aktivite değeri ile değişimi