

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOYGUN OLMAYAN İNCE DANELİ ZEMİNLERDE  
KAYMA DİRENCİNİN BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Kurban ÖNTÜRK**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertan BOL**

**Haziran 2022**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOYGUN OLMAYAN İNCE DANELİ ZEMİNLERDE  
KAYMA DİRENCİNİN BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Kurban ÖNTÜRK**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Bu tez / /2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

**Jüri Başkanı**

**Üye**

**Üye**

**Üye**

**Üye**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Kurban ÖNTÜRK

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince kendisiyle çalışmaktan mutlu olduğum, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Doç. Dr. Ertan BOL ve doktora sürecimin belirli bir döneminde yine tez danışmanım olan Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a teşekkür ederim. Tez sürecimde bilgisini, emeğini ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim Prof. Dr. Nazile URAL'a teşekkür ederim. Laboratuvar deneylerimi yaptığım süreçte bilgisini ve tecrübesini her zaman yanımda hissettiren Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkür ederim.

Mekanik deneyleri yapabilmek adına, deneysel çalışmaların altyapısının hazırlanması için ve tüm doktora sürecim boyunca verdikleri destek için yıllarca birlikte çalıştığım Arş. Gör. Mustafa ÖZSAĞIR ve Arş. Gör. Kadir KOCAMAN'a teşekkür ederim. Bu süreçte aynı anabilim dalında görev yaptığımız ve tüm çalışmalarım boyunca manevi desteğini her zaman gördüğüm Doç. Dr. İsa VURAL'a teşekkür ederim. Doktora sürecim boyunca laboratuvar kısmında hem teknik destek hem de deneysel çalışmalarında her zaman desteklerini gördüğüm laboratuvar sorumlularımız Recep EYÜPLER ve Sebahattin İŞ'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarında göstermiş oldukları hoşgörü, anlayış ve destekleri için, Prof. Dr. Mehmet SARIBIYIK'a ve Prof. Dr. Metin İPEK'e teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca göstermiş oldukları büyük sabırları ve destekleri için eşim Berna Bastan ÖNTÜRK, kızlarım Elif ÖNTÜRK, Eflin ÖNTÜRK ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-02-011) teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	xi
ÖZET .....	xiii
SUMMARY .....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Tez İçeriği .....	6
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	8
BÖLÜM 3.	
DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLER .....	26
3.1. Giriş .....	26
3.2. Doymun Olmayan Zeminlerin Özellikleri .....	29
3.2.1. Doymun olmayan zeminlerin faz özellikleri .....	30
3.2.1.1. Hava-su arayüzü .....	32
3.3. Doymun Olmayan Zeminler İçin Gerilme Durum Değişkenleri .....	33
3.4. Doymun Olmayan Zeminlerin Kırılma Zarfı ve Kayma Direnci .....	39
3.4.1. Doymun olmayan zeminlerin doğrusal olmayan kırılma zarfı... ..	43
3.5. Doymun Olmayan Zeminler İçin Üç Eksenli Hücre Kesme Deney Cihazının Modifiye Aşamaları .....	48

3.5.1. Eksen kaydırma tekniği .....	48
3.5.1.1. Eksen kaydırma tekniğinin çalışma prensibi .....	50
3.5.2. Yıkama (Flushing) ünitesi .....	51
3.6. Zemin Emme (Toplam) Gerilmesi ve Ölçümü .....	53
3.6.1. Kılcal gerilme .....	55
3.6.2. Eriyik (Ozmotik) emme .....	56
3.7. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi (SWCC) .....	57
3.7.1. Filtre kağıdı yöntemiyle SWCC'nin belirlenmesi .....	61
3.7.2. Basınç plakası yöntemiyle SWCC'nin belirlenmesi .....	63
3.8. Doymun Olmayan Zeminler İçin Üç Eksenli Deney Yöntemleri .....	65
3.8.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) deney yöntemi .....	66

#### BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	69
4.1. Giriş .....	69
4.2. Malzeme ve Özellikleri .....	70
4.3. Zemin Numunelerinin Hazırlanması .....	74
4.4. Numunelerin Zemin-Su Karakteristik Eğrilerinin Belirlenmesi .....	77
4.5. Konsolidasyonlu-Drenajlı Deney Yöntemi .....	84
4.6. Emme Kontrollü Deneyler İçin Geleneksel Üç Eksenli Hücre Kesme Deney Cihazının Modifiye İşlemi .....	85
4.7. Üç Eksenli Hücre Kesme Deney Sonuçları .....	87
4.7.1. Doymun üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	87
4.7.2. Emme kontrollü (doymun olmayan) üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	92
4.7.2.1. 1. seri emme kontrollü zemin üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	99
4.7.2.2. 2. seri emme kontrollü zemin üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	108
4.7.2.3. 3. seri emme kontrollü zemin üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	114

4.7.2.4. 4. seri emme kontrollü zemin üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	118
4.7.2.5. 5. seri emme kontrollü zemin üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	122
4.7.2.6. 3. 4. ve 5. serilere (Yöntem 2) ait kayma yüzeyinin çizilmesi .....	125

## BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	135
5.1. Sonuçlar .....	136
5.2. Öneriler .....	138
KAYNAKLAR .....	140
ÖZGEÇMİŞ .....	150

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ATM	: Atmosfer basıncı
CD	: Konsolidasyonlu-drenajlı
CU	: Konsolidasyonlu-drenajsız
CW	: Sabit su içeriği (Constant water)
DOZ	: Doygun olmayan zemin
HAE	: Yüksek hava girişi
kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal
LVDT	: Doğrusal değişken diferansiyel trasformatör
NP	: Non-plastik (Plastik özelliği olmayan)
$R^2$	: Rekreasyon analizinde elde edilen denklemin bağımlı değişkeni ölçme kriteri
$S_r$	: Doygunluk derecesi
SAÜ	: Sakarya Üniversitesi
SWCC	: Zemin su karakteristik eğrisi
SWRC	: Zemin su tutma eğrisi
TDR	: Zaman alanı reflektometrisi
TXCD-UNSAT	: Üç eksenli Konsolidasyonlu Drenajlı-Doygun olmayan
$u_a$	: Boşluk hava basıncı
$u_a - u_w$	: Kılcal gerilme
$u_w$	: Boşluk suyu basıncı
$V_a$	: Hava hacmi
$V_s$	: Dane hacmi
$V_T$	: Toplam hacim
$V_v$	: Boşluk hacmi
$V_w$	: Suyun hacmi



$W_s$	: Dane ağırlığı
$W_T$	: Toplam ağırlık
$W_w$	: Suyun ağırlığı
YASS	: Yer altı su seviyesi
$\sigma_3$	: Çevre basıncı
$\sigma_3 - u_a$	: Net normal gerilme
$v$	: Eksenel kesme hızı
$C^0$	: Santigrad Derece
$\varepsilon_a$	: Eksenel deformasyon
$\varepsilon_v$	: Hacimsel deformasyon
$\sigma$	: Gerilme

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Doymun ve doymun olmayan zeminlerin genel gösterimi .....	2
Şekil 1.2. Doymun olmayan zeminlerin yerel ve bölgesel alt bölümleri .....	3
Şekil 1.3. Yeryüzündeki kurak ve yarı kurak alan haritası .....	4
Şekil 2.1. Numuneden çıkan suyun hacim değişimi .....	8
Şekil 2.2. Kılcal gerilme değerine bağlı kayma direnci net normal gerilme ilişkisi .....	10
Şekil 2.3. Çift hava giriş değerine sahip SWC eğrisi modeli .....	11
Şekil 2.4. Kılcal gerilme ve kayma direnci arasındaki ilişki .....	13
Şekil 2.5. Farklı su içeriği ve sıkıştırma enerjinde kılcal gerilme değerleri .....	14
Şekil 2.6. Üç eksenli deney sonuçları .....	17
Şekil 2.7. Emmenin etkisi ile çizilen Mohr daireleri ve kırılma zarfları .....	17
Şekil 2.8. %0 tuz oranına sahip üç zemin için toplam emme ve doymunluk derecesi arasındaki ilişki .....	21
Şekil 2.9. Kil mineralleri ile kayma direnci arasındaki ilişki .....	24
Şekil 2.10. 50, 100 ve 150 kPa çevre basıncı deney sonuçları .....	25
Şekil 3.1. Doymun olmayan zemin profili .....	28
Şekil 3.2. Doymun olmayan zemin faz diyagramı .....	31
Şekil 3.3. Doymun olmayan bir zemin taneciğine ait dört fazlı bir elementin temsili gösterimi .....	31
Şekil 3.4. (a) Hava - su arayüzü kuvvetleri, (b) Su içindeki moleküller arası kuvvetler .....	32
Şekil 3.5. Doymun olmayan zemin için dört fazlı blok diyagram .....	33
Şekil 3.6. Doymun zemin numunelerine ait farklı yönlerdeki gerilme durum değişkenlerinin matris ve küp formu .....	35
Şekil 3.7. Doymun olmayan zeminler için Mohr Coulomb kırılma zarfı .....	36
Şekil 3.8. Doymun ve doymun olmayan zemin değişkenleri küp formu .....	38

Şekil 3.9. Doygun olmayan zeminde gerilme durum değişkenleri matris formu.	38
Şekil 3.10. Doygun zeminler için 2 boyutlu Mohr Coulomb göçme kriteri .....	40
Şekil 3.11. Genişletilmiş Mohr-Coulomb yenilme yüzeyi .....	41
Şekil 3.12. Kırılma zarfının $\tau$ 'ya karşı $\sigma - u_a$ düzlemine yatay izdüşümü .....	42
Şekil 3.13. Zemin cinsine bağlı olarak kırılma zarfı ve kayma direnci değişimi ..	44
Şekil 3.14. Zemin-su karakteristik eğrisi ile kayma direnci arasındaki ilişki.....	45
Şekil 3.15. Eksen kaydırma tekniği çalışma prensibi .....	51
Şekil 3.16. SWC eğrisinin kurutma ve ıslatma yöntemi ile çizimi .....	59
Şekil 3.17. Standart tipte bir zemin-su karakteristik eğrisi .....	60
Şekil 3.18. Toplam ve kılcal gerilme ölçümü için filtre kağıdının yerleşimi .....	63
Şekil 3.19. Basınç plakası şematik gösterimi .....	64
Şekil 3.20. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme testinin çeşitli aşamalarındaki gerilme koşullar .....	68
Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan üç doğal numunenin konumları .....	71
Şekil 4.2. 4. Zemin numunesinin çöktürme tekniği ile elde edilme aşaması .....	72
Şekil 4.3. N-1 numaralı numunenin çöktürme işlemi ile elde edilme süreci .....	72
Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan 4 numunenin dane boyut dağılımı .....	73
Şekil 4.5. (a) Bulamaç kıvamda hazırlanan numune (b) Numunenin desikatörde hava alınma işlemi, (c) Silindirik hücreye yerleştirme işlemi .....	75
Şekil 4.6. 100 kPa altında tek boyutlu konsolidasyon işlemi .....	76
Şekil 4.7. Dondurucudan çıkarılan numunelerin şeffaf hücreden çıkarılma işlemi.....	77
Şekil 4.8. Filtre kağıdı ve basınç plakası için numune alma halkaları .....	78
Şekil 4.9. Filtre kağıdı deney yönteminde kullanılan Whatman No.42 filtre kağıdı .....	79
Şekil 4.10. Filtre kağıdı deney yöntemi detayları .....	79
Şekil 4.11. 7 gün sonunda ölçümleri yapılan numunelerin su muhtevası kaybı için bekleme aşaması .....	80
Şekil 4.12. Filtre kağıdı deney sonunda numunelere ait son haller .....	80
Şekil 4.13. 15 bar basınca dayanıklı basınç plakası hücresi .....	81
Şekil 4.14. Emme ölçümü için basınç plakasına yerleştirilen numuneler .....	82

Şekil 4.15. Filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemiyle elde edilen zemin-su karakteristik eğrileri (SWCC) .....	83
Şekil 4.16. Deney numunelerinin hazırlanması için tasarlanan konsolidasyon hücreleri .....	85
Şekil 4.17. Alt pedestal içerisine açılan helezon biçiminde detay .....	86
Şekil 4.18. Modifiye edilmiş üç eksenli hücre kesme deney aleti .....	87
Şekil 4.19. Üç eksenli deney aşaması için kesme hızının belirlenmesi .....	88
Şekil 4.20. Doymun zeminler için çok aşamalı hücre kesme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	89
Şekil 4.21. Doymun zeminlere ait efektif gerilme ile kesme dayanımı arasındaki ilişki .....	91
Şekil 4.22. Çalışmada doymun deneyler için kullanılan üç eksenli hücre kesme deney cihazı .....	92
Şekil 4.23. Çalışmada doymun olmayan deneyler için kullanılan üç eksenli hücre kesme deney cihazı .....	93
Şekil 4.24. 5 barlık seramik poroz taş ve filtre kağıdının doyurma aşaması .....	94
Şekil 4.25. Numune altında biriken havanın alınmasında kullanılan yıkama sistemi .....	94
Şekil 4.26. Yıkama (Flushing) sistemi şematik gösterimi .....	95
Şekil 4.27. Doymun olmayan zeminler için bir numuneye ait tüm aşamaların detayı .....	98
Şekil 4.28. 1. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	100
Şekil 4.29. 1. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki .....	102
Şekil 4.30. 1. seri kılcal gerilmeye karşılık görünür kohezyon değerleri (Doymun durumda kohezyon değerleri 0'dır) .....	104
Şekil 4.31. 1. seri kayma yüzeyi çizimlerinin 3 boyutta gösterimi .....	105
Şekil 4.32. N1-4 numaralı numuneye ait çift düzlem ile kayma yüzeyi çizimi .....	106
Şekil 4.33. 2. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	108
Şekil 4.34. 2. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki .....	110
Şekil 4.35. 5. seri kılcal gerilmeye karşılık görünür kohezyon değerleri (Doymun durumda kohezyon değerleri 0'dır) .....	112
Şekil 4.36. 2. seri kayma yüzeyi çizimlerinin 3 boyutta gösterimi .....	112

Şekil 4.37. N2-4 numaralı numuneye ait çift düzlem ile kayma yüzeyi çizimi .....	114
Şekil 4.38. 3. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	115
Şekil 4.39. 3. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki .....	117
Şekil 4.40. 4. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	119
Şekil 4.41. 4. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki .....	121
Şekil 4.42. 5. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	123
Şekil 4.43. 5. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki .....	124
Şekil 4.44. Yöntem 2 deneylerine ait kılcal gerilmeye karşılık görünür kohezyon değerleri (Doymun durumda kohezyon değerleri 0'dır) .....	127
Şekil 4.45. Yöntem 2 deney sonuçlarına göre numunelere ait kırılma zarfı çizimlerinin 3 boyutta gösterimi .....	128
Şekil 4.46. Yöntem 2 numunelerine ait çift düzlem ile kayma yüzeyi çizimi .....	129
Şekil 4.47. 3 farklı seri deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri ve kohezyon değerleri .....	131
Şekil 4.48. Konsolidasyon aşaması deney süreleri grafiği .....	132
Şekil 4.49. 4 numuneye ait toplam ve kılcal gerilme aşamaları süreleri .....	134

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Özet emme ölçüm yöntemleri .....	61
Tablo 3.2. Doygun olmayan zeminler için çeşitli üç eksenli deney yöntemleri .....	66
Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan zemin özellikleri .....	73
Tablo 4.2. Çizilen SWC eğrisinden elde edilen sonuçlar .....	83
Tablo 4.3. Doygun numunelere ait gerilme durum değişkenleri .....	88
Tablo 4.4. Doygun zemin çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviator gerilme artış oranları .....	90
Tablo 4.5. Doygun zemin numunelerine ait çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	91
Tablo 4.6. Doygun olmayan zemin deneyleri için gerilme değişkenleri .....	96
Tablo 4.7. 1. seri gerilme durum değişkenleri .....	99
Tablo 4.8. 1. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviator gerilme artış oranları .....	101
Tablo 4.9. 1. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	103
Tablo 4.10. 2. seri gerilme durum değişkenleri .....	108
Tablo 4.11. 2. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviator gerilme artış oranları .....	109
Tablo 4.12. 2. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	111
Tablo 4.13. 3. seri gerilme durum değişkenleri .....	115
Tablo 4.14. 3. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviator gerilme artış oranları .....	116
Tablo 4.15. 3. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	118
Tablo 4.16. 4. seri gerilme durum değişkenleri .....	119
Tablo 4.17. 4. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviator gerilme artış oranları .....	120
Tablo 4.18. 4. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	121

Tablo 4.19. 5. seri gerilme durum değişkenleri .....	122
Tablo 4.20. 5. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviator gerilme artış oranları .....	124
Tablo 4.21. 5. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları .....	125
Tablo 4.22. 3 seri sonunda DOZ deneylerinden elde edilen 4 numuneye deney sonuçları .....	130
Tablo 4.23. Konsolidasyon aşamasının saat türünden deney süreleri .....	132
Tablo 4.24. Kılcal gerilme aşamalarının saat cinsinden süreleri .....	133

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Doymun olmayan zemin, kılcal gerilme, kayma direnci, doğrusal olmayan kırılma zarfı, kırılma zarfı

Boşluklarının tamamının su ile dolu olmayan zeminler için doymun olmayan zemin ismi kullanılmaktadır. Doymun olmayan zeminler için deney yapmak uzun zamanlar almakta ve bu zeminler için geoteknik problemlerinin çözümü daha zor olmaktadır. Bu çalışmada Adapazarı formasyonuna ait zeminlerin doymun olmayan durumdaki mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışmada 4 farklı içeriğe sahip numune kullanılmıştır. Öncelikle, numunelere ait fiziksel özellikler belirlenerek zemin sınıfları tespit edilmiştir. Yapılan sınıflandırma deneyleri sonucunda en çok kil içeriğine (%22) ve en az kum içeriğine (%1) sahip numuneye N1, sırası ile kil içeriği azalan numunelere ise N2, N3 ve N4 isimleri verilmiştir.

Geleneksel üç eksenli hücre kesme deney cihazı modifiye edilerek doymun olmayan deney yöntemine uygun hale getirilmiştir. Mekanik davranışların incelenmesi için Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme deney yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan tüm üç eksenli deneylerde az sayıdaki numuneden daha fazla veri elde edebilmek için numuneler çok aşamalı olarak kesilmiştir. Çok aşamalı deney yönteminde 3 farklı efektif gerilmede veya net normal gerilmede tek bir deney numunesi üzerinde deney yapılmaktadır.

Çalışmada filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemleri kullanılarak emme ölçümleri gerçekleştirilmiş ve zemin-su karakteristik eğrileri (SWCC) oluşturulmuştur. Çizilen SWC eğrilerinden üç eksenli hücre kesme deneyinde kullanılan parametre olan kılcal gerilme değerleri belirlenmiştir. 1 seri (4 adet) doymun zemin, 5 seri (20 adet) doymun olmayan zeminler için Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleri yapılmıştır. Doymun olmayan zemin sonuçları için, kılcal gerilme değerinin artması ile N-1, N-2 ve N-3 numaralı numunelere ait kırılma zarflarının çizimi doğrusal elde edilmiştir. N-4 numaralı numunenin kırılma zarfı ise SWC eğrisi sonucu elde edilen hava giriş değerinden sonra doğrusal devam etmemekte ve non-linear olarak çizilmektedir.

Numune içerisinde bulunan kum miktarının artması ile numunelerden elde edilen kılcal gerilmenin etkisi ile ortaya çıkan ( $\phi^b$ ) açının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Yöntem 1 (1. Seri ve 2. Seri) ve Yöntem 2 (3. , 4. Ve 5. Seri deneyler) ile yapılan tüm deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile numunelerin kayma yüzeyleri 3 boyutlu olarak çizilmiş ve kırılma zarfları bu 3 boyutlu yüzeylerden de elde edilmiştir.

Hem yöntem 1 ile hem de yöntem 2 ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en küçük kohezyon değeri N-1 numaralı numuneden elde edilmiştir. En yüksek kohezyon değeri ise N-4 numaralı numuneden elde edilmiştir.



# DETERMINATION OF SHEAR STRENGTH IN UNSATURATED FINE-GRAINED SOILS

## SUMMARY

Keywords: Unsaturated soils, matric suction, shear strength, non-linear failure envelope, failure envelope

Unsaturated soil is used for soils where the voids are not completely filled with water. Experimenting for unsaturated soils takes a long time and geotechnical problems for these soils are more difficult to solve.

In this study, the unsaturated mechanical behavior of the soils of the Adapazari formation was investigated. Samples with four different contents were used in the study. First of all, soil classes were determined by determining the physical properties of the samples. The conventional triaxial cell shear test device was modified and made suitable for the unsaturated test method. Consolidated-Drained (CD) triaxial cell shear test method was preferred in order to examine the mechanical behavior. In all triaxial cell shearing experiments, samples were shearing in multistages in order to obtain more data from a small number of samples.

In the study, suction measurements were performed using filter paper and pressure plate methods and soil-water characteristic curves (SWCC) were created. Matric suction values, which are the parameters used in the triaxial cell shear test, were determined from the drawn SWC curves. Consolidated-Drained triaxial cell shear tests were carried out for 1 series (4 samples) of saturated soils and 5 series (20 samples) for unsaturated soils. For the unsaturated soil results, the plot of the failure envelopes of the N-1, N-2 and N-3 samples was obtained linear with the increase of capillary suction value. The failure envelope of the N-4 sample, on the other hand, does not continue linearly after the air entry value obtained as a result of the SWC curve and is drawn non-linearly.

It was concluded that the  $\phi^b$  angle obtained from the samples increased with the increase in the amount of sand in the sample. With the results obtained from all experimental studies with Method 1 and Method 2, the slip surfaces of the samples were drawn in 3D and the failure envelopes were also obtained from these 3D surfaces.

As a result of the experimental studies carried out with both method 1 and method 2, the smallest cohesion value was obtained from sample N-1. The highest cohesion value was obtained from sample N-4.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

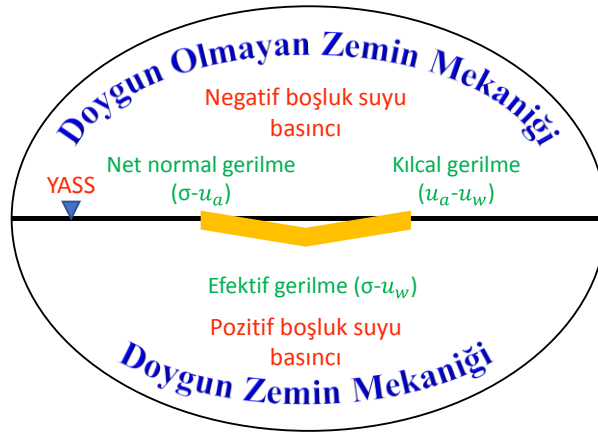
Geleneksel zemin mekaniğinin laboratuvar uygulamalarında genellikle doygun zeminler üzerinde araştırmalar yapılmış veya çalışılan zeminler doygun olarak kabul edilmiştir. Zeminlerin doygun olarak kabul edilmesinin nedeni, yapılan sayısal hesap ve modelleme hesaplamalarında ya da laboratuvar ortamındaki çalışmalarda zemin parametrelerinin güvenli tarafta kalmasının istenmesi ve sonuçlara hızlı erişilmesidir. Yani kısa yoldan güvenli ve somut bir sonuca ulaşılmasının istenmesidir. Buna karşın, bu güvenlik kaygısı beraberinde maliyetli çözümleri de getirebilmektedir. Araziden alınan her numunenin doygun kabul edilerek laboratuvar deneylerine tabi tutulması sonucunda elde edilen veriler gerçek değerlerin uzağında sonuçlar vermektedir. Doygun olmayan zeminlerin kayma direnci ve deformasyon gibi özelliklerinin belirlenmesinde karmaşık hesaplama yöntemleri ortaya çıkmakta ve doygun zeminlerdeki uygulamalara nazaran sonuca ulaşılması daha uzun sürmektedir.

Doygun olmayan zeminlerin kayma direnci parametreleri, SWC eğrilerini elde etmede kullanılan ıslatma ve kurutma döngülerinden, deformasyonlardan, yükleme ve boşaltmalardan etkilenebilmektedir. Doygun olmayan zeminler için kılcal gerilme önemli bir parametredir. Bu değişken zeminlerin su tutma eğrilerinde kullanılan doğal nem içeriği ile ilişkilidir (Mekkiyah ve ark., 2021).

Bilindiği üzere; yeryüzündeki zeminler katı, sıvı ve gazdan meydana gelen 3 fazlı sistemlerdir. Bu zeminlerin katı olarak nitelenen fazında çakıl, kum, kil, silt, her türlü kimyasal ve organik maddeler bulunabilmektedir. Bünyesinde bulunan kil miktarına bağlı olarak zeminlerin doygunluk dereceleri değişebilmektedir. Kil, bünyesinde su tutabilme özelliğine sahip bir malzeme olmasından dolayı zeminlerde doygunluk derecesini belirleyen en önemli etken olarak kabul edilmektedir. Bu sebeple zeminlerin fiziksel yapısı incelendiğinde, zemin tabakalarının herhangi bir noktasında kil

minerallerine rastlamak mümkün olduğundan yeryüzünde tam doygun zemine rastlamak mümkün değildir (Fredlund ve ark., 2012).

Doygun zemin, yeraltı suyu seviyesi altında olan ve gerilme değişkeni olarak efektif gerilmeye maruz kalan zemin türüdür ve bu durum Şekil 1.1.'de gösterilmiştir. Doygun olmayan zeminler ise yeraltı su seviyesinin üstünde bulunur ve iki bağımsız gerilme değişkeni olan net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ) ve kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) etkisi altındadır. Doygun olmayan zeminlerin davranışını anlamak ve bu tür zeminlerin yapılarla olan etkisini yorumlamak için boşluk suyu basıncı önemli bir etkidir.

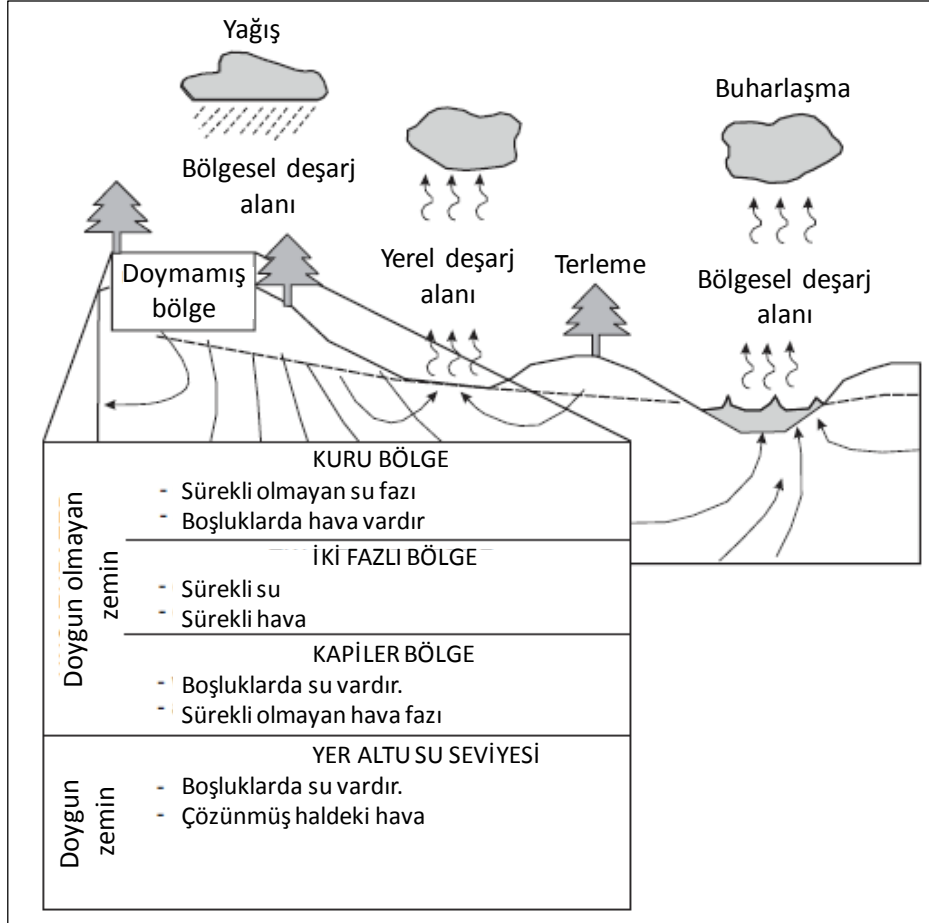


Şekil 1.1. Doygun ve doygun olmayan zeminlerin genel gösterimi (Fredlund ve ark., 2012).

Boşluk suyu basıncı doygun zeminlerde pozitif iken doygun olmayan zeminlerde negatiftir. Yeryüzü ile yer altı su seviyesi arasındaki bölgeye doygun olmayan bölge denilmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

Şekil 1.2.'de dünya genelindeki iklim koşullarının etkisiyle zemin tabakalarının çok nemli ortamdan kuru ortama geçiş düzeni görülmektedir. İklim şartları ve yer altı su seviyesinin derinliği doygun olmayan zemin tabakalarının kalınlığını kontrol eden önemli bir faktördür. Bouver (1978), Şekil 1.2.'deki yer altı su seviyesinin hemen üstündeki bölgenin doygun olmayan bölge olarak isimlendirilmesinin aslında yanlış bir ifade olduğunu belirtmiştir. Kılcallık sebebiyle esasen doygun olan, bu bölgeye vadoz bölge denilmesinin daha doğru olduğunu ifade etmiştir. Aynı zamanda doygun

olmayan zemin bölgesi sınırının yüzey suyu ile yer altı su seviyesi arasında bir geçiş oluşturduğunu ifade etmiştir.

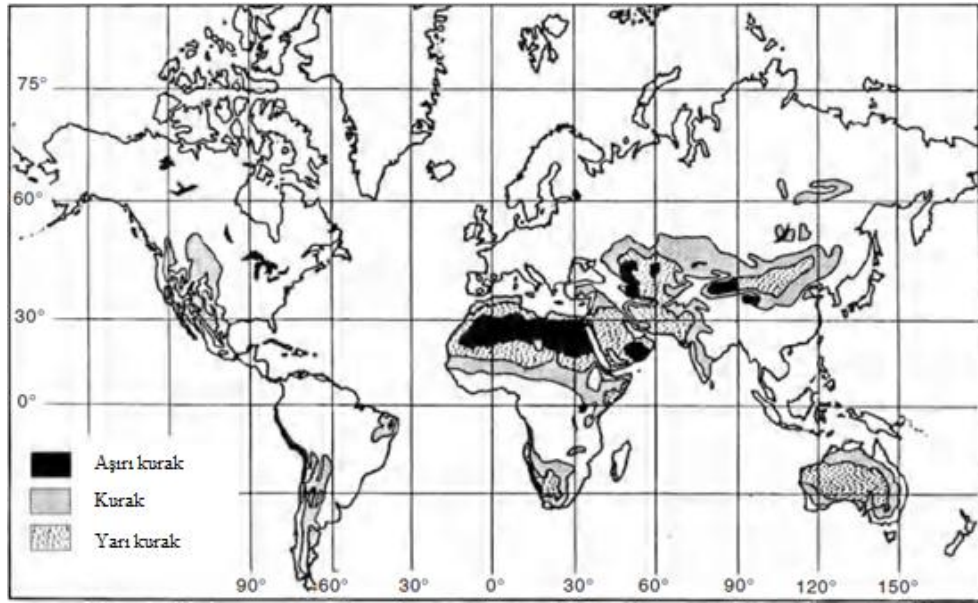


Şekil 1.2. Doymun olmayan zeminlerin yerel ve bölgesel alt bölümleri (Fredlund ve ark., 2012).

Yeryüzünde bulunan zeminlerin mühendislik özellikleri arasındaki farklılıklar birden fazla değişkene bağlıdır. Bu değişkenlerin en önemlilerinden biri zeminlerin su ile olan ilişkisidir. Zeminlerin su ile ilişkisini ifade eden doymunluk derecesinin %95'in altında kaldığı durumlarda zeminlere doymun olmayan zeminler denilmektedir. Zeminlerin doymun olmadığı durumlarda boşluk (hava) fazı devreye girmektedir.

Hava fazına sahip olan zeminlerde (doymun olmayan zeminler) hava-su ara yüzeyleri oluşmaktadır. Bu ara yüzeylerin oluşması zeminlere ait tüm mühendislik özelliklerinin etkilenmesine ve bu özelliklerin de su içeriği ile değişimine neden olmaktadır (Tekinsoy, 2005).

Yeryüzünün önemli bir bölümü kurak ve yarı kurak olarak sınıflandırılmıştır. Bu bölgelerde zemin yüzeyindeki yıllık buharlaşma miktarı yıllık yağışları aşmaktadır. Dünya'nın aşırı kurak, kurak ve yarı kurak alanlarının iklimsel sınıflandırması Şekil 1.3.'de gösterilmektedir. Kurak ve yarı kurak alanlar genellikle derin bir yeraltı suyu seviyesine sahiptir. Su seviyesinin üstünde bulunan zeminlerde negatif gözenek basıncı vardır (Fredlund ve ark., 2012). Yeryüzünün yaklaşık %33'ü kurak ve yarı kurak olarak kabul edilmektedir (Dregne, 1976).



Şekil 1.3. Yeryüzündeki kurak ve yarı kurak alan haritası (Meigs, 1953; Dregne, 1976).

Kurak ve yarı kurak bölgelerdeki buharlaşmanın artması ile zeminlerin doygunluk dereceleri düşmekte ve bu da zeminlerin doygun olmayan hale gelmesine olanak sağlamaktadır (Fredlund ve ark., 2012).

Türkiye'de doygun olmayan zemin mekaniği alanındaki çalışmalar tüm Dünya'da olduğu gibi sınırlı sayıdadır. Doygun olmayan zeminin bulunduğu zemin tabakaları yüzeye yakın olan mesafelerde bulunmaktadır. Yer altı su seviyesinin (YASS) üzerinde (Vadoz bölge) olan zeminler doygun olmayan zemin olarak isimlendirilmektedir. Türkiye'de yıllık yağış miktarına ve tarımsal sulamalara bağlı olarak doygun olmayan zemin bölgeleri değişim gösterebilmektedir. Ülkemizin belirli bir bölgesinde yıllık yağış miktarının az olması kurak topraklar oluşturmakta ve doygun olmayan zemin

bölgelerinin artmasına neden olabilmektedir. Tüm Dünya’da olduğu gibi ülkemizde de zeminlere ait geoteknik problemlerin çözümlerinde zeminler genellikle doygun kabul edilerek çözümler aranmaktadır.

Doygun olmayan zeminlerin su tutma eğilimlerinin, permeabilite katsayılarının, hava giriş değerlerinin belirlenmesi için zemin su tutma karakteristik eğrileri (SWCC) deneylerinden elde edilen bilgilerden faydalanılmaktadır. SWC eğrilerinden elde edilen hava giriş değeri (AEV) ile doygun olmayan zeminlerdeki üç eksenli hücre kesme deneylerinde kullanılan kılcal gerilme değerleri belirlenmiş olmaktadır. SWC deneyinden elde edilen bu kılcal gerilme değerlerine ve zemin numunelerine uygulanacak olan boşluk suyu basıncı değerlerine eksen kaydırma tekniği uygulanarak numunelerin üç eksenli hücre deneyi sonucundaki kayma direnci parametreleri belirlenebilmektedir.

SWCC, doygun olmayan zemin özelliklerini tahmin etmek ve deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere bazı parametrelerin elde edildiği bir yöntemdir. Bu dolaylı ölçümler ve tahmin yöntemleri, geoteknik mühendisliğinde doygun olmayan zemin mekaniğinin uygulanmasına olanak sağlamaktadır. SWCC'den alınan veriler, kullanılarak gerekli doygun olmayan zemin özelliği fonksiyonları hesaplanabilir. Ayrıca, zemin özelliklerinin sınıflandırılmasından ve korelasyonlarından veya geçmiş laboratuvar zemin testlerinin sonuçlarını içeren veri tabanlarından SWCC'nin bir göstergesini elde etmek de mümkündür. SWCC'nin tahmini için sınıflandırma testleri (örneğin, dane dağılım eğrisi) de kullanılabilir (Fredlund ve ark., 2012).

Bu çalışma kapsamında kurak, kırsal ve yer altı su seviyesinin (YASS) derinlerde olduğu bölgeleri temsil eden numuneler üzerinde üç eksenli hücre kesme deneyleri yapılmıştır. Zeminlerin arazi şartlarında maruz kaldığı gerçekçi gerilmeler (su basıncı ve atmosfer basıncı) altında sergiledikleri davranışların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu davranışların belirlenmesi için öncelikle zeminlerin doygun durumdaki davranışları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar kıyaslama sonuçları olarak kullanılmıştır. Doygun olmayan zemin deneyleri için Sakarya Üniversitesi (SAÜ) Geoteknik laboratuvarında bulunan geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi cihazı

modifiye edilmiş ve doymun olmayan zeminlerde deney yapabilecek seviyeye yükseltilmiştir. Daha sonra SWC eğrileri kullanılarak doymun olmayan zemin deneylerindeki değişken parametre olan kılcal gerilme değeri elde edilmiştir. Bu veriler ışığında numunelerin doymun olmayan koşullar altındaki drenajlı kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. Deneyde kullanılan numunelerin farklı fiziksel özelliklere sahip olması ve içerisinde bulunan kil ve kum içeriklerinin farklı yüzdelerde bulunması bu çalışmanın özgünlüğünü yansıtmaktadır.

### **1.1. Tez içeriği**

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır ve her bölüme ait içerik planı aşağıda listelenmiştir.

Bölüm 1’de, giriş bölümünde bahsedilen doymun olmayan zeminlerin kayma direnci hakkında kısa bir bilgi verilmiştir. Bu bölümde tezin konusuna, amacına, kapsamı ve yapılacak olan deneysel çalışmaya yer verilmiştir. Son kısımda ise, çalışmanın literatürdeki yeri ve özgün değerleri sunulmuştur.

Bölüm 2’de, doymun olmayan zeminlere ait kayma direnci konusunda yapılan literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Yapılan çalışmalardaki ince daneli zeminler ile ilgili detaylara yer verilerek bu çalışma için ön fikir edinilmeye çalışılmıştır.

Bölüm 3’te, doymun olmayan zeminler hakkında detaylı bir bilgi sunulmuştur. Doymun olmayan zeminlere ait deneysel çalışma yöntemlerinden, yardımcı tekniklerden, sonuçların yorumlanmasından ve doymun olmayan zeminler için literatürde yeterince çalışma bulunmadığından bahsedilmiştir.

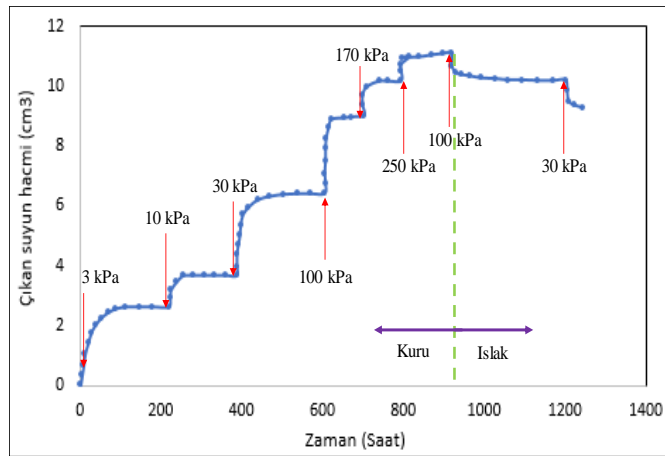
Bölüm 4’teki deneysel çalışma başlığı adı altında, bu tezde yer alan tüm deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Yapılan tüm deneyler için kullanılan yöntem ve teknikler bu bölümde sıralanmıştır. Doymun deney sonuçlarına, SWC eğrileri deney sonuçlarına ve doymun olmayan deney sonuçlarına yer verilmiştir.

Bölüm 5, Sonuçlar ve Öneriler bölümü olarak tanımlanmıştır. Sonuçlar başlığı altında, elde edilen bulgular neticesinde, tez çalışmasının genel değerlendirilmesi yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Öneriler başlığı altında ise gelecekte yapılabilecek çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmuştur.



## BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hondoko ve ark., (2013) yapmış oldukları araştırmalarında iki farklı zemin tipi kullanmışlardır. Zeminlerin dane dağılımı ve temel fiziksel özellikleri belirlendikten sonra kesme testi için 5 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Kesme aşamasındaki yöntem belirlenirken literatürde yer alan çok aşamalı test prosedürlerinden faydalanılmıştır. Kesme testleri dakikada %0,01 mm hız oranı seçilerek konsolidasyonlu-drenajlı olarak yapılmıştır. Çalışmada, 25 kPa sabit boşluk suyu basıncı ve 50 kPa sabit değerinde net normal gerilme değerlerine ek olarak 3, 10, 30, 100, 170, 250 ve yine 30 ile 100 kPa basınçlarında kılcal gerilmeler uygulanmıştır. Öncelikle numunenin doygunluk durumu belirlenmiştir. Doygunluğa ulaşan numune, pik direnç değerine ulaşana kadar kesmeye maruz bırakılmış ve ulaştığında üzerindeki yük kaldırılmıştır. Bir sonraki aşamada, belirlenen net normal gerilme ve kılcal gerilme değerlerinde numune konsolidasyona bırakılmış ve emme değeri dengeye ulaşınca kesme işlemi tekrar uygulanmıştır. Hondoko ve ark., (2013) numuneden çıkan suyun zamana bağlı değişimini Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi incelemişler ve uygulanan her kılcal gerilmelerde dengeye ulaşma süresinin yaklaşık 8-10 gün olduğunu görmüşlerdir.

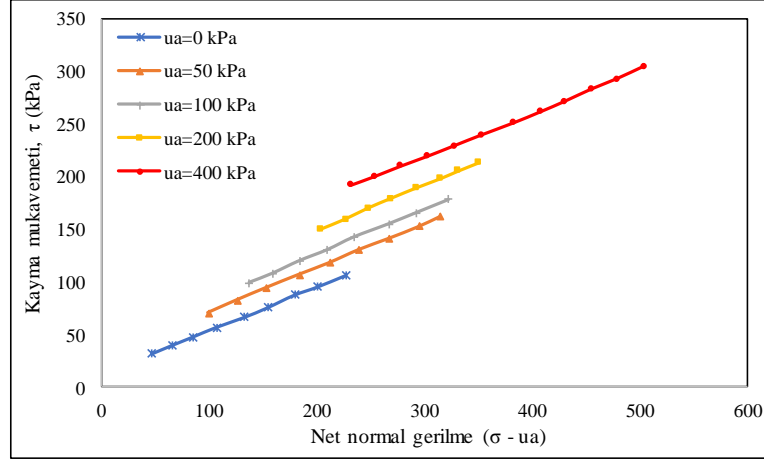


Şekil 2.1. Numuneden çıkan suyun hacim değişimi (Hondoko ve ark., 2013).

Kesme testlerini dört farklı aşamada ve farklı kılcal gerilme değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Artan kılcal gerilme değerinin zeminin mukavemetini artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. (Handoko ve ark., 2013).

Vanapalli ve ark. (2008) doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışlarının yorumlanması ve verilerinin elde edilebilmesi için eksen kaydırma tekniği ve negatif su sütunu tekniklerinin genellikle deneysel çalışmalarda kullanıldığını söylemişlerdir. Negatif su sütunu tekniğinin düşük emme aralığında (0-30 kPa), eksen kaydırma tekniğinin ise daha büyük emme aralıklarında (0-500 kPa) faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında eksen kaydırma tekniğininin hava difüzyonu, su hacim değişimi ve buharlaşma ile alakalı sınırlamalarından bahsetmişlerdir.

Tekinsoy ve ark. (2005) doygun olmayan zeminlerin parametrelerini üç eksenli deneyle belirlemeye yönelik çalışmalarında, örselenmemiş rezidüel killi zeminler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Eksen kaydırma tekniği kullanılarak kılcal gerilme değeri istenilen seviyede tutulmuştur. Üç eksenli deneylerde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deney tercih edilmiştir. Eksen kaydırma tekniğinde numunenin üstüne uygulanan hava basıncının küçük bir kısmı lastik membrandan geçerek su içerisine sızmıştır. Hava sızıntısını önlemek için numuneler çift membran içerisine alınmış ve membranların arasına da çift alüminyum folyo yerleştirilmiştir. Numunelerin kılcal gerilme değerlerini sıfırlamak için ilk olarak numuneler doyurulmuştur. Numunenin üstünden uygulanan hava basıncı ve belirli bir hücre basıncında altında, kılcal gerilme dengeye ulaşmaya kadar konsolide etmişlerdir. Kılcal gerilme dengeye ulaştığı zaman 0,004 mm/dk hızında numuneye aksenal yükleme yapılmıştır. Kesme sonrasındaki veriler numunelerin çoğunun yaklaşık olarak %11 gibi bir şekil değiştirme oranında kırıldığını göstermektedir. Aynı fiziksel özelliklere sahip numunelere doygun koşullarda üç eksenli deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda doygun olmayan zeminlerin kayma dirençlerini doygun zeminlerden daha büyük bulmuşlardır. Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi kılcal gerilme değerinin mukavemeti artırdığı sonucuna ulaşmışlar. Doygun ve doygun olmayan durumda yapılan deneylerden elde edilen mukavemet zarflarının yaklaşık olarak birbirine paralel olduğunu söylemişlerdir.

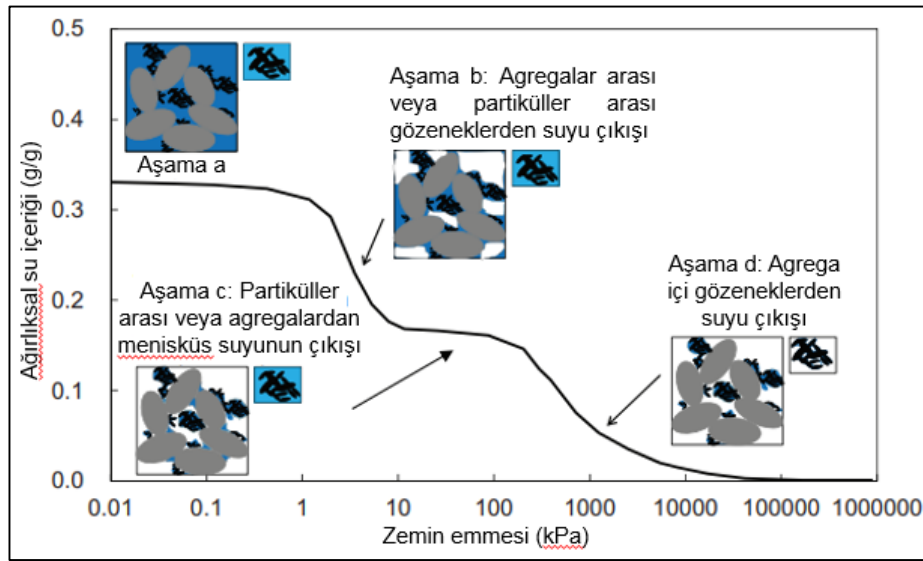


Şekil 2.2. Kılcal gerilme değerine bağlı kayma direnci net normal gerilme ilişkisi (Tekinsoy ve ark., 2005).

Deng ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, düşük dayanımlı doymun olmayan zeminlerden alınan örselenmemiş numunelere basit kesme deneyleri uygulamışlardır. 2004 Niigata-ken Chuetsu depreminde kaymaya maruz kalmış bir düzlemden alınan örselenmemiş örneklerin mukavemet özellikleri değerlendirilmiştir. Hem doymun hem de doymun olmayan numuneler üzerinde basit kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca doymun numuneler ilk olarak konsolide edilmiş ve üç eksenli kesilmişlerdir. Üç eksenli doymun numunelere uygulanan basit kesme testi sonucunda  $c'=0$  ve  $\phi'=31,7^{\circ}$  değerlerine ulaşılırken, zayıf tabakadan alınan örselenmemiş numunelerde  $c'=0$  ve  $\phi'=36,2^{\circ}$  sonuçları elde edilmiştir. Doymun olmayan zemin tabakalarından alınan numuneler üzerinde yapılan kesme deneyleri sonucunda tabakaların kayma direnci parametrelerini  $c'=8,5$  ve  $\phi'=35,3^{\circ}$  olarak belirlemişlerdir. Bu değerler doymun zemin tabakalarından elde edilen sonuçlardan daha yüksek bir kayma direncini göstermiştir. Doymun olmayan koşullar altında yumuşak kayaç tabakaları üzerinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre bu tabakaların kayma dirençleri, doymun koşullardaki tabakaların mukavemet değerlerinden daha yüksek çıkmıştır.

Zhao ve Zhang (2014), yapmış oldukları çalışmada doymun olmayan üç farklı zeminin, kritik durum karakteristiklerini, kesme davranışlarını, zemin-su karakteristik eğrilerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Deneyler 0,62 boşluk oranına sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune içerisindeki iri dane miktarı arttıkça, boşluk boyutu dağılımı değişkenlik göstermektedir. Üç eksenli deneyler için 70 mm çapında ve 140 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Zemin-su karakteristik eğrilerini

elde etmek için basınç plakası kullanılmıştır. 10 kPa'dan büyük kılcal gerilmelerde eksen kaydırma tekniği kullanılmıştır. İri dane miktarı %50, 68 ve 90 olan numunelerin drenajlı testlerde kesme hızları sırasıyla 0,002, 0,0036 ve 0,005 mm/dk'dır. İri dane miktarının %90 olduğu zeminlerin SWC eğrisinden çift hava giriş değerine sahip oldukları belirlenmiştir. Elde edilen bu çift hava giriş değerine (bimodal) sahip olan deneysel çalışma sonucu Şekil 2.3.'de verilmiştir.



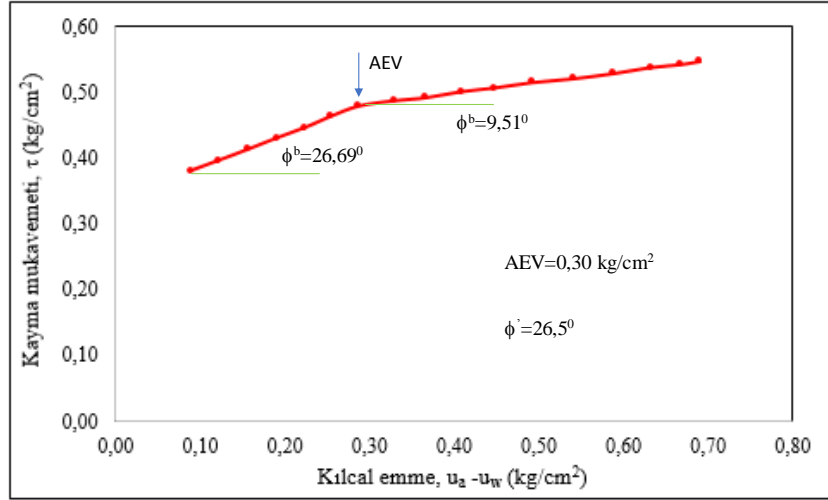
Şekil 2.3. Çift hava giriş değerine sahip SWC eğrisi modeli (Zhao ve Zhang, 2014).

Georgetti ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, sıkıştırılmış doymun olmayan zeminlerin kayma direncini incelemişlerdir. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile kılcal gerilmenin doymun olmayan zeminlere olan etkisi ve sabit su içeriğindeki kesme işlemi sırasında kılcal gerilmeye meydana gelebilecek farklılıklar üç eksenli testler ile araştırılmıştır. Numunelerin standart kompaksiyon, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri  $1,76 \text{ gr/cm}^3$  ve optimum su içeriği %15,3 olarak bulunmuştur. Doymun olmayan zeminlerin kayma direncini belirlemek için sabit su içeriği deney yöntemi kullanılırken, doymun durumundaki numuneler için konsolidasyonlu-drenajlı (CD) ve konsolidasyonlu-drenajsız (CU) deneyler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu üç eksenli deneyler eksen kaydırma tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Doymun numuneler, geri basınç kullanılarak  $B=0,97$  değerine kadar doyurulmuştur. CU ve CD deneyleri için kesme işlemi sırasında kesme oranı  $1,3 \cdot 10^{-3}$  olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak; zemin emmesinin zeminin kayma direnci değerini arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Doymun

olmayan zeminlerde sabit su içeriği (CW) metodu ile yapılan deneylerde kesme aşaması sırasında incelenen sonuçlardan, kılcal gerilmenin deney başlangıcında bir miktar düştüğü ve daha sonra dengeye ulaştığı sonucuna ulaşmışlardır.

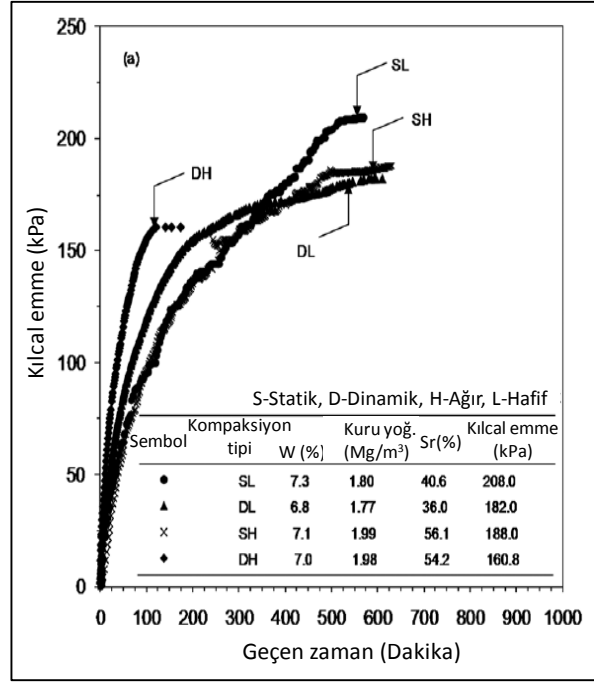
Ho ve ark. (1982) araştırmalarında, 6,5 cm çapında ve 13 cm yüksekliğinde numuneler hazırlamışlardır. Yüksek derecede bir sıkıştırma etkisi ile hazırlanan numunelerde kesme aşamasında pik değere ulaşıldıktan sonra bir kuvvet azalması görülebileceğini söylemişlerdir. Aşamalar arasında uygulanan deviatör gerilme değerinin serbest bırakılmasının avantajlarının olduğu belirtilmiştir. Bu avantajlardan biri, sürekli yükleme altında oluşacak zemin kaymasının önlenmesidir. Aşamalar arasında numuneye yük uygulama işleminin devam etmesiyle numune daha fazla deforme olacaktır. Yükün serbest bırakılması ile aşamalar arasındaki deviatör gerilme bir miktar düşecektir. Bir numunenin zemin yapısı çok aşamalı bir test ilerledikçe, belirli bir dereceye kadar bozulacaktır. Sonuç olarak, 3. aşamada ölçülen pik mukavemet aslında tek aşamalı bir testte aynı gerilme koşulları altında bulunan numunenin pik mukavemetinden daha küçük olabilir. Her adımda numuneye uygulanan gerilme nedeniyle beklenen sonuç ile elde edilen gerilme birbirini tutmayabilir. Sonuç olarak aşama ilerledikçe 1.aşamadan 3. aşamaya kadar sürtünme açısındaki  $\phi^b$  değerinde değişiklik gözlenebileceğini söylemişlerdir.

Karlınasari ve ark. (2010)'nın yaptıkları çalışmada, tropikal volkanik residüel zeminler üzerinde üç eksenli konsolidasyonlu-drenajlı doygun olmayan zemin metodu (TXCD-UNSAT) ile bir seri araştırma yapılmıştır. Doygun olmayan zeminlerin kayma direncinin yapısal davranışı iki farklı yöntem ile analiz edilmiştir. Numune doyurulduktan sonra 1,8 kg/cm<sup>2</sup> hücre basıncı ve 0,8 kg/cm<sup>2</sup> geri basınç altında konsolide edilmiştir. Numuneye üstten 0,8 kg/cm<sup>2</sup> hava basıncı, alttan 0,4 kg/cm<sup>2</sup> geri basınç ile kılcal gerilme uygulanmıştır. Şekil 2.4'te uygulanan kılcal gerilme değerinin artması ile elde edilen kayma gerilmesindeki artış gösterilmiştir. Hava giriş değerinin 0,30 kg/cm<sup>2</sup> değerinin altında olması durumunda veya kılcal gerilme değerinin 0,09 kg/cm<sup>2</sup> ile 0,29 kg/cm<sup>2</sup> arasındaki değerlerinde  $\phi'$  açısı ile  $\phi^b$  açısının hemen hemen aynı değerlerde olduğu sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 2.4. Kılcal gerilme ve kayma direnci arasındaki ilişki (Karlınasari ve ark., 2010).

Tripathy ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, eksen kaydırma tekniğini kullanarak düşük plastisite özelliğine sahip sıkıştırılmış zemin numunelerinin kılcal gerilmelerini ölçmüşlerdir. Dinamik sıkıştırılmış zemin numunelerinin statik olarak sıkıştırılmış numunelere göre daha çabuk kılcal gerilme dengesine ulaştığını ve daha büyük emmeler sergilediklerini söylemişlerdir. Üzerinde çalışılan numuneleri hem standart kompaksiyon hem de ağır kompaksiyon teknikleri ile hazırlamışlardır. Fabrikada özel olarak imal edilmiş bir kalıp vasıtası ile statik olarak hazırlanmış numuneler de elde edilmiştir. Statik ve dinamik yöntemlerle hazırlanmış olan numuneler 12-14 mm kalınlığındadır. Basınç plakası deney düzeneği ile belirlenen kılcal gerilmenin dengelenme süresinin 270 dakika ile 400 dakika aralığında olduğu belirtilmiştir. Numunelerin su içeriğinin %7,9'den %10,7 değerine yükselmesi ile kılcal gerilme 154 kPa'dan 45,8 kPa değerine düşmüştür. Şekil 2.5.'te farklı su içeriklerinde ve farklı sıkıştırma enerjilerinde hazırlanan numunelere ait emme değerleri verilmiştir. En düşük su içeriğinde (ortalama %7,1) elde edilen kılcal gerilme farkı yaklaşık 47 kPa olarak bulunurken, en yüksek su içeriğinde (ortalama %9) kılcal gerilme farkı yaklaşık 77 kPa olarak elde edilmiştir. 50 kPa emme değeri için dengelenme süresinin yaklaşık olarak 1 saat olduğu belirtilmiştir. Sıkıştırma enerjisine bakılmaksızın, numune içerisindeki doygunluk derecesinin artmasının dengelenme süresini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda emme değerinin artması ile dengelenme süresinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 2.5. Farklı su içeriği ve sıkıştırma enerjinde kılcal gerilme değerleri (Tripathy ve ark., 2011).

Mendes ve ark. (2012) yaptıkları çalışmayla, doymun olmayan zeminlerde su ve hava fazlarının değişkenlikleri sebebiyle numunelerin hacim değişimlerini ölçmenin zor olduğunu söylemişlerdir. Bu sebeple, üç eksenli hücreyi çevreleyen suyun hacim değişimini ölçerek numunede meydana gelen hacim değişimini ölçmenin gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Wheeler tarafından modifiye edilen üç eksenli sistemde, suyun emiliminden kaynaklanan problemlerden kaçınmak için iç hücre duvarı camdan dizayn edilmiştir. Aynı zamanda iç ve dış hücreler için ayrı birer kapak kullanarak iki farklı hücre davranışı sergilenmiş ve iki hücre arasındaki basınçlar eşit tutularak su emilimini tamamen ortadan kaldırmak amaçlanmıştır. Bu tasarımda gerçekleştirilen diğer bir ayrıntı ise, emme sondasının deney devam ederken kullanıcı tarafından istenildiği zaman çıkarılıp takılabilir olmasıdır. Kullanılabilecek olan numune çaplarının 38–100 mm aralığında olabileceğini söylemişlerdir. Hücrelerin su ile doldurulması esnasında her iki hücrenin de üst kısmında hava sıkışması meydana geldiğini ve bu sorunun iç hücrenin üst tarafına uygulanan bir vakum ile minimuma indirildiğini söylemişlerdir. Basınçların dengelenmesi için 1 aylık bir zaman diliminin bile beklenmesi durumunda hücrenin üst taraflarında hava kabarcıklarının oluştuğu gözlemlenebilmektedir. Bu hava kabarcıklarının üstesinden gelmek için numuneye uygulanan net gerilmenin 0'a yakın tutulup hücre basıncının artırılması gerektiğini ve

bu durumda numunede herhangi bir deformasyon meydana gelmeyeceğini bildirmişlerdir.

Liu ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, doymun olmayan zeminlerin dinamik davranışlarının da ıslatma-kuruma etkisini araştırmak için üç eksenli deneyler yapmışlardır. Üç eksenli numuneler bulamaç yöntemi ile hazırlanmıştır. Deney boyunca numunelerin kuru yoğunluğu, su içeriği, dane boyutu dağılımı ve zemin suyu karakteristik eğrileri ölçülerek değerlendirilmiştir. Bulamaç yöntemi ve kompakte edilerek hazırlanan numunelere statik ve dinamik deneyler uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçları kıyaslayarak bulamaç yönteminin doğruluk oranını %96 bulmuşlardır. Bulamaç yönteminin en önemli avantajının, bir karışımdan birden fazla numune elde edilebilmesi olduğunu söylemişlerdir.

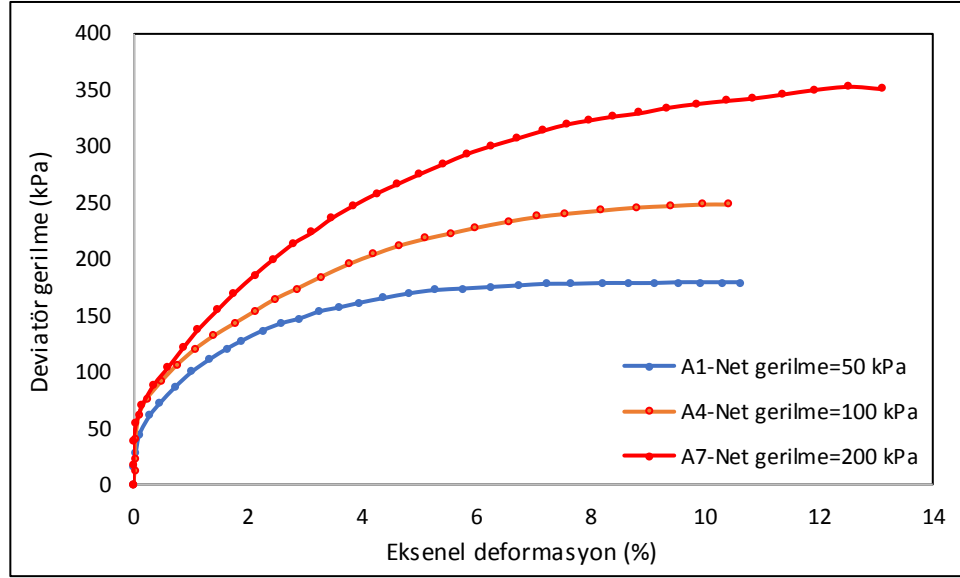
Muñoz ve ark. (2011) yaptıkları çalışmada, filtre kağıdını hem ıslak hem de kuru olarak kullanmışlardır. Filtre kağıdı tekniğinin güvenilirliğini ölçmek için tansiyometre tekniği ile yapılan ölçümlerle filtre kağıdı deney sonuçlarını kıyaslamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre; önceden ıslatılmış bir filtre kağıdının uygun bir kalibrasyon eğrisi kullanıldığı takdirde tekrardan emme ölçümü için kullanılabilceğini söylemişlerdir. Deneysel çalışmalarla elde edilen emme verileri yüksek kapasiteli tansiyometre sonuçları ile yakın sonuçlar vermiştir. Filtre kağıdının hem ıslak hem de kuru olarak deneye tabi tutulmasının mümkün olduğunu ve ıslak emme ölçümünün dengelenme açısından daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir.

Ye ve ark. (2010) doymun olmayan ve yavaş şişme gösteren zeminlerin zemin-su tutma eğrilerini ve emme kontrollü üç eksenli deney sonuçlarını incelemişlerdir. Zemin su tutma eğrilerini (SWRC) kullanarak doymun olmayan zeminlerin kayma direncini tahmin etmek üzerine çalışmışlardır. SWR eğrilerinin doymun olmayan zeminlerin hidrolik davranışlarını tanımlamak için çoğunlukla kullanıldığını söylemişlerdir. Üç eksenli testler için 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmıştır. Kesme aşamasında numune %15 deformasyondan önce pik değere ulaştığında, ulaşılan noktadaki değer pik deviatör gerilme olarak alınmıştır. Aksi durumda %15 deformasyon durumundaki değer pik değer olarak kabul edilmiştir. Farklı



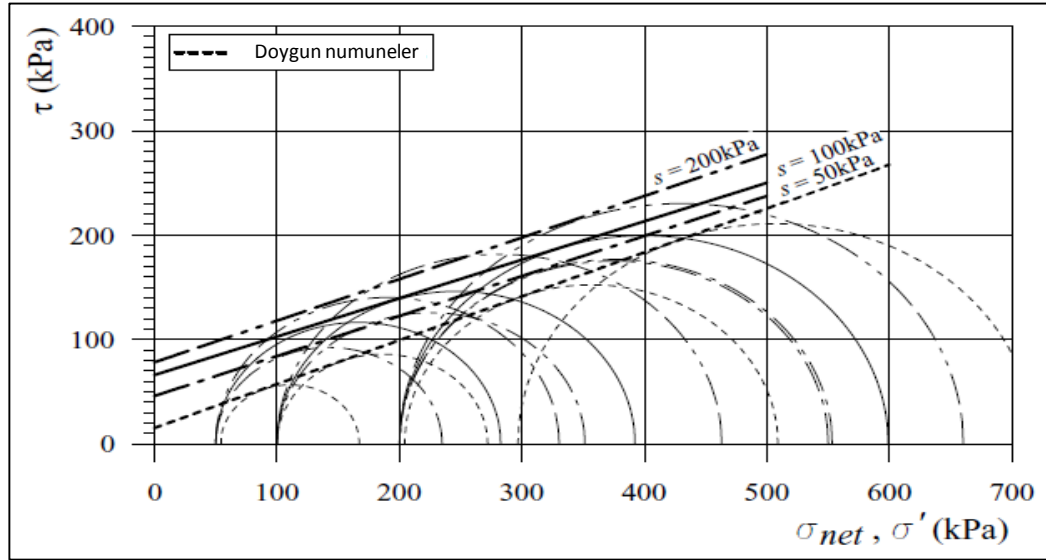
araştırmacıların denklemleri üzerinde çalışmalar yapmış ve en uygun denklemi bulmaya çalışmışlardır. Yapmış oldukları deneylerin sonuçları ile araştırmacıların sunmuş olduğu denklemleri karşılaştırdıklarında en uygun denklemin Vanapalli ve ark. (1996a)'da verilmiş olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Farulla ve Rosone (2012) yaptıkları çalışmada, sıkıştırılmış tektonik killerin doymuş olmayan ortamdaki, kayma direnci özelliklerini araştırmayı amaçlayan deneysel çalışmalarının sonuçlarını sunmuşlardır. Kayma direncini, emme kontrollü üç eksenli hücre kesme testleri ile dinamik sıkıştırılmış numuneler üzerinde araştırmışlardır. Emme kontrollü yüksek hava giriş değeri özelliğine sahip eksen kaydırma deney tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunedeki eksenel deformasyon, hücrenin dışına yerleştirilen transformatörün (LVDT (doğrusal değişken diferansiyel transformatör)) pistonda meydana gelen eksenel yer değiştirmeyi ölçmesine göre hesaplanmıştır. Doymuş olmayan sıkıştırılmış tektonik killerin kayma direncini, 50-200 kPa aralığında net gerilme ile 50-200 kPa arasında kılcal gerilme değerlerinde konsolidasyonlu-denajlı emme kontrollü şartlar altında üç eksenli testler ile araştırmışlardır. İlk aşamada numune 50 kPa net gerilmede ve 50 kPa kılcal gerilmede dengelenmiştir. Dengelenme aşaması, numunedeki su içeriği değişiminin günlük %0,02 değerinden daha düşük değerlerde ölçüldüğü zaman başarıyla tamamlanmış kabul edilmiştir. Dengelenme için gerekli süre yaklaşık olarak 700-800 saat aralığında olmuştur. Daha sonra bazı numuneler için net gerilmeyi sabit tutarak, emmeyi 100-200 kPa değerlerine artırmışlardır. Numuneye su giriş ve çıkış aşamalarında dengelenme zamanının çok uzun olması sebebi ile bazı deneyler çok aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Deney aşamasında uygulanan eksenel kesme hızı  $v=0,028$  mm/s ve sıcaklık değeri ise  $20C^0$  olarak ayarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda gerilme-şekil değiştirme grafiği ( $q-\epsilon_a$ ) incelendiğinde numunenin düşük plastisiteli bir davranış sergilediği görülmüştür. Maksimum deviatör gerilme değerini %10-12 eksenel deformasyon gerçekleştiği noktada elde etmişlerdir. Emmenin artması ile kayma direnci açısının da arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Şekil 2.6.'da farklı numuneler ile farklı net gerilmelerde yapılan deneysel çalışma sonuçlarını göstermişlerdir.



Şekil 2.6. Üç eksenli deney sonuçları (Farulla ve Rosone 2012).

Şekil 2.7.'de aynı deneysel çalışmaya ait Mohr daireleri çizimleri ve kırılma zarfları gösterilmiştir. Görselde yer alan  $s$  harfinin numunelere ait kılcal gerilme değerini ifade ettiğini söylemişlerdir.



Şekil 2.7. Emmenin etkisi ile çizilen mohr daireleri ve kırılma zarfları (Farulla ve Rosone 2012).

Rassam ve Cook (2002), DOZ'lerin kayma direnci davranışlarının belirlenmesinin karmaşık ve zaman alıcı bir test programına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, doymayan zeminlerde kırılma zarfını oluşturabilmek için deney sayısının en aza indirilmesinin avantajlı olduğunu söylemişlerdir. Çalışmada,

DOZ'lerin kayma direncine ait kırılma zarfını tahmin etmek için Rassam ve Williams (1999) tarafından önerilen ilişki kullanılmıştır. Rassam ve Williams (1999), doymun ve doymun olmayan zeminlerin üç boyutlu kayma direnci zarflarını belirlemek için aşağıdaki (Denklem 2.1) fonksiyonu önermişlerdir.

$$\tau = \alpha + \sigma * \tan \phi' + \psi * \tan \phi' - (\psi - \psi_e)^\beta (\gamma + \lambda\sigma) \quad (2.1)$$

Bu denklemde  $\tau$  zeminin kayma direncini,  $\sigma$  net gerilmeyi,  $\psi$  kılcal gerilmeyi,  $\phi'$  doymun durumdaki efektif kayma direnci açısını,  $\psi_e$  hava giriş değerini,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$  ise dolgu parametrelerini temsil etmektedir.

Önerdikleri fonksiyonun doğruluğunu test etmek için emme değerlerini 100 kPa'a kadar düşük, 1000 kPa'a kadar orta ve 10000 kPa'a kadar yüksek olmak üzere sınıflara ayırmışlardır. Fonksiyondan elde edilen sonuç ile deneysel sonuçların uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Rassam ve Cook 2002).

Rahardjo ve ark. (2004) yağışla oluşan eğimli zeminlerin kayma direnci özelliklerini araştırmışlardır. Test edilen zemin, statik kompaksiyon kullanılarak yeniden oluşturulan bir zemin örneğidir. Deneysel çalışmalarda konsolidasyonlu drenajlı (CD) ve sabit su içeriği (CW) deney yöntemleri kullanılmıştır. Beş farklı kılcal gerilme serisinde CD deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir seri için üç farklı net gerilme uygulanmıştır. 50 kPa kılcal gerilme ve 100, 150 kPa net gerilme altındaki numunelerde kesme aşaması başladığında, ilk önce toplam hacimlerde bir miktar artma eğilimi gözlenmiştir. Yazarlar bunun sebebini, düşük net gerilme altındaki kılcal gerilme etkisi olarak yorumlamışlardır.

Chen ve ark. (2013) doymun olmayan zeminlerin mukavemet özelliklerini tanımlamak için bir teorik model geliştirmişlerdir. Doymun olmayan zeminlerin kayma direnci, kesme deneyleri sonucundaki numunenin nem içeriğine bağlıdır. Bu sebeple geliştirilen bu teorik modelin parametrelerinin, doymun zeminlerin mukavemet parametrelerine ve doymun olmayan zeminlerin hidrolik özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Mevcut kayma direnci parametrelerini belirlemede kullanılan

denklemlerin geoteknik problemlerin analizinde kullanıldığını fakat bunun uygulamada bazı problemler oluşturabileceğini belirtmişlerdir.  $\phi^b$  açısının kolay belirlenemediğini ve kullanılan mukavemet parametrelerinin fiziksel temelinin kesin olmadığını dile getirmişlerdir. Zemin su tutma eğrisinin (SWRC) doymun olmayan zeminlerin emme dayanımını ve kayma direncini tahmin etmek için kullanılabilceğini belirtmişlerdir. SWRC deney sonuçlarından doymun olmayan zeminlere ait fiziksel özellik sonuçlarının, kesme dayanımı gibi sonuçların tahmin edilmesinin, doymun olmayan zemin deneylerini laboratuvarında uygulayarak sonuç elde etmeden daha kolay olduğunu söylemişlerdir.

Nuntasarn ve ark. (2017) kompakte edilerek hazırlanan siltli kum numunelerin kılcal gerilme ve drenajlı kayma direnci arasındaki ilişkiyi belirlemişlerdir. Numuneleri %6,5 su içeriği ve %95 rölatif kompaksiyonla (maksimum kuru yoğunluk  $2,06 \text{ t/m}^3$ ) hazırlamışlardır. Basınç plakası testinden numunelerin SWC eğrilerini belirlemişlerdir. Kılcal gerilme ve drenajlı kayma direnci arasındaki ilişkiyi belirlemek için doymun ve doymun olmayan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneyler yapılmıştır. Doymun numunelerin efektif kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) ve efektif kohezyon ( $c'$ ) değerleri belirlenmiştir. Doymun olmayan numunelere 100 kPa sabit net gerilme ve 30, 180, 280 kPa kılcal gerilmeler uygulanmıştır. Doymun durumda yapılan CD testleri sonucunda  $\phi'$  açısı  $31^\circ$ ,  $c'$  ise 54 kPa bulunmuştur. Doymun olmayan deneylerde ise  $\phi^b$  açısı  $28^\circ$  elde edilmiştir.

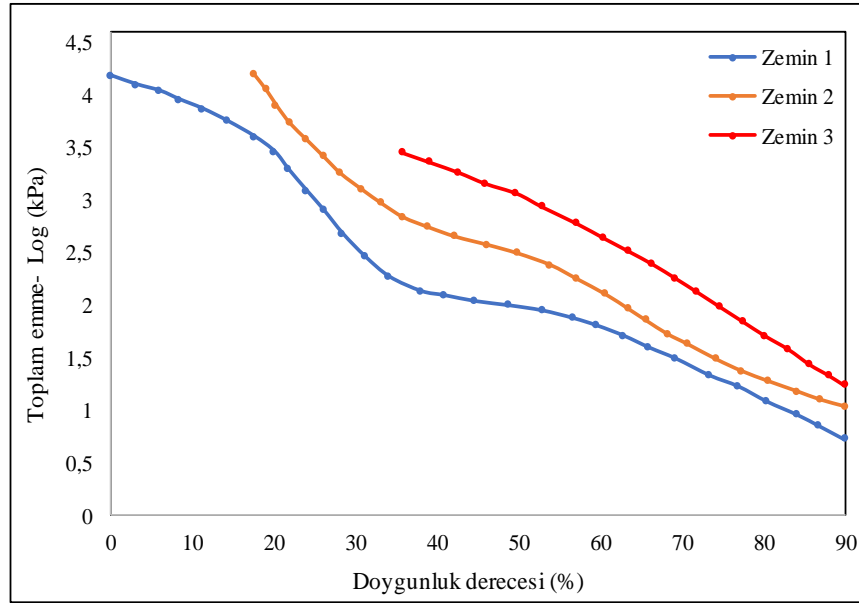
Farouk ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada, kohezyonsuz zeminler üzerinde doymun olmayan zemin deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda kayma direnci için kılcal gerilmenin önemli bir değişken olduğunu söylemişlerdir. Ticari adı PR33 olarak bilinen kumda, kılcal gerilmenin kayma direnci karakteristiğine olan etkisi araştırılmıştır. Bu etki üç eksenli deneyde kesme aşaması boyunca kılcal gerilme ve sabit su içeriği değişkenleri kullanılarak incelenmiştir. Deneylerde eksen kaydırma tekniği kullanılmıştır. Deney numuneleri 0,1 mm ile 0,5 mm arasında değişen boyuttaki daneciklerden oluşmaktadır. Doymun olmayan kumda efektif kohezyon değeri 0 olmasına rağmen, deneyler sonucunda bir miktar kohezyon değerinin elde edildiği görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde, yüksek net gerilme altındaki kılcal

gerilme değişiminin, düşük net gerilme altındaki kılcal gerilmeden daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle deneyler yapılırken düşük net gerilme ve kılcal gerilmelerin kullanılmasını önermişlerdir.

Houston ve ark. (2008) kum, silt ve düşük plastisiteli kil içeren dört numune üzerinde üç eksenli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Doygun olmayan zeminler için literatürden alınan SWCC verileri ile doygun zemin verileri ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Doygun olmayan zemin özellikleri, doygun zemine ait SWC eğrilerinden ve gradasyon dağılımlarından elde edilmiştir. Numunelere ait kesme davranışına etki eden hacim değişimleri incelenmiştir. Eksen kaydırma tekniği kullanılarak konsolidasyonlu-drenajsız (CU) deneyler gerçekleştirilmiştir. Plastik özelliği olan numuneler (NP) için kesme oranı 0,004 mm/dk iken NP olan zeminler için kesme oranı 0,02 mm/dk olarak uygulanmıştır. Çalışma sonuçlarına bakıldığında emme ile kayma direncinin doğru orantı göstermediği bulunmuştur. Hacim değişim davranışının hem net normal gerilmeye hem de emmeye bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Emme değeri ne kadar yüksek ve net normal gerilme ne kadar düşük ise kayma direncinin de o eğilimde artacağı ifade edilmiştir.

Nam ve ark. (2011) çalışmalarında, doygun olmayan deney yöntemleri konusunda literatürde çok araştırma yapılmasına rağmen, bu çalışmaların uygulamaya nasıl dönüştürülebileceği konusunun merak edilen bir konu olduğunu belirtmişlerdir. Doygun olmayan zemin mekaniğinde hem zamanı hem de maliyeti düşürebilmek adına az sayıda numuneden çok veri elde edilmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Fattah ve ark. (2013)'e göre zemin emmesi, doygun olmayan zeminlerin nem durumunu tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Irak'ta farklı özellikte üç farklı zemin numunesine, tuz ekleyerek farklı doygunluk derecelerine sahip numuneler hazırlamışlardır. Hazırlanan numuneler içerisinde kil yüzdesi az olanın toplam emmesini Şekil 2.8.'de gösterildiği üzere daha yüksek bulmuşlardır.



Şekil 2.8. %0 tuz oranına sahip üç zemin için toplam emme ve doymunluk derecesi arasındaki ilişki (Fattah ve ark., 2013).

Her bir numunenin toplam ve kılcal gerilmesi filtre kağıdı metodu kullanılarak ölçülmüştür. Doymunluk derecesinin azalması ile kılcal gerilmenin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Karışımlara eklenen tuz yüzdesinin artması ile aynı doymunluk derecesine sahip numunelerde kılcal gerilme daha yüksek bulunmuştur. Likit limiti %40'tan düşük ve kil içeriği yaklaşık %70 olan numuneler için maksimum emme elde edilmiştir. Ayrıca zeminlere tuz ilavesinin hem kılcal gerilmeyi hem de toplam emmeyi artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Alim ve ark. (2009) çalışmalarında SWC eğrisinin belirlenmesinin kolay olduğunu ve zaman alıcı olmadığını söylemişlerdir. Basınç plakası hücresi içerisindeki yüksek hava giriş değerine sahip seramik disk birçok kişi tarafından kullanılmaktadır. Günümüzde, membran filtresi SWC eğrisini belirlemede seramik diske alternatif olarak kullanılmaktadır. Fakat deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre membran filtresi tek defa kullanımdan sonra özellikle iri daneli zeminler için tekrar kullanılamamaktadır. SWC eğrileri paslanmaz tel örgülü membran filtresi ve paslanmaz tel örgüsüz ile elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; SWCC belirlenirken paslanmaz tel örgülü membran filtresinin kullanılabilirliği belirtilmiştir. Membran filtresinin üzerine paslanmaz tel örgü yerleştirildiği takdirde filtrenin tekrar kullanılabilirliğini de söylemişlerdir.

Hong ve ark., (2016) bir membran ve zamana duyarlı bir reflektömetre ile modifiye edilmiş basınç plakası kullanarak zemin-su karakteristik eğrilerinin çoklu döngüsünü tahmin etmişlerdir. Söz konusu çoklu döngü ile basınç plakası içindeki numuneler önce doyurularak emme basınçları ölçülmüş, hemen ardından numuneden su çekilerek ölçüm yapılmış ve emme basınçları hesaplanmıştır. Dört farklı dane boyutu ve boşluk yapısına sahip numuneler hazırlanmıştır. Seramik disk yerine membranın kullanılması, daha yüksek hidrolik iletkenlik ve yapısının daha ince olmasından dolayı SWCC deney süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Yapılan çoklu döngü deneyleri sonucunda ilk döngüde (kurutma işlemi sırasında) numunelerden elde edilen SWC eğrisinin en büyük olduğunu ve daha sonraki eğrilerin birbirine çok yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Maaitah (2012) SWC eğrisinin doymayan zeminlerde geçirgenlik fonksiyonunun tahmin edilmesi için esas parametre olduğunu belirtmiştir. Negatif boşluk suyu basıncı ölçümünün maliyetli ve zaman alıcı olduğunu, doğru ölçebilmek için yüksek güvenilirlikte bir tekniğe ihtiyaç duyulduğunu söylemiştir. Test aşamasının zor olduğu bilindiği için, teorik bir model ile doymayan zeminlerin davranışlarını anlamının bir çözüm sunabileceğini söylemiştir.

Thu ve ark. (2007) laboratuvarında ölçülen SWC eğrilerinin genellikle 0 hücre basıncı altında olduğunu buna karşın arazideki zemin danelerinin belirli bir hücre basıncı altında bulunduğunu söylemişlerdir. Statik olarak sıkıştırılmış siltli numunelerin SWC eğrileri üç eksenli hücre kesme deney cihazında elde edilmiştir. Farklı kılcal gerilmeler altında izotropik konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. SWC eğrileri incelendiğinde, artan net gerilme altında hava giriş değerinin de arttığı görülmüştür.

Tang ve ark. (2018) tansiyometre ile kılcal gerilmeyi kontrol ederek doymayan zeminler için kesme dayanımı testleri gerçekleştirmişlerdir. MH ve ML sınıfı zemin numuneleri üzerinde hem direk kesme hem de üç eksenli deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. İki deneyin sonuçları arasında çok az farklılık bulunmuştur. Yapılan üç eksenli deneyler sonucunda, 100 kPa'lık bir kılcal gerilme aralığı için ML zemin numunelerinde yaklaşık 57 kPa, MH zemin numunelerinde ise yaklaşık 30 kPa'lık bir toplam kohezyon artışı bulmuşlardır.

Sreedeeep ve Singh (2005), doygun olmayan zeminlerde zeminin türü ve dane dağılımının zemin emmesine etkisini incelemişlerdir. Araştırmalarında kullandıkları silt ve kilin emme değerlerini tansiyometre kullanarak ölçmüşlerdir. Zemin türünün emmeye olan etkisini araştırmak için silt ve kil numunelerden aynı su muhtevasında numuneler hazırlanmıştır. Yapılan emme ölçümlerinde siltli numuneler 40 kPa emmeye ulaşırken, killi numuneler yaklaşık 70 kPa değerine ulaşmıştır. Killerin daha yüksek emme değerlerine sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Hoyos ve ark. (2020) orta plastisiteli kili zeminlerin statik sıkıştırılması ile hazırlanan numuneler üzerinde 0-200 kPa aralığında net normal gerilme ve 0-300 kPa aralığında kılcal gerilme altında kayma direnci parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Artan kılcal gerilme ile birlikte kayma direncindeki artışın doğrusal olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

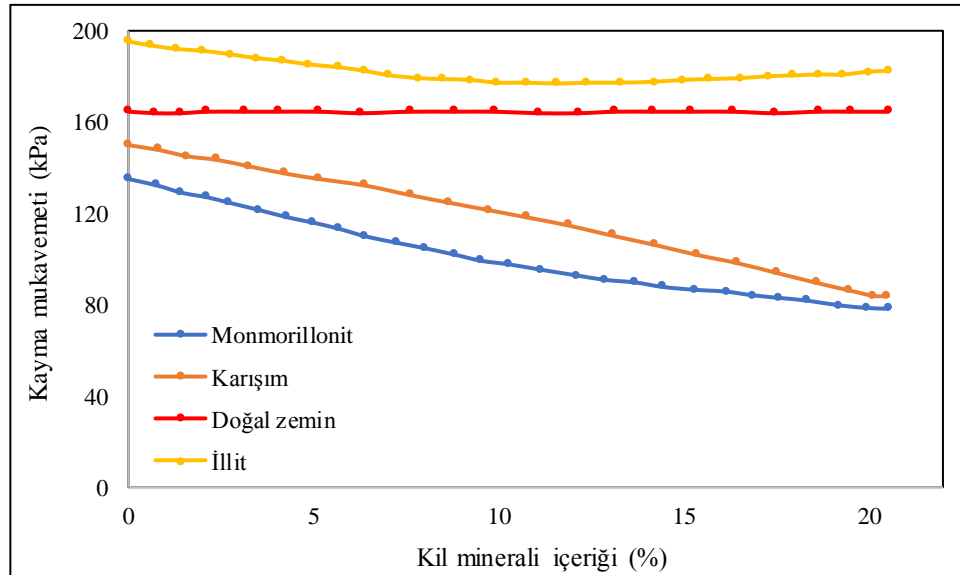
Abd ve ark. (2020) Irak'tan aldıkları numuneyi modifiye edilmiş üç eksenli hücre kesme deney cihazı ile deneylere tabi tutmuşlardır. Deneylerde kılcal gerilme 0-100 kPa aralığında ve her deneyde 10 kPa arttırılarak uygulanmıştır. Deneyler sonucunda kayma direnci ile kılcal gerilme arasındaki ilişkinin iki kısma ayrıldığını söylemişlerdir. Birinci kısmın lineer, ikinci kısmın ise non-lineer sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Kılcal gerilmenin zeminin elastik davranışını arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca artan gerilmeye ait durum değişkenlerinin zemine ait kayma direnci açısı değerini de arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Kassab ve ark. (2021) doygun olmayan zeminlerin kayma direnci davranışını belirlemek için bir dizi kesme deneyi yapmışlardır. Nil kili üzerinde farklı su içeriklerinde numuneler hazırlamışlardır. Numunelere ait kılcal gerilme değerlerini filtre kağıdı tekniği ile belirlemişlerdir. Yapılan kesme deneyleri sonucunda kılcal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

Wang ve ark. (2021), doygun olmayan zeminlerde farklı mineral birleşimindeki killerin ve mikro yapılarının kayma direncine etkilerini araştırmışlardır. Kil mineraline



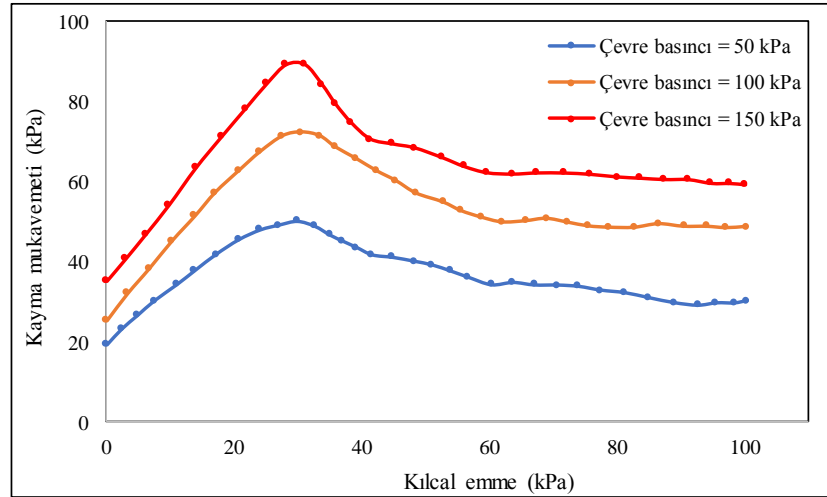
%7, %14 ve %21 oranlarında illit, montmorillonit ve bu iki mineralin birleşimi eklenecek kuma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçları Şekil 2.9.'daki gibi sunmuşlardır.



Şekil 2.9. Kil mineralleri ile kayma direnci arasındaki ilişki (Wang ve ark., 2021).

Şekil 2.9.'da illit ile hazırlanan zemin numunesinin kayma direncinin arttığı görülmektedir. Montmorillonit ise zeminin kayma direncinde azalmaya sebep olmuştur. %7, %14 ve %21 ilave ile hazırlanan numunelerde illit katkısının kayma direnci üzerinde değişken sonuçlar verdiği, montmorillonit katkısının ise kayma direncini azalttığı belirlenmiştir. Montmorillonitte meydana gelen bu azalmanın montmorillonit mineralinin güçlü su emme potansiyeli ile zeminlerde şişme meydana getirdiğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir (Wang ve ark., 2021).

Mekkiyah ve ark. (2021) aşırı konsolide killi zeminlerde yoğunluk ( $18,50 \text{ kN/m}^3$ ) ve su içeriği (%18) sabit tutularak modifiye edilmiş üç eksenli hücrede bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir. Numunelere 50,100 ve 150 kPa çevre basınçları uygulanmıştır. Sonuçlar, kılcal gerilme arttırıldıkça, doymun olmayan zeminin kayma direncinin yaklaşık 30 kPa emme değerine kadar arttığını göstermiştir. Sınır değeri aşıldıktan sonra (30-40 kPa kılcal gerilmeden sonra) kayma direncinde bir azalma olduğunu bulmuşlardır (Şekil 2.10.)



Şekil 2.10. 50, 100 ve 150 kPa çevre basıncı deney sonuçları (Mekkiyah ve ark., 2021).

Aşırı konsolide zeminlerde yapılan doymun olmayan deneyler için kılcal gerilme değişkenine bağlı olarak kayma direncindeki artışın tepe noktasının maksimum 30 kPa olabileceğini söylemişlerdir. Bu değerden daha fazla olan kılcal gerilme değerlerinde kayma direncinde azalma meydana geleceğini belirtmişlerdir (Mekkiyah ve ark., 2021).

Barahona ve ark. (2021) siltli kum ile oluşturulan silindirik numuneler üzerinde üç eksenli hücre kesme deneyleri yapmışlardır. Deneylerde kullanılan kesme hızının gerilme-şekil değiştirme davranışına ve hacimsel değişime olan etkisini incelemişlerdir. Numuneleri izotropik koşullarda sıkıştırdıktan sonra 15 ve 45 kPa sabit emme uygulamışlardır. Hazırlanan numunelere 2 ve 32 kPa/h yükleme hızları uygulamışlardır. Drenajlı yükleme aşamaları, %0,5 ve %2,50/sa yükleme hızları altında ve aynı emme seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki kesme hızı ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre gerilme-şekil değiştirme grafiklerindenki pik değere ulaşmada kesme hızının önemli rol oynadığını söylemişlerdir. %2,5/saat yükleme hızındaki deviatorik gerilmenin, %0,5/saat hızından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

## **BÖLÜM 3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLER**

### **3.1. Giriş**

Boşlukların tamamının su ile dolu olmayan zeminlere doygun olmayan zeminler denilmektedir (DOZ). Zeminlerin tam olarak doygunluk seviyesine ulaşamadığı tabakalar için bu kavram kullanılmaktadır. Yer altı su seviyesinin altındaki zeminlerin boşluklarının tamamı su ile doludur ve doygun zemin olarak isimlendirilirler. Doygun olmayan zeminler ise yer altı su seviyesinin üstündeki kurak veya yarı kurak ortamlarda bulunmaktadır. Yer altı su seviyesinin üst kısmında bulunan tabakalarda meydana gelebilecek en ufak bir hava varlığı o zemin tabakasını doygun olmayan zemin durumuna getirmeye yeterlidir.

Geoteknik mühendisliğinde, su seviyesinin hemen üzerindeki tabaka (yani kılcal bölge) esas olarak suyla doldurulabilecek boşluklara sahip olsa da, yaygın olarak bu tabakalar “doygun olmayan zemin bölgesi” olarak isimlendirilir. Doygun olmayan zemin tabakalarına vadoz bölgesi ismi de verilmektedir (Fredlund, 2019).

Doygun olmayan zeminlerin (DOZ), doygun olan zeminlerden bir takım önemli farkları vardır. Bu farklar özellikle mekanik davranışlara etki eden parametrelerdir. Zemin emme gerilmesi ve zemin su karakteristik eğrisi gibi özellikler doygun olmayan zeminlere ait değişkenlerdir ve kayma dayanımına doğrudan etki etmektedirler (Gülşen, 2013).

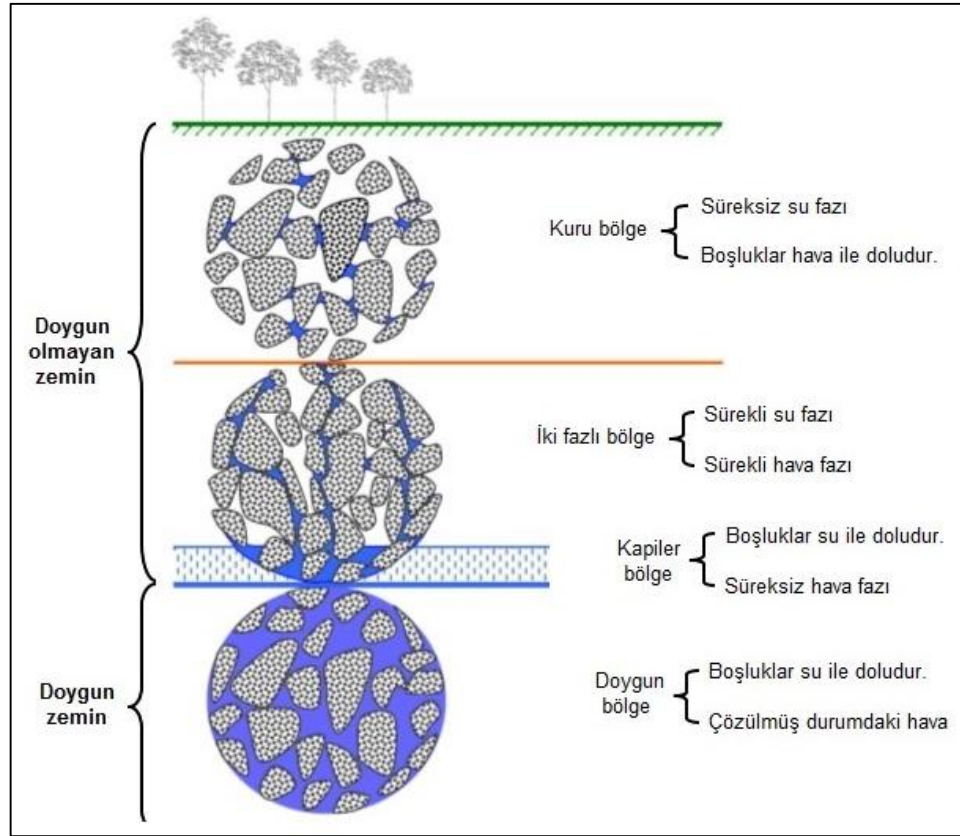
Zeminler üzerine inşaa edilen yapıların güvenliği, üzerine oturduğu zeminin dayanımına bağlıdır. İnşaaı gerçekleşen veya gerçekleşecek olan tüm yapılar aslında doygun olmayan zemin üzerine inşaa edilmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

Doygun olmayan zeminler üzerine yapılan incelemeler, doygun zeminler ile eş zamanlı olarak ortaya çıkmamıştır. Zemin mekaniğinde zamanla ortaya çıkan ve gelişen birtakım olaylar, doygun olmayan zemin mekaniğinin varlığını hissettirmiştir. Sığ temellerdeki çoğu zemin tipik olarak doymamış durumdadır. Doygun olmayan zemin mekaniği sistemi 1970'li yılların başında kurulmuş ve gelişimi hiç durmamıştır (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Bu gelişmeler bir süre daha devam ettikten sonra 1970 yıllarının sonunda doygun olmayan zemin mekaniği kavramı oluşmaya başlamıştır (Fredlund ve ark., 2012). Zemin tabakaları, toprak dolgular, toprak barajlar ve yollar genellikle sıkıştırılmış zeminlerdir. Sıkıştırılmış zeminler sürekli olarak doymamış durumda bulunurlar ve negatif boşluk suyu basıncına sahiptirler (Tripathy ve ark., 2011).

Zeminlerin doygun kabul edilerek mühendislik tasarımlarının yapılması ve bu tasarımlara ait çözümlerin gerçekleştirilmesi ile aşırı güvenli tarafta kalındığı bilinmektedir. Bunun yanında doygun olmayan zemin tasarımlarına ait çözümler doygun durum kabulünden çok farklı olduğu ortaya çıkmaktadır (Önalp, 2002). Doygun olmayan zeminlerin kayma dirençleri doygun durumdakinden daha yüksektir. Doygun olmayan zeminler için doygun varsayımı yapmak taşıma gücü ve oturma açısından hatalı ve ekonomik olmayan çözümler ortaya koymaktadır (Özocak, 2003). Fattah ve ark. (2013) mühendislik problemlerinin birçoğunun, danecikler arasındaki boşlukların kısmen hava ve kısmen de su ile doldurulduğu doygun olmayan zeminler ile alakalı olduğunu ifade etmişlerdir.

Zemin mekaniği teorisi genellikle doygun zeminler üzerinde geliştirilmiştir. Bu sebeple, doygun zemin üzerine yapılan araştırmalar literatürde daha fazla yer almaktadır. Dünyanın önemli bir bölümünün kurak veya yarı kurak iklim koşullarına sahip olduğu düşünüldüğünde bu alanlarda doygun durum koşullarına ulaşılması imkansızdır (Rasool, 2014; Hamid, 2005).

Şekil 3.1.'de gösterilen zemin profilinin incelenmesi doygun olmayan zeminler için yer altı su seviyesinin öneminin daha iyi anlaşılmasına katkı sunmaktadır (Rasool, 2014).



Şekil 3.1. Doymun olmayan zemin profili (Rasool, 2014).

Bir bölgedeki zeminin doymun olmayan zemin durumuna gelebilmesinde o bölgenin yöresel iklim koşullarının önemli etkisi vardır. Bu nedenle zeminlerde negatif boşluk suyu basıncı, herhangi bir jeolojik katmanda meydana gelebilir. Kalıntı bir zemin, bir gölet yatağı veya taşkın ovası çökelleri gibi ortamlar doymun olmayan zemin olabilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Temellerin altında, istinad yapılarının arka dolgularında ve toprak veya kaya dolgu barajların gövde yapılarında kullanılan çoğu yapay dolgular genellikle doymamış durumdadırlar (Hamid, 2013).

Doymun olmayan zeminlerin davranışlarına etki eden en önemli parametreler gerilme durum değişkenleridir. Doymun olmayan zeminlerde gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelemek için üç eksenli deneyler ile kesme kutusu deneyleri yapılabilir. Söz konusu gerilme durum değişkenlerinin net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ) ile

kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) olduğu ve doygun olmayan zemin davranışlarının bu değişkenler ile başarıyla belirlendiği belirtilmiştir (Handoko ve ark., 2013).

### 3.2. Doygun Olmayan Zeminlerin Özellikleri

Yakın geçmişe kadar Dünya genelinde doygun olmayan zeminler ile alakalı çalışma ve bilgi yeterli düzeyde değildi. Fakat son birkaç on yılda bu konuya olan ilgi artmış ve bu konuda çok ciddi çalışmalar ve buluşlar yapılmaya başlanmıştır.

Doygun olmayan zemin özelliklerinin belirlenmesinde, zaman açısından uzun süreye ihtiyaç duyulması ve maliyet açısından ekonomik olmaması araştırmacıları bu konuda farklı yöntemler geliştirmeye yöneltmiştir. Bu farklı yöntemlerin odak noktası, uygulamada kabul edilebilir metodolojiler ve uygulanabilir yöntemlerin belirlenmesidir (Fredlund, 2019).

Kayma direnci ve hacim özelliklerinden kaynaklanan çok çeşitli zemin problemleri bulunmaktadır. Her türlü problemde oluşturulan doygun olmayan zeminlere ait kırılma zarfları, hava giriş değerine kadar doğrusal artar iken hava giriş değerinden sonra doğrusal olmayan davranış göstermektedir (Fredlund, 2006). Doygun olmayan zemin özellikleri, zemin emmesi ile ilgili olarak doğrusal olmayan matematiksel fonksiyonlar şeklini alır. Bu özellik doygun olmayan zeminlerin hemen hemen tüm fiziksel özelliklerinin yanı sıra kayma direnci özellikleri için de geçerlidir. Doygun olmayan zeminler ile kayma direnci arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak için birden fazla projeden elde edilen veriler yeterli olmayabilir (Fredlund ve ark., 2012).

Vanapalli ve ark. (1996b) doygun olmayan zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinin mümkün olduğunu ancak bu özelliklerin doğrudan ölçülmesinin çok zaman alıcı ve pahalı olduğunu söylemişlerdir.

Doygun olmayan bir zemin için önerilen çoğu tahmini kayma direnci denklemi, “Zemin-su karakteristik eğrisi” (SWCC) veya zeminin sınıflandırma özellikleri ile ilgilidir. Yaygın olarak doygun olmayan zeminlerin kesme dayanımı değerlerinin

tahmini için iki bağımsız gerilme durumu değişkeni ve SWCC kullanımı tercih edilmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

Doygun olmayan zemin özelliklerinin belirlenmesi için bazı tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. Aynı zamanda zeminlerin özelliklerinin tahmin edilmesi konusunda SWC eğrilerinden de ciddi şekilde yararlanılmaktadır (Thieu ve ark., 2000).

Doygun olmayan zeminlere ait özelliklerin belirlenmesi için, numune hazırlama yöntemlerinin, konsolidasyon basıncının, su içeriklerinin, yoğunlukların ve emme basınçlarının bilinmesi gerekmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

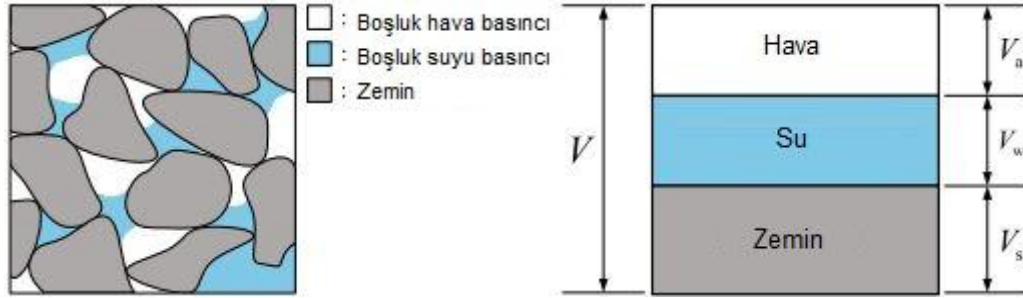
### **3.2.1. Doymun olmayan zeminlerin faz özellikleri**

Zemini oluşturan fazların bilinmesi zemin karışımını oluşturan gerilme durumunun nasıl tanımlanacağı açısından önemlidir. Doymun olmayan zeminlerin ikiden fazla fazı vardır ve boşluk suyu basıncı, boşluk hava basıncından düşüktür. Bir zemin tabakasının kazı, sıkıştırma ve zeminin işlem görmesi ile doymun olmayan duruma gelmesi mümkündür. Doymun olmayan bir zemin;

1. Katı,
2. Su,
3. Hava

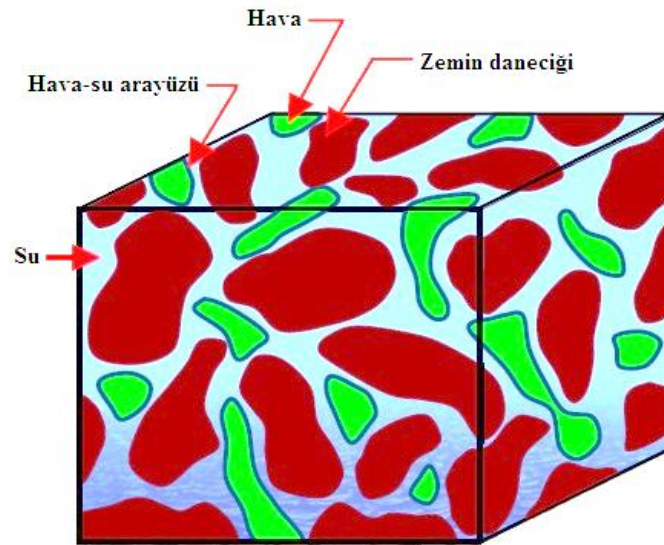
olmak üzere üç faz ile tanımlanmaktadır (Fredlund ve ark., 2012).

Doygun olmayan zemin boşluklarında Şekil 3.2.'de gösterilen su ve hava fazı bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Doymun olmayan zemin faz diyagramı.

Mevsim koşullarına göre üst tabakada zeminlerin doymunluk dereceleri artabilmektedir. Çünkü artan yağışlar sebebi ile su seviyeleri yükselebilmektedir. Bununla birlikte doymun olmayan zeminler için dördüncü fazın varlığının da bilinmesi gerekmektedir. Söz konusu faz hava-su arayüzü (*Contractile skin*) olarak adlandırılmaktadır. Doymun olmayan zeminlere ait üç boyutlu bir blok Şekil 3.3.'te gösterilmiştir. Tüm bu fazları içerisinde barındıran bir zemin profilinde çok küçük hacimli bir havanın varlığı, o zemini doymamış hale getirmeye yeterlidir (Fredlund ve Morgenstern 1977).



Şekil 3.3. Doymun olmayan bir zemin daneciğine ait dört fazlı bir elementin temsili gösterimi (Fredlund, 2005).

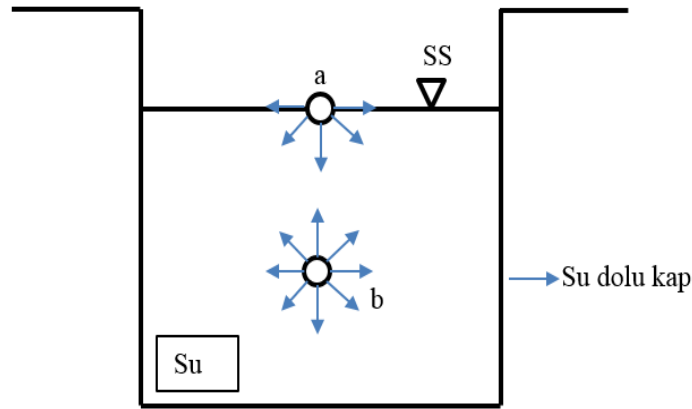
İklim değişiklikleri nedeniyle boşluk suyu basıncındaki bir artışla zeminin hacmi ve kayma direncinde de değişiklikler meydana gelmektedir. Boşluk suyu basıncındaki artış ile zeminin taşıma kapasitesinde ve elastik davranışında azalmalar oluşmaktadır.



Bu bilgiler doymun olmayan zeminlerin mekanik davranışlarının kontrolünde negatif boşluk suyu basıncının önemini göstermektedir (Hamid, 2005).

### 3.2.1.1. Hava-su arayüzü

Doymun olmayan zeminde dördüncü faz olarak bulunan hava-su arayüzü (*Contractile skin*), yüzey gerilimi özelliği taşımaktadır. Bu yüzeye su zarı adı da verilmektedir. Yüzey gerilimi, hava-su arayüzündeki moleküller üzerine etki eden moleküllerarası kuvvetlerden kaynaklanmaktadır (Fredlund ve ark., 2012). Bu kuvvetler, suyun iç kısmında bulunan ve Şekil 3.4.'te gösterilen moleküller üzerine etki eden kuvvetlerden farklıdır.



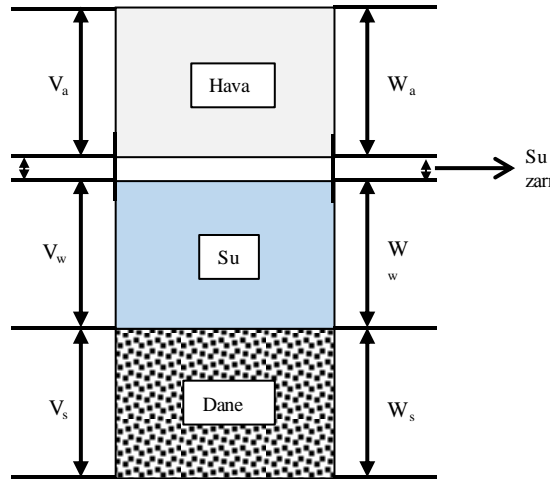
Şekil 3.4. (a) Hava-su arayüzü kuvvetleri, (b) Su içindeki moleküller arası kuvvetler (Özocak, 2003).

Hava-su arayüzü doymun olmayan zeminlerde boşluk suyu basıncından ( $u_w$ ) daha büyük olan olan boşluk hava basıncına ( $u_a$ ) dayanmaktadır. Suyun yüzey geriliminin artması hava-su arayüzünü etkileyecektir. Hava-su arayüzü, zeminin boşlukları boyunca dokunmuş ince bir zar gibi davranarak, hava ve su fazları arasında sabit bir bölüm oluşturur. Hava-su ara yüzündeki gerilme durumu değişiklikleri, doymun olmayan bir zeminin su içeriği, hacmi ve kayma direnci üzerinde etkili olabilir. Hava-su arayüzü, bitişik hava ve su fazlarından farklı fiziksel özelliklere sahiptir ve zemin davranışını etkilemek için zemin yapısı ile etkileşime girer. Hava-su arayüzü zeminin hacim-kütle özelliklerindeki değişiklikler göz önüne alındığında su fazının bir parçası olarak düşünülebilir. Bununla birlikte, hava-su arayüzü, doymun olmayan bir zeminin

gerilme durumunu ve dış yüzey davranışını tanımlarken bağımsız bir aşama olarak düşünülmelidir (Fredlund ve ark., 2012).

Terzaghi (1943), hava-su arayüzü ile ilişkili yüzey gerilimi özelliğinin oynadığı önemli rolü şöyle vurgulamıştır: Doymun bir kil topunda, suyun buharlaşmasıyla meydana gelebilecek olan büzülmenin gözlemlenmesiyle anlaşılabilir. Su buharlaştıkça esasen toplam gerilme durumunda herhangi bir değişiklik olmayabilir. Bununla birlikte, hava-su arayüzü zemin kütleğinde önemli miktarda hacim değişmesine neden olabilir. Başka bir deyişle, hava-su arayüzü su uzaklaştırıldığında zemin parçacıklarını birbirine çeken elastik bir zar gibi davranır.

Hava-su arayüzü, doymun olmayan zeminlerde gerilme durumlarının ve zemin davranışlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Fredlund ve ark., 2012).



Şekil 3.5. Doymun olmayan zemin için dört fazlı blok diyagramı (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Özocak, 2003).

Fredlund, (2005) Şekil 3.5.'te gösterildiği gibi doymun olmayan zeminlere ait dört fazlı zemin daneciklerinin blok diyagramını göstermiştir. Doymun olmayan zeminlerdeki hava fazının deney aşamasında sıvı fazına girip çıkabileceğini söylemiştir.

### 3.3. Doymun Olmayan Zeminler İçin Gerilme Durum Değişkenleri

Doymun olmayan zemin mekaniğine ait araştırmaların temelinde doymun zemin mekaniği parametreleri yer almaktadır. Deneysel aşamaların kolaylığı, hesap

yöntemlerinin daha basit olması ve güvenli tarafta kalması sebebiyle doygun zeminler literatürde daha geniş yer kaplamaktadır (Özocak, 2003).

Gerilme durum değişkenleri, bir materyalin davranışını analiz edebilmek için kullanılacak formüllerin oluşumunda önemli rol üstlenmektedir. Bir malzemenin fiziksel davranışının bilinmesi, o bilime ait gelişme için önemli bir zemin oluşturmaktadır. Doygun olmayan zemin davranışının bilimsel bir devamlılık sağlaması için, gerilme durum değişkenleri temel bir yapı taşı niteliğindedir (Fredlund ve ark., 2012). Zemin mekaniği problemlerinde doygun olan zeminlere ait tek gerilme değişkeni; efektif gerilmedir ( $\sigma - u_w$ ) (Özocak, 2003). Efektif gerilme değişkeni, zemin özelliklerinden bağımsızdır ve kumlu, siltli veya killi zeminlere uygulanabilmektedir. Doygun zeminlerde efektif gerilme, zeminin herhangi bir noktasındaki tüm gerilmelerden ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) hesaplanabilmektedir (Terzaghi, 1936).

Terzaghi (1936) doygun zeminlerin davranışını kontrol eden gerilme durumu değişkenlerini aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.1) ile tarif etmiştir:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $\sigma'$  efektif gerilmeyi,  $\sigma$  toplam gerilmeyi,  $u_w$  boşluk suyu basıncını tanımlamaktadır.

Efektif gerilme doygun zeminlere ait gerilme durum değişkenidir. Doygun zeminlerde hacim değişim işlemleri ve kayma direnci parametreleri efektif gerilme değişkeni tarafından kontrol edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları, doygun zeminlerin mekanik davranışını tanımlamak için efektif gerilme değişkeninin bilinmesinin yeterli olduğunu göstermiştir (Fredlund ve ark., 2012).

Doygun zeminlerde tek parametre ( $\sigma - u_w$ ) ve iki değişken ( $\sigma$  ve  $u_w$ ) durumu söz konusudur. Efektif gerilmenin daha iyi anlaşılabilmesi için üç yönlü matris formatı Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_w) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - u_w) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - u_w) \end{bmatrix}$$

Şekil 3.6. Doygun zemin numunelerine ait farklı yönlereki gerilme durum değişkenlerinin matris ve küp formu (Fredlund ve ark., 2012).

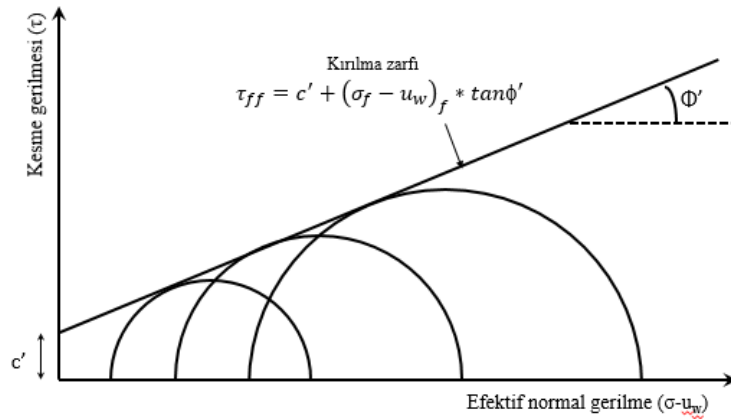
Doygun bir zeminin kayma direnci Mohr-Coulomb göçme kriteri ve efektif gerilme değişkeni kullanılarak tanımlanmaktadır (Terzaghi, 1936). Buna göre doygun bir zeminin kayma direnci için kullanılan eşitlik (Denklem 3.2) ile temsil edilmektedir.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f * \tan \phi' \quad (3.2)$$

Bu denklemde,  $\tau_{ff}$  yenilme durumunda göçme düzlemindeki kayma direncini,  $c'$  efektif kohezyon değerini,  $(\sigma_f - u_w)_f$  yenilme durumundaki efektif gerilmeyi,  $\sigma_{ff}$  yenilme durumundaki toplam gerilmeyi,  $u_{wf}$  yenilme durumundaki boşluk suyu basıncını,  $\phi'$  efektif içsel sürtünme açısını (kayma direnci açısı) ifade etmektedir.

Denklem 3.2.'den anlaşılacağı üzere kayma direnci ile efektif gerilme arasında doğrusal bir ilişki vardır.

Doygun bir zemin için kırılma zarfı, yenilme anındaki gerilme durumunu temsil eden bir dizi Mohr dairesine teğet çizilerek elde edilir. Çizginin eğimi kayma direnci (içsel sürtünme) açısı olan  $\phi'$  parametresini tanımlar ve bu çizginin ordinat eksenini kestiği nokta ise efektif kohezyon ( $c'$ ) olarak isimlendirilir. Doygun zeminlere ait kırılma zarfı ve doygun zeminlerde geçerli olan parametreler Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Doymun zeminler için Mohr Coulomb kırılma zarfı.

Bishop (1959), doymun olmayan zeminler için kayma direncinin farklı durum değişkenleri açısından değerlendirilmesi gerektiğini söylemiştir. Coleman (1962), üç eksenli test sonuçlarının yorumlanması için aksenal basınç ( $\sigma_1 - u_a$ ), hücre basıncı ( $\sigma_3 - u_a$ ) ve boşluk suyu basıncı ( $u_a - u_w$ )'nin kullanılmasını önermiştir.

Fung, (1965) gerilme durum değişkenlerinin, zeminlere ait fiziksel özelliklerden bağımsız birer parametre olduğunu ifade etmiştir.

Matyas ve Radhakrishna (1968), doymun olmayan zeminlerin hacim değişikliği davranışını tanımlamak için “durum değişkenleri” kavramını tanıtarak, hacim değişikliğinin  $\sigma - u_a$  ve  $u_a - u_w$  parametrelerine bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Fredlund (1973) ve Fredlund ve Morgenstern (1977) doymun olmayan zemin mekaniğine ait formül önermişlerdir. Önerilen bu formüller gerilme durum değişkenleri ile test edilmiş ve kayma direnci hacim değişikliği davranışını tanımlayan kurucu denklemleri formüle etmek için kullanmışlardır.

Doymun olmayan bir zeminin gerilme durumunu ve dolayısıyla kayma dayanımını tanımlamak için iki bağımsız gerilme durumu değişkeninin gerekli olduğu belirtilmiştir (Fredlund ve ark., 1977).

Doygun olmayan zeminlerin gerilme durum değişkenlerine ait çok sayıda öneri bulunmaktadır. Gerilme durumu değişkenlerinin uygun şekilde seçimi için aşağıdaki kriterler göz önüne alınmalıdır:

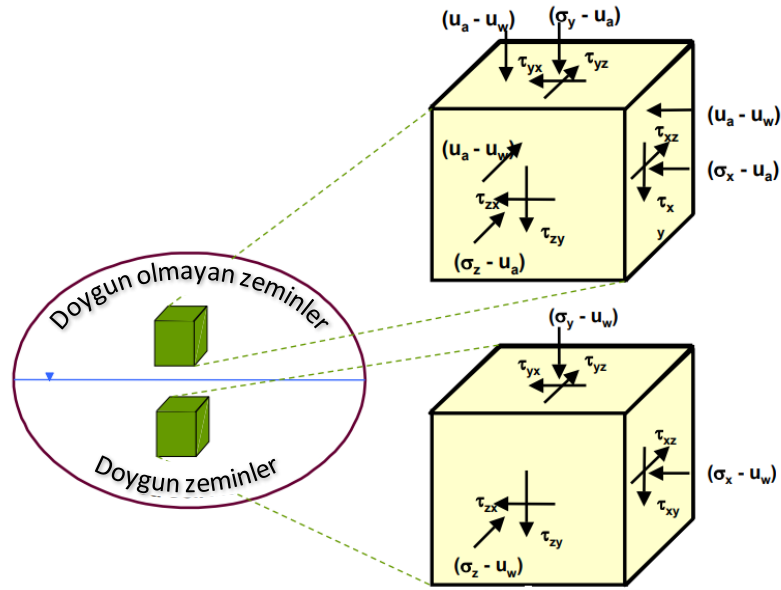
1. Laboratuvarında deneysel olarak test edilebilen değişkenler,
2. Denge hususları kullanılarak teorik olarak gerekçelendirilebilen değişkenler,
3. Gerilme bileşenleri mühendislik uygulamasında ölçülebilir ve
4. Sürekli ortam mekaniğinde durum değişkenlerinin tanımlanması ile belirlenen gereksinimleri karşılayan değişkenler olmalıdır (Fredlund ve ark., 2012).

Fredlund ve ark. (2012), doygun olmayan zeminlerin gerilme durum değişkenlerinin tanımlanması için üç kombinasyon tanımlamışlardır. Bu kombinasyonlar;

- a.  $\sigma - u_a$  ve  $u_a - u_w$ ,
- b.  $\sigma - u_w$  ve  $u_a - u_w$  ve
- c.  $\sigma - u_a$  ve  $\sigma - u_w$

Doygun olmayan zemin mekaniği problemlerinin formüle edilmesinde en geniş kabul gören yaklaşım, net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ) ve kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) kombinasyonudur. Doygun olmayan zeminler için hesaplamalar ve deneyler yapılırken kullanılan gerilme durum değişkenleri haricinde zeminlerin davranışına etki eden parametreler de vardır. Sıcaklık ve zaman bu değişkenlerin başında gelmektedir. Fakat sıcaklık değişkeni genellikle izotermal koşullarda kabul edilmektedir. Doygun olmayan zeminlerde birincil gerilme durum değişkenleri, zeminlerdeki hacim değişiklikleri, bozulma ve kayma direnci gibi parametreleri tanımlamak için kullanılırlar. Genellikle mühendislik problemleri çözümünde kullanılan gerilme durum değişkenleri, üç eksenli koordinat sistemi halinde gösterilirler (Fredlund ve ark., 2012).

Fredlund ve Rahardjo (1993) doygun ve doygun olmayan zemin mekaniğine ait gerilme değişkenlerini Şekil 3.8.'de üç eksenli bir koordinat sistemi ile sunmuşlardır.

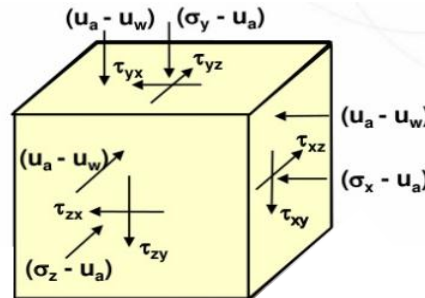


Şekil 3.8. Doygun ve doygun olmayan zemin değişkenleri küp formu (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Fredlund ve ark. (2012) doygun olmayan zeminlere ait gerilme durumu değişkenlerini üç yönlü matris formunda sunmuş ve bu değişkenlerin iki gerilme değişkeni halinde gösterilebileceğini açıklamıştır (Şekil 3.9.).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix}$$



Şekil 3.9. Doygun olmayan zeminde gerilme durum değişkenleri matris formu (Fredlund ve ark., 2012).

Her iki değişken ( $(\sigma-u_a)$ ,  $(u_a-u_w)$ ) içinde de boşluk hava basıncı değişkeni görülmektedir. Matris formundaki gerilme değişkenleri tek bir noktaya etkiyen küp yüzeyinde gösterilmiştir (Fredlund ve ark., 2012). Şekil 3.9., zemin yüzeyinden çıkarılan bir numuneye ait gerilme durum değişkenlerinin x, y ve z yönlerini göstermektedir. Bir numuneye ait doğunluk derecesinin ( $S_r$ ) %100'e yaklaşması durumunda boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) boşluk hava basıncına ( $u_a$ ) yaklaşır ve kılcal gerilme ( $u_a-u_w$ ) 0 olur. Bu durumda matris formdaki ikinci tensör kullanılmaz (Fredlund ve ark., 2012).

Gerilme durum değişkenlerinden olan kılcal gerilme, genellikle ya zemine uygulanır ya da ölçülür. Bu nedenle emme ölçümleri, doğun olmayan zemin problemlerinde çok sıklıkla kullanılmaktadır (Agus ve Schanz, 2007).

### 3.4. Doğun Olmayan Zeminlerin Kırılma Zarfı ve Kayma Direnci

Mohr-Coulomb (MC) kriteri, geoteknik mühendisliğinde kullanılan en yaygın yenilme kriteridir. Kırılma (yenilme) durumunda normal ve kayma gerilmeleri (veya maksimum ve minimum ana gerilmeler) arasındaki doğrusal ilişkiyi tanımlamaktadır (Fredlund ve ark., 2012).

Mohr-Coulomb kırılma zarfı izotropik bir malzemenin yenileceği koşulları tanımlayan temel gerilme kaynaklı doğrusal bir fonksiyondur (Labuz ve Zang, 2012).

Zeminlerin ve kayaların mukavemetleri evrensel olarak iki mukavemet parametresi ile sunulmaktadır: Bu parametreler efektif kohezyon ( $c'$ ) ve içsel sürtünme açısı ( $\phi'$ )'dır. Bu parametreler, mühendislik uygulamalarında, şev tasarımlarında ve güvenlik faktörleri hesaplamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır (Wu ve ark., 2019).

Doğun bir zemin için kırılma zarfı, iki eksenli grafik üzerinde göçme koşullarına karşılık gelen bir dizi Mohr dairesi çizilerek elde edilebilir. (Gebre, 2010).

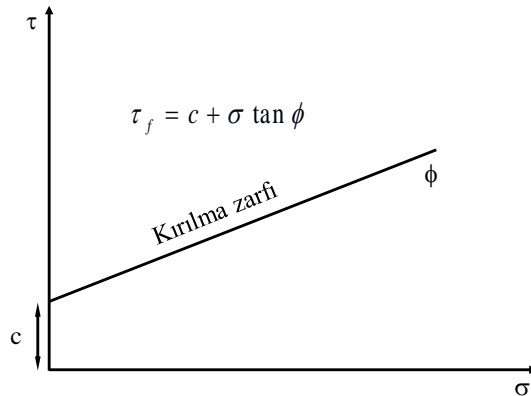


Doygun zeminlerde kırılma zarfı başlangıç noktasından (0'dan) geçen (normal konsolide zemin) bir çizgi ile ifade edilir. Mohr daireleri, bir zemin elemanındaki herhangi bir düzleme etki eden normal ve kayma gerilmelerinin durumunu temsil edecek şekilde çizilebilir. Mohr dairesinin MC göçme zarfının altında kaldığı durumlarda, kesme dayanımı aşılmadığından zemin yenilme göstermez (Lu ve Likos, 2004).

Kayma dayanımı, zeminin uygulanan kayma gerilmelerine dayanma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Sonuç olarak, kırılma zarfı yenilme koşullarının bir açıklamasıdır (Fredlund ve ark., 2012).

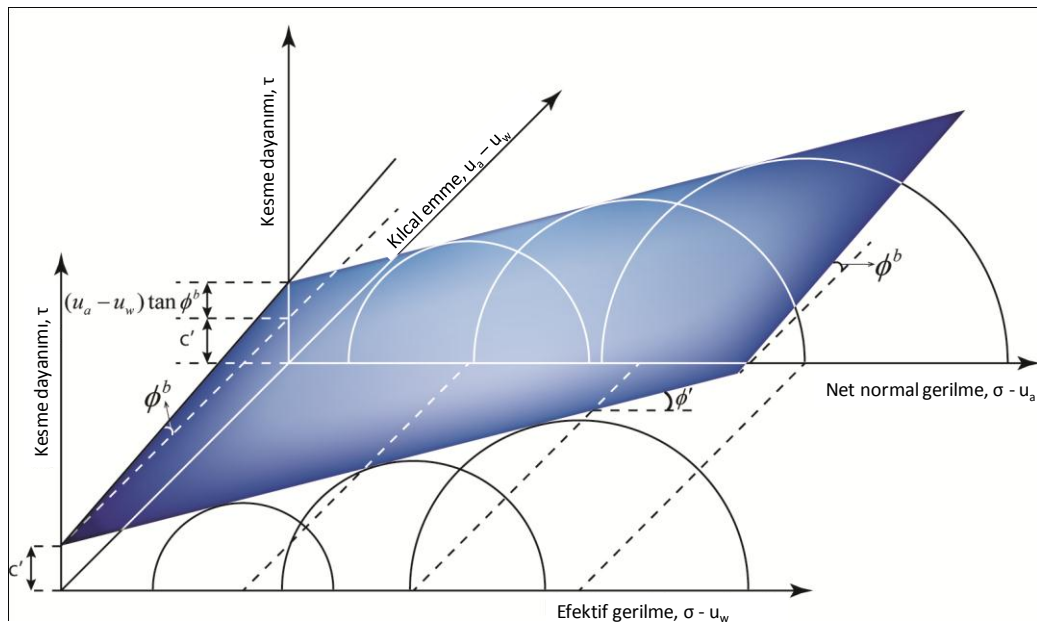
Yakın geçmişte yapılan birçok deneysel çalışmada zemin ve kayalara ait kırılma zarflarının doğrusal olamayacağı bulunmuştur. Bu sonucun iri daneli zemin yoğunluğundan kaynaklandığı bildirilmiştir (Wu ve ark., 2019). Hosseini ve Jesmani (2012) iri daneli zeminlerde kırılma zarfının kavisli olduğunu ve hücre basıncı, bağıl yoğunluk, ince dane içeriği, mineraloji ve kum danelerinin derecelenmesine göre değiştiğini belirtmiştir. Ancak, çoğu geoteknik çalışmalarda kırılma zarfı doğrusal çizilmektedir.

Doygun zeminlerde Mohr-Coulomb kriterine göre iki boyutlu kırılma zarfı Şekil 3.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Doygun zeminler için 2 boyutlu Mohr Coulomb göçme kriteri (Fredlund ve ark., 2012).

Mohr-Coulomb kırılma zarfı Fredlund ve ark. (1978) tarafından doygun olmayan zeminleri kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Doygun olmayan zeminlerdeki gerilme durum değişkenleri kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) ve net normal gerilmedir ( $\sigma - u_a$ ). Bu iki değişkene bağlı olarak DOZ' ler için Mohr daireleri ve kırılma zarfları üç boyutlu ekseninde Şekil 3.11.'de gösterildiği gibi çizilebilmektedir. Şekil 3.11.'de doygun zemin deney sonuçlarına ( $c'$  ve  $\phi'$ ) kılcal gerilme eksenini ilave edilerek doygun olmayan zeminler için kırılma zarfı çizilmiş ve bu sonuçlardan elde edilebilecek kayma yüzeyi gösterilmiştir (Fredlund ve ark., 1978).



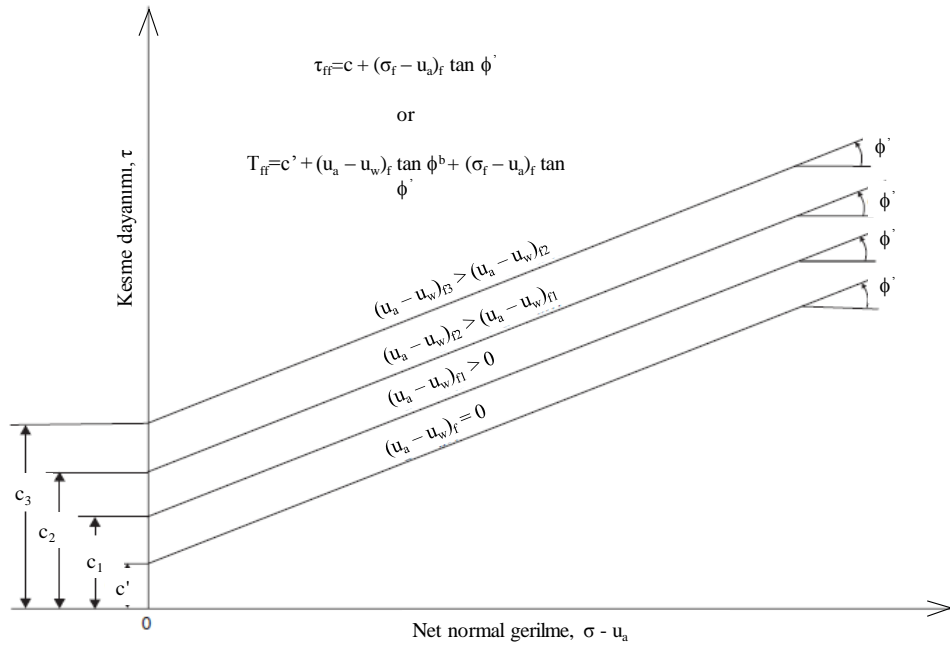
Şekil 3.11. Genişletilmiş Mohr-Coulomb yenilme yüzeyi (Fredlund ve ark., 1978).

Şekil 3.11.'de verilen grafikte deneysel test sonuçlarına bağlı kılcal gerilmeye göre çizilen kayma direnci zarfının doğrusal ve eğimli olduğu söylenmiştir (Fredlund ve ark., 2012). Aynı zamanda filtre kâğıdı deney sonucundan elde edilen kalıcı (rezidüel) emme değerinden daha yüksek emme değerlerinde silt ve kil içeriği yüksek olan zeminlerin kayma direnci zarflarının sıfır ordinat değerine doğru eğimli olabileceği ifade edilmiştir (Nishimura ve Fredlund, 2001). Kumlu zeminlerde ise kalıcı emme değerinden daha yüksek emme değerlerinde kayma direnci zarfının negatif ordinat değerlerine ulaşabileceği belirtilmiştir (Donald, 1956; Gan ve Fredlund, 1996).

Killi zeminlerde yapılan üç eksenli deneylerde kırılma zarfının doğrusal olması beklenmektedir. Daha iri daneli zeminlerde ise, kırılma zarfı eğimlerinin doğrusal olamayacağı belirtilmiş ve bunun nedeni olarak kalıcı su içeriği değerlerine daha düşük emme değerlerinde ulaşması gösterilmiştir. Doğrusal olmayan kırılma zarflarının bu davranışlarının diğer bir sebebi olarak uygulanan net gerilme değeri gösterilmiştir (Chen ve Hai, 2012).

Doygun numunelere ait çizilen kırılma zarflarından elde edilen içsel sürtünme açısının ( $\phi'$ ) doymamış durumda elde edilen kılcal gerilmeye bağlı emme açısı ( $\phi^b$ ) değerinden büyük olduğunu söylemişlerdir. Çeşitli zeminler için  $\phi^b$  ölçümlerinin sonuçlarını özetleyerek,  $\phi^b$  'nin  $\phi'$  değerinden daha küçük veya ona eşit olabileceğini göstermişlerdir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Zemin doygun duruma yaklaştıkça kılcal gerilme sıfıra iner ve boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) boşluk hava basıncına ( $u_a$ ) yaklaşır. Bu durumda üç boyutlu kırılma zarfı iki boyutlu  $\tau$  ile  $\sigma - u_a$  düzlemine indirgenmiş olur. Net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ) ile kesme dayanımı ( $\tau$ ) arasındaki ilişki Şekil 3.12.'de gösterilmiştir (Fredlund ve ark., 2012).



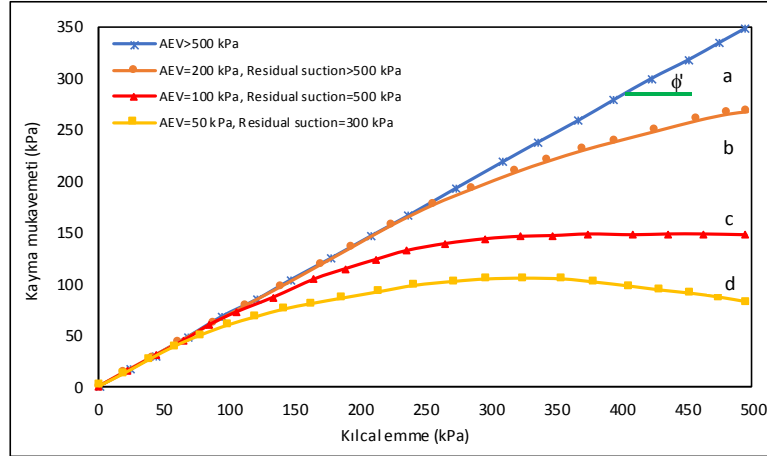
Şekil 3.12. Kırılma zarfının  $\tau$ 'ya karşı  $\sigma - u_a$  düzlemine yatay izdüşümü (Fredlund ve ark., 2012).

Kılcal gerilme azaldıkça kırılma zarfı doygun zemin kırılma zarfına doğru kademeli olarak azalır ve kohezyon değeri ( $c$ ) efektif kohezyon değerine ( $c'$ ) eşit olabilir (Fredlund ve ark., 2012).

### 3.4.1. Doygun olmayan zeminlerin doğrusal olmayan kırılma zarfı

Doygun olmayan zeminlere ait kırılma zarfları doğrusal bir davranış sergilemektedirler. Daha geniş bir zemin emme aralığında farklı zemin türlerindeki deneylerden, kayma direncine karşı kılcal gerilme ilişkisinin doğrusal bir ilişki ile sınırlandırılmaması gerektiği anlaşılmıştır. Doğrusal olmayan kırılma zarflarında  $\phi$  açısı düşük emme değerlerinde (zeminin hava giriş değerine kadar olan emme değeri) kayma direnci açısına ( $\phi$ ) eşit çıkmakta iken yüksek emme değerlerinde  $\phi'$  değerinden daha düşük sonuçlar elde edilmekte ve kırılma zarfı kavisli olmaya başlamaktadır. Fredlund ve ark. (2012) sonuç olarak  $\phi$  açısının kılcal gerilmemenin bir fonksiyonu olduğunu söylemişlerdir.

Fredlund ve ark. (2012) geniş bir kılcal gerilme aralığında eksen kaydırma tekniği kullanarak gerçekleştirdikleri üç eksenli hücre kesme deneyinde zeminlerin başlangıçta doygun gibi davranabileceğini göstermişlerdir. Düşük emme değerlerinde yapılan üç eksenli hücre kesme deney sonuçlarına göre çizilen kırılma zarflarının eğimi doygun zemin özelliklerini yansıtmaktadır. Zemindeki kılcal gerilme arttıkça zemin doygunluktan uzaklaşır. Bir zeminin hava giriş değeri büyük ölçüde zeminin dane dağılımına bağlıdır. Kumlar gibi iri daneli zeminler, killi zeminlere göre daha düşük kılcal gerilme değerlerinde doygun olmayan zemin kırılma zarfı davranışı sergilerler. Kumlar genellikle 10 kPa gibi düşük bir hava giriş değerine sahipken, killi zeminler 100 kPa'ın çok üzerinde bir hava giriş değerine sahiptir. Hava giriş değerinin, kayma direncine karşı kılcal gerilme ilişkisi ile çizilen kırılma zarfının kavisli olmaya başladığı nokta olduğunu söylemişlerdir.

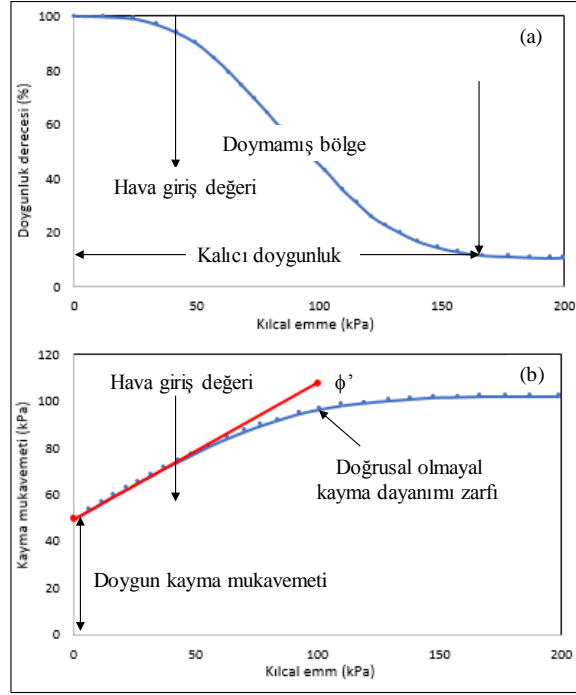


Şekil 3.13. Zemin cinsine bağlı olarak kırılma zarfı ve kayma direnci değişimi (Rassam ve Williams, 1999).

Şekil 3.13.'te farklı zemin numunelerine ait deneyler sonucunda elde edilen kırılma zarflarının değişimi gösterilmiştir. Burada (c) numunesine uygulanan hücre basıncının artırılması durumunda elde edilecek kırılma zarfı (b) numunesine benzer bir davranış göstermiştir (Chen ve Hai, 2012).

Kalıcı emme değerinin düşmesi veya hava giriş değerinin artması ile kırılma zarfından elde edilen  $\Phi^b$  değeri artmaktadır. Yüksek kılcal gerilme değerlerinde  $\Phi^b$  değeri, zeminlerin doygunluk oranına bağlı olabilmektedir (Chen ve Hai, 2012).

Doygun olmayan bir zeminin doğrusal olmayan kırılma zarfı, kayma direncinin zemin-su karakteristik eğrisi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Zemin-su karakteristik eğrisi (SWCC) ile kayma direncini tahmin edebilmek için analitik bir formül geliştirilmiştir. Bu formülde doygun zemin parametreleri ve zemin-su karakteristik eğrisi kullanılmaktadır (Vanapalli ve ark., 1996a). Zemin su karakteristik eğrisinden elde edilen parametreler ile doğrusal olmayan kırılma zarfı arasındaki ilişki Şekil 3.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Zemin-su karakteristik eğrisi ile kayma direnci arasındaki ilişki (Vanapalli ve ark., 1996a).

Şekil 3.14.'te SWCC'den elde edilen hava giriş değerinin doymun olmayan zemin numunelerinde çizilen kırılma zarfı için önemi gösterilmiştir. Şekil 3.14.'te gösterilen (a) grafiğinde numuneye ait SWCC çizilmiştir, (b) grafiğinde çizilen doymun olmayan zemin numunesine ait kırılma zarfının (a) grafiğindeki hava giriş değerine kadar doğrusal devam ettiği görülmektedir. Ayrıca (b) grafiğindeki hava giriş değerinden daha büyük emme değerlerinde kırılma zarfının doğrusal olmadığı (nonlinear) gösterilmiştir.

Doymun olmayan zemin numunelerindeki üç eksenli hücre kesme deneyleri gerilme durum değişkenlerine bağlı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Deneysel aşamalarda numunelere uygulanacak kılcal gerilme değerleri için numunenin SWC eğrileri çizilmiş ve hava giriş değerleri belirlenmiş olmalıdır. Elde edilen bu veriler ile numunelere ait Mohr daireleri üzerindeki kırılma zarfları çizilir ve buradan elde edilecek parametreler ile numunenin kayma direnci belirlenmiş olur.

Doymun olmayan zeminlerin kayma direnci, laboratuvarında hem üç eksenli hem de direk kesme test cihazları kullanılarak ölçülebilmektedir. Doymun olmayan zeminlerde

hava fazı bulunduğundan, geleneksel üç eksenli test cihazlarının modifikasyonu gerekli olmaktadır (Fredlund ve ark., 2012).

Çoğu mühendislik yapısının mukavemeti, üzerine oturdukları tabakaların dayanımlarına bağlıdır. Mühendislik yapılarının inşası için kullanılan zeminler genellikle doymun olmayan zeminlerdir. Doymun zeminler için kullanılan genel ilkeler doymun olmayan zeminler için de kullanılmaktadır. Zeminlerin gerilme durumunun değişmesi o zeminin mukavemetinin değişmesi anlamına gelmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

Kayma direnci, doymun olmayan zeminlerin temel özelliklerinden biridir (Sheng ve ark., 2011). Doymun olmayan bir zeminde kayma direncini belirlemeye yönelik testin iki aşamada gerçekleştiği düşünülebilir. Birinci aşama konsolide aşaması iken ikinci aşama yükleme esnasındaki drenaj kontrolüdür. Deney yöntemi, doymun zeminlerin deney yöntemine benzerdir. Drenajsız kesme aşamasında numuneden su çıkışına izin verilmez ve boşluk basınçlarında meydana gelen değişiklikler ölçülür veya kontrol edilir. Zeminin kayma direncinin belirlenmesinde yenilme anındaki gerilme durum değişkenlerinin bilinmesi gerekmektedir. Doymun olmayan zeminlerde boşluk suyu basınçlarını ölçerken veya kontrol ederken, uygun hava giriş değerine sahip yüksek hava girişli bir disk kullanılmalıdır. Yüksek hava girişli diskin olmaması, boşluk hava ve boşluk suyu basıncı arasındaki farkın ölçülmesi imkanını ortadan kaldırmaktadır (Fredlund ve ark., 2012).

Bishop (1959), Terzaghi (1943) tarafından doymun olmayan zeminlerin kayma direnci için önermiş olduğu eşitliğe (Denklem 3.3) ait değişkenlerin genişletilerek doymun olmayan zeminler için kullanılabileceğini söylemiştir.

$$\tau = c' + [(\sigma_n - u_a) + x * (u_a - u_w)] * \tan \phi' \quad (3.3)$$

Bu denklemde,  $\tau$  doymun olmayan zeminlerin kayma direncini,  $c'$  efektif kohezyonu,  $\phi'$  efektif içsel sürtünme açısını (kayma direnci açısı),  $(\sigma_n - u_a)$ , net normal gerilmeyi,

$(u_a - u_w)$ , kılcal gerilmeyi,  $X$  doygunluk derecesine bağılı parametreyi (0-1 aralığında olabilir) ifade etmektedir.

Bishop ve Blight (1963), Terzaghi (1943) tarafından önerilen kayma direnci denklemini yeniden değerlendirmişler ve net normal gerilme değişkenini güncellemişlerdir.

Doygun olmayan zeminlerdeki kayma direnci teorileri, doygun zeminlere ait kayma direnci teorilerindeki kavramların ve matematiksel denklemlerin uzantısı olarak önerilmiştir (Fredlund ve ark., 2012).

Fredlund ve Morgenstern (1977) doygun olmayan zemin davranışının iki bağımsız değişken olan net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ) ve kılcal gerilmeye ( $u_a - u_w$ ) bağılı olduğunu söylemişlerdir. Doygun olmayan zeminlere ait kayma direnci denkleminin de bu iki gerilme durum değişkenine bağılı olduğu ifade edilmektedir. Günümüzde doygun olmayan zeminlerin kayma direncinin değeri için hala geçerli olan eşitlik (Denklem 3.4) kullanılmaktadır (Bishop, 1959; Coleman, 1962; Fredlund ve Morgenstern, 1977; Fredlund ve ark., 1978; Fredlund ve ark., 2012).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) * \tan\phi' + (u_a - u_w) * \tan\phi^b \quad (3.4)$$

Bu denklemde,  $\tau$  doygun olmayan zeminlerin kayma direncini,  $c'$  efektif kohezyonu,  $\phi'$  doygun zemin için kayma direnci açısını,  $u_a$  boşluk hava basıncını,  $u_w$  boşluk suyu basıncını,  $(\sigma - u_a)$  net normal gerilmeyi,  $(u_a - u_w)$  kılcal gerilmeyi,  $\phi^b$  kılcal gerilmeye bağılı kayma direncindeki artışı gösteren açıyı ifade etmektedir.

Denklem 3.4.'te  $\phi^b$ , bir gerilme durum değişkeni sabiti olarak ele alınmakta ve kılcal gerilmenin artması ile meydana gelen olan toplam kohezyon artışına bağılı olarak hesaplanabilmektedir (Tang ve ark., 2018).

Net normal gerilmenin  $(\sigma - u_a)$  değişmesi, zeminin su tutma özelliğini etkilemekte ve kayma direnci üzerindeki kılcal gerilme katkısını da etkilemektedir (Rassam ve ark., 2002).



Doygun olmayan bir zeminin kayma direnci günümüzde hem analitik hem de grafiksel olarak gösterilebilmektedir. Kayma direncinin tanımında doğrusal olmama veya eğimli bir trende bağlı olma ihtimali de bulunmaktadır. Doygun olmayan zeminlerin kılcal gerilme ekseninde yer alan kayma direnci zarfındaki eğim,  $\phi^b$  olarak tarif edilmektedir. Buradaki, “ $\phi^b$ ” parametresi kılcal gerilme ile ilgili olan kayma direncinin açısıdır (Fredlund ve ark., 1978). Kayma direncindeki eğim düzlemsel veya eğik olabilir, yani  $\phi^b$  açısı sabit veya değişkendir. Bunun anlamı ise  $\phi^b$  değişkenin kılcal gerilmenin bir fonksiyonu olduğudur (Rassam ve Cook, 2002). Kılcal gerilmede meydana gelen değişimler kayma direncini doğrudan etkilemektedir (Sheng ve ark., 2011).

Bishop ve Eldin (1950), doygun bir zemin numunesinde negatif 90 kPa'a kadar boşluk suyu basınçlarının başarıyla ölçülebileceğini bildirmişlerdir. Boşluk suyu basınçları 1 atm'nin altına düştüğünde eksen kaydırma tekniğinin kullanılması gerektiğini öne sürmüşlerdir. Bu sayede kılcal gerilme değerinin elde edilebilmesi için gerekli olan boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basınçlarının eksen kaydırma tekniği kullanılarak elde edilebileceğini söylemişlerdir (Bishop ve Eldin, 1950; Fredlund ve ark., 2012).

### **3.5. Doygun Olmayan Zeminler İçin Üç Eksenli Deney Cihazı Modifiye Aşamaları**

#### **3.5.1. Eksen kaydırma tekniği**

Geleneksel üç eksenli ve direk kesme cihazlarında doygun olmayan zeminlerin kayma dirençlerini belirlemeye başlamadan önce cihazlarda birtakım modifikasyonların yapılması gerekmektedir. Doygun olmayan zemin gözeneklerinde hava ve suyun bulunması, doygun zeminlere göre daha karmaşık bir deney prosedürü ve tekniğinin uygulanmasına neden olmaktadır. Eksen kaydırma tekniği özellikle yüksek emme değerlerindeki doygun olmayan zeminleri test etmek için kullanılır. Temel olarak, eksen kaydırma tekniği uygulanırken hem boşluk hava basıncı hem de boşluk suyu basınçları pozitif basınç değerlerinde olmalıdırlar (Charles ve ark., 2007).

Doygun olmayan zeminlerde yapılan laboratuvar çalışmalarında, emmenin nasıl kontrol edileceği veya ölçülebileceği önemli bir konudur. Doygun olmayan zeminler için kılcal gerilmenin önemine önceki bölümlerde değinilmiştir. Eksen kaydırma tekniği, hava ve su fazlarının yüksek hava giriş değerine sahip gözenekli bir malzeme sayesinde birbirinden ayrılması ile gerçekleştirilir. Bu poroz malzemeler, seramik özellikte olmalı ve 1500 kPa basınç değerine dayanıklı olmalıdır. Bu seramik diskler doygun halde iken suyun geçişine izin verirken, havanın geçişine izin vermemektedir (Charles ve Menzies, 2007).

Gülşen (2013) eksen kaydırma tekniğinin, doygun olmayan zeminlerdeki kılcal gerilme basıncını yüksek hava giriş değerine sahip seramik diskler kullanarak kontrol altında tutma veya ölçme işlemi olduğunu söylemiştir.

Hilf (1956) eksen kaydırma tekniğindeki temel prensibin, standart atmosfer koşullarında ( $u_a=0$ ,  $u_w<0$ ) ve ( $u_a>0$ ,  $u_w\leq 0$ ) kılcal gerilme ölçümü ve kontrolünün yapılması olduğunu söylemiştir.

Vanapalli ve ark. (2008) eksen kaydırma tekniğinin atmosfer basıncından daha yüksek (100 kPa'dan yüksek) basınçlarda zemin numunelerine kılcal gerilme uygulanması veya belirlenmesi için kullanılabileceğini söylemişlerdir. Kullanılan bu diskler deney prosedüründe hava ile su fazını ayıran bir arayüz görevi görmektedir. Eksen kaydırma, kesme kutusu deneyinde, konsolidasyon (ödometre) deneyinde ve üç eksenli deneylerde emmenin kontrolü veya ölçümü için kullanılan bir tekniktir. Vanapalli ve ark. (2008) bu teknikteki problemlerden birinin hava sızıntıları olduğunu ifade etmişlerdir. Bu hava sızıntılarının ana kaynağının ise seramik diskin sınır hatlarında meydana gelen kaçaklar olduğunu belirtmişlerdir.

Ayrıca eksen kaydırma tekniğinde suyun zemine giriş ve çıkışına izin veren doymuş bir seramik disk haricinde, numuneden çıkan suyun toplanacağı ve numuneye su girişini sağlayan bir haznenin de bulunması gerekmektedir. Üç eksenli hücre kesme deneyi cihazında eksen kaydırma tekniğinin kullanılabilmesi için cihaz üzerinde;

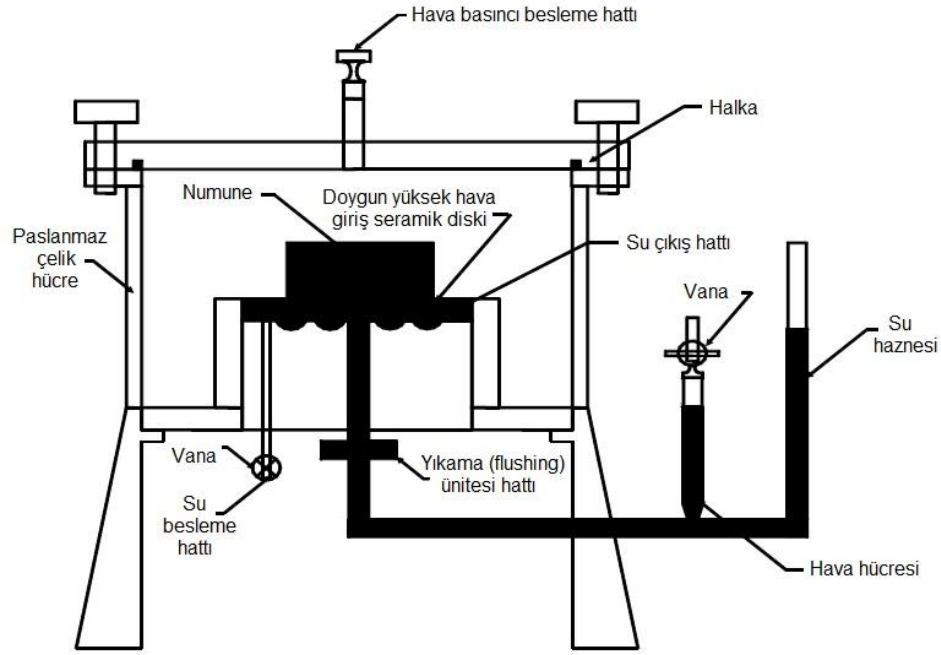
- a. Hava basınç odası,
- b. Yüksek hava giriş değerine sahip seramik disk (doygun durumda) ve bu diskin yerleştirildiği hücre tabanı,
- c. Seramik disk altındaki hava basıncını ölçmek için basınç ölçerler ve
- d. Diskin altında birikecek olan havanın dışarı alınması için gerekli bir yıkama (flush) sisteminin bulunması gerekmektedir (Tripathy ve ark., 2011).

Seramik diskin kullanılmadan önce doyurulması gerekmektedir. Doygunluğa ulaşan disk hava fazı ile su fazı arasında bir zar görevi görmektedir. Suyun yavaşça geçişine izin veren disk, hava giriş değeri aşılmadığı sürece havanın geçişine izin vermemektedir (Zhou ve Xu, 2015).

### 3.5.1.1. Eksen kaydırma tekniğinin çalışma prensibi

Vanapalli ve ark. (1999) eksen kaydırma tekniğine ait çalışma prensibini şu şekilde açıklamışlardır: Zemin numunesi paslanmaz çelik hücresi içerisindeki önceden doyurulmuş yüksek hava giriş diski üzerine yerleştirilir. Numune ile disk arasında boşluk kalmaması gerekmektedir. Numune diskin üzerine yerleştirildiği anda numunenin alt bölgesine bağlı olan bir su bulunması durumunda bu tüpte oluşacak gerilme, numuneye uygulanacak olan hava basıncı değeri ile dengelenebilmektedir. Boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) sıfırken (atmosfere açık) ve hava basıncı ( $u_a$ ) uygulandığında kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) elde edilir. Kılcal gerilmenin dengelenme süresi, numunenin içeriğine, numunenin boyutlarına ve diskin hava giriş değerine bağlıdır. 20 mm kalınlığındaki bir numunenin dengeye ulaşma süresi 3-6 saat arasındadır. Vanapalli ve ark. (1999) eksen kaydırma tekniğinin doygun olmayan zeminlerde kılcal gerilme ölçümleri için kullanılabilir en uygun yöntem olduğunu söylemişlerdir.

Şekil 3.15.'te eksen kaydırma tekniğinin şeması gösterilmektedir. Zemin numunesi doygun bir seramik disk üzerine yerleştirilir. Seramik disk altındaki su bölmesine bir tüp bağlanmaktadır.



Şekil 3.15. Eksen kaydırma tekniği çalışma prensibi (Vanapalli ve ark., 2002).

Şekildeki numunede kılcal gerilme 101 kPa değerindedir. Boşluk suyu basıncı doymuş seramik disk altında biriken su sayesinde ölçülür. Zemin ile temas halinde bulunan seramik disk zemine uygulanan kılcal gerilmeden daha büyük bir hava giriş değerine sahip olmalıdır. Diskin hava giriş değeri, havanın doymuş disk boşluklarından geçmeye başladığı değerdir. Hava ve su fazları arasındaki basınç farkı seramik diskin hava giriş değerini aştığında, hava su bölmesine girer. Seramik diskin altında bulunan su basıncı 101 kPa değerine yani atmosfer basıncına eşit değere yaklaştığında diskin altındaki su kavitasyon yapabilmektedir. Oluşan kavitasyon sebebi ile diskin altında hava kabarcıkları oluşmakta ve diskin altındaki su basıncının ölçümünde hatalar meydana gelmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

### 3.5.2. Yıkama (Flushing) ünitesi

Doymuş olmayan zeminler için kılcal gerilme deney sonuçlarını doğrudan etkileyen bir parametredir. Söz konusu bu parametre için boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı değerleri etken roledir. Doymuş olmayan zeminlerde üç eksenli hücre kesme deneyleri yapılırken boşluk hava basıncı ile boşluk suyu basıncının birbirinden ayrılması gerekmektedir. Deney aşamalarında numunenin üstünden uygulanan hava

basıncı değerinin her zaman için boşluk suyu basıncından büyük olması gerekmektedir. Bu durumda, seramik disk numunenin konsolidasyonu veya kesme aşamaları sırasında numuneden su çıkışına izin verirken hava geçişini engellemektedir. Aynı şekilde seramik disk altında su çıkışları esnasında oluşabilecek hava kabarcıkları da deney sonuçlarına olumsuz etki yapabilmektedir.

Deney gerçekleştirilirken numunenin üstüne uygulanan hava basıncı doğrudan seramik diskten geçmemektedir. Fakat zaman içerisinde numuneden çıkan suyla beraber havanın bir miktarı suya karışarak yani su içerisinde çözünerek diskten geçebilmektedir. Numuneden çıkan su seramik diskten geçerek hacim ölçerler sayesinde kontrol edilebilmektedir. Fakat su içerisinde çözünen hava seramik disk altında bulunan helezon kısımda toplanarak numuneden çıkan suyun ölçülmesinde hatalara yol açmaktadır. Bu nedenle her kesme aşamasından sonra seramik disk altında biriken hava dışarı alınmaktadır. Bu işlem yıkama (flush) ad verilen sistem sayesinde yapılmaktadır. Deney sistemine ilave olarak bağlanan bu yıkama ünitesi ölçeklendirilmiş bir büret ve bürette ölçülen suyun toplandığı bir silindir hücreden oluşmaktadır.

Fredlund ve Rahardjo (1993), dağılmış hava hacim göstergesi (DAVI) adını verdikleri ve sızan havanın ölçülmesi için kullandıkları yıkama sisteminin bir su ve hava basıncı sayesinde çalıştığını belirtmişlerdir. Numunenin altına hem su basıncının bağlanması hem de harici bir hava basıncının uygulanabilmesi gerekmektedir. Sızan havanın biriktiği numunenin altına öncelikle su basıncı uygulanmalıdır. Daha sonra yıkama ünitesine harici kompresör yardımı ile su basıncından yaklaşık 30 kPa daha düşük bir hava basıncı uygulanmaktadır. Su basıncı fazla olduğu için numunenin altında biriken su bürete doğru hareket eder ve sızan hava ölçülerek kontrol altına alınır. Bu sayede seramik poroz taş altında biriken hava dışarı atılmış ve deney sonuçlarında hatalı ölçümlerin önüne geçilmiş olur.

### 3.6. Zemin (Toplam) Emme Gerilmesi ve Ölçümü

Rasool (2014) çevresel değişikliklerin (yani, zemin yüzeyindeki hava durumu), bir zemin kütleindeki boşluk suyu basınçlarındaki değişimin başlıca nedeni olduğunu ifade etmiştir. Aynı zamanda zeminin su üzerine uyguladığı çekim kuvvetinin, zemin emmesi olarak isimlendirilebileceğini söylemiştir. Gözenekli malzemelerin suyu emme ve suyu bünyesinde tutma gibi yetenekleri vardır.

Zemin emmesi, doğun olmayan zeminlerin hidrolik, mekanik ve mühendislik davranışlarını etkileyen önemli bir parametredir (Lu ve Likos, 2004; Fredlund ve ark., 2012). Zemin emmesi (pozitif veya negatif olabilir) doğal su seviyesinin üstünde bulunan zeminlerde hacim değişimi ve mukavemet için önemlidir (Ridley, 2015). Doğun olmayan zeminlerin davranışlarını doğru anlayabilmek için emme değerlerinin doğru ölçülmesi ve yorumlanması gerekir (Fattah ve ark., 2013). Doğun zeminlerde pozitif boşluk suyu basıncı ne kadar önemliyse doğun olmayan zeminlerde de zemin emmesi o kadar önemlidir (Houston ve ark., 1994).

Doğun olmayan zeminlerdeki mukavemet ve hacim değişimlerinin hesabında negatif boşluk suyu basıncı sıklıkla kullanılır. Zemin emmesi basitçe zeminin su çekmeye ve tutmaya olan yeteneği olarak tanımlanabilir (Bulut ve Wray, 2005; Rasool, 2014). Richards, (1965) ise doğun olmayan zeminlerin mukavemet, kılcallık, deformasyon gibi özelliklerini etkileyen zemin emme gerilmesinin, basit bir ifade ile bir zeminin bünyesinde tutulan suyun drenajı için harcanan enerji olarak tanımlanabileceğini ifade etmiştir.

Charles ve Menzies, (2007) mühendislik uygulamalarının genelinde zemin emmesinin kontrol edilebilmesinin, eriyik ve kılcal gerilmenin kontrol edilebilmesi ile mümkün olabileceğini ifade etmişlerdir. Zemin boşluklarında bulunan sıvıların konsantrasyonları kontrol edilemeyeceği için, zemin emmesinin genellikle kılcal gerilmeye bağlı olarak kontrol edildiğini söylemişlerdir.

Toplam emme, doymun olmayan zeminler için kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) ve eriyik emme olarak ikiye ayrılmaktadır. Kılcal gerilme, boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) ve boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Toplam emme ifadesine ait genel eşitliğin aşağıda gösterilen formül (Denklem 3.5) ile ifade edildiğini söylemişlerdir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Charles ve ark., 2007).

$$\psi = (u_a - u_w) + \Pi \quad (3.5)$$

Bu denklemde ( $u_a - u_w$ ) kılcal gerilmeyi,  $u_a$  boşluk hava basıncını,  $u_w$  boşluk suyu basıncını ve  $\Pi$  eriyik emmeyi ifade etmektedir.

Kılcal gerilme, zeminin kılcallık durumu, yapısı ve yüzey emme kuvvetlerinden meydana gelmektedir. Eriyik emme ise zemin suyunda bulunan çözünmüş tuzlardan kaynaklanmaktadır (Fattah ve ark., 2013).

Fredlund ve ark. (2012) zemin emmesi denkleminde (Denklem 3.5) yer alan değişkenlerin herhangi birinde değişiklik olması durumunda zemin emmesi değerinin doğrudan etkilendiğini söylemişlerdir. Eriyik emmede meydana gelen değişimlerin, kılcal gerilmede meydana gelen değişimlere oranla doymun olmayan zemin sonuçlarını daha az etkilediğini belirtmişlerdir.

Zeminlerin emme kapasiteleri (0-1 GPa) büyük ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir. Ölçüm esnasında kullanılan malzemeler ve teknikler belirli emme aralıklarına göre kullanılmalıdır (Murray ve Sivakumar, 2010).

Bulut ve ark. (2001) zemin emmesinin, mühendislik davranışlarının belirlenmesi için gerekli parametrelerden biri olduğunu ifade etmişlerdir. Emme ölçümü yapan aletlerin ölçüm aralığı, su alış-veriş olayının dengeye ulaşma süresi ve deney maliyeti gibi belirli sınırlamalara sahip olduğunu söylemişlerdir.

Catana ve ark. (2006) dünya genelinde son 20 yıldır doymun olmayan zeminlerin mühendislik davranışlarını belirlemek için artan bir hızda teorik ve deneysel

çalışmalar yapıldığını vurgulamışlardır. Bu çalışmalar içerisinde zemin emmesinin belirlenmesi önemli bir yere sahiptir. Doygun olmayan zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar maliyetin fazla olması, zemin cinslerine ait emme kapasitelerinin belirlenmesinin zaman alması ve karmaşık bir hesaplama yöntemine sahip olması gibi nedenlerle henüz yeterli bilimsel doygunluğa ulaşamamıştır. Araştırmacılar ayrıca; son zamanlarda yaşanan gelişmelere bağlı olarak zemin emmesinin, daha ucuz ve daha kolay bir şekilde ölçülebilir ve kontrol edilebilir hale geldiğini ifade etmişlerdir.

Zemin emme değerinin belirlenebilmesi için kılcal gerilme ve eriyik emme bileşen değerlerini ölçen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Genel olarak zemine ait bağıl nemin ölçülmesinin zemin emme değerinin belirlenmesi için yeterli olacağı ifade edilmiştir (Fredlund ve Rahardjo, 1993; Lu ve Likos, 2003).

### **3.6.1. Kılcal gerilme**

Melbouci ve Ghanem, (2013) kılcal gerilmenin zemin danelerinin su tutma yeteneğini ifade ettiğini söylemişlerdir. Kılcal gerilme boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basıncı arasındaki fark ( $u_a - u_w$ ) olarak ifade edilmektedir. Doygun olmayan zeminler için önemli bir gerilme durum değişkeni ve zemin su içeriği ile zemin yapısı içeren önemli bir fonksiyondur (Tripathy ve ark., 2011).

Kılcal gerilme, zemin boşluk suyundaki negatif basınçtır (Krahn ve Fredlund, 1972). Li ve ark.'na (2005) göre kılcal gerilme ya da negatif boşluk suyu basıncı şevlerin stabilitesinde önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmacılar ayrıca, stabil bir zeminin su muhtevasında artma meydana gelirse kılcal gerilmenin kısmen veya tamamen ortadan kalkacağını ve zeminde göçme meydana gelebileceğini söylemişlerdir.

Kılcal gerilme, çevresel koşullardaki değişimlere bağlı olarak zamanla değişen bir parametredir. Doygun olmayan zeminler içeren mühendislik çalışmalarının çoğu genellikle çevresel değişimlerden etkilenmektedir. Herhangi bir bina altında meydana gelecek olan su birikintisi kılcal gerilmede azalmaya sebep olabilmektedir. Kılcal gerilme, zeminde meydana gelebilecek kılcallıktan kaynaklı kapiler su hareketlerine



bağlı olarak da değişebilmektedir. Özellikle yeraltı su seviyesindeki yükselme ve alçalmalar kılcal gerilmelerde farklılıklar meydana getirebilmektedir (Fredlund ve ark., 2012; Gülşen, 2013).

Kılcal gerilme ölçümü sonuçları aşağıda sıralanan fiziki ve mekanik deneysel süreçlerden ciddi anlamda etkilenmektedir.

- a. Dengeye ulaşması için uzun zaman,
- b. Sıcaklık için yüksek hassasiyet,
- c. Sürekli çıktı üretebilmenin imkansızlığı,
- d. İnşaat hacimlerinin büyük olması (Muraleetharan ve Granger, 1999).

Zeminlerin kılcal gerilmelerinin ölçülebilmesi için tansiyometre tekniği, basınç plakası tekniği ve yüksek emme sondajı yöntemleri kullanılmaktadır. 100 kPa altındaki emme ölçüm değerleri için tansiyometre tekniği, 1500 kPa emme değerine kadar olan aralıklar için ise yüksek emme sondajı ve basınç plakası deney düzenekleri kullanılabilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Kılcal gerilme ölçümü yöntemleri, doğrudan ve dolaylı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dolaylı ölçüm yönteminde kılcal gerilmenin doğru ölçülebilmesi için kullanılan araçların kalibre edilmesi gerekmektedir. Laboratuvarda kılcal gerilmeyi kontrol etmek ve ölçmek için kullanılan en yaygın yöntem eksen kaydırma tekniğidir (Tarantino ve Mongiovi, 2001; Vanapalli ve ark., 2002).

### **3.6.2. Eriyik (Ozmotik) emme**

Krahn ve Fredlund, (1972) bir çözelti içeren zemin suyunun sahip olduğu emme değerinin eriyik emme olduğunu ifade etmiştir. Eriyik emme boşluk suyundaki çözülmüş halde bulunan mevcut tuzlarla suyun tutunabilmesi yeteneğidir (Melbouci ve Ghanem, 2013).

Tuzlar hem doygun hem de doygun olmayan zemin gözeneklerinde bulunabilmektedir. Zeminin tuz içeriğinin değişmesi eriyik emmenin değişmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda zeminlerin hacim ve kayma dirençlerindeki değişiklikler meydana gelebileceği için, eriyik emme zeminlerin mekanik davranışına etki etmektedir (Fredlund ve ark., 2012).

Tian, (2014) boşluk suyundaki çözülmüş iyonların eriyik emmeyi meydana getirdiğini ifade etmiştir. Çözülmüş iyonların varlığının artması ile eriyik emme artış göstermektedir. Eriyik emmenin, farklı tuz çözeltileri için eriyik emme ile eriyik katsayılar arasındaki ilişkinin kullanılarak hesaplanabileceğini söylemiştir.

### **3.7. Zemin-Su Karakteristik Eğrisi (SWCC)**

Doygun durumdaki zeminlerin davranışını anlayabilmek için gerekli parametre efektif gerilme iken doygun olmayan zeminlerde emme değeri-su muhtevası ilişkisi önemli bir göstergedir. Doygun olmayan zeminin sahip olduğu su muhtevası (ya da doygunluk derecesi) ve emme değeri ilişkisi "Zemin Su Karakteristik Eğrisi" (SWCC-Soil water characteristic curve) olarak bilinmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). SWCC, kısmen doygun bir zeminin temel özellikleri hakkında bilgi verir ve bir zeminin suyu tutma ve suyu bırakma yeteneği olarak da tanımlanmaktadır (Alim ve ark., 2009; Hernandez, 2011).

Başka bir ifade ile zemin boşluklarında bulunan suyun çıkması için uygulanan enerji ile çıkan su miktarı arasındaki ilişkinin zemin karakteristik eğrisi olarak isimlendirilebileceği söylenmiştir. Zemin su karakteristik eğrileri, zemin emmesinin poroz malzemenin boşluklarında bulunan su miktarı ile ilişkisini göstermektedir. SWC eğrileri kılcal gerilme ile doygunluk derecesine veya hacimsel su içeriği ile gravimetrik su içeriğine bağlı çizilmektedir (Marinho ve Stuermer, 2000; Thu ve ark., 2007).

Doygun olmayan zeminlerin özellikleri iki farklı yöntem ile tahmin edilebilmektedir. Bunlardan biri doygun zemin özelliklerinden yararlanmak, diğer yöntem ise SWC eğrilerinden faydalanmaktır (Fredlund ve ark., 2012).

Klute (1986) zemin su muhtevası ile zemin emmesi arasındaki ilişkinin, zeminlerin hidrolik özelliklerinin bir parçası olduğunu ifade etmiştir.

Croney ve ark. (1958) SWCC'nin öncelikle zeminin dane dağılımına bağlı olduğunu bildirmişlerdir. İri daneli zeminlerin SWCC'lerinde hava giriş değerine kadar su içeriğinin sabit kalacağını söylemişlerdir.

Zemin su karakteristik eğrileri, doygun olmayan zeminlerin permeabilite, su tutma, kayma direnci ve termal özelliklerini tahmin etmek için kullanılırlar (Marinho ve Stuermer, 2000; Wang ve Benson, 2004; Sivakumar Babu ve ark., 2005; Fredlund ve ark., 2011; Zheng ve ark., 2013). Son yıllardaki çalışmalar birçok doygun olmayan zemin parametresinin zemin su karakteristik eğrisi üzerinden elde edilebileceğini göstermiştir. Zemin su karakteristik eğrisini elde etmek, diğer doygun olmayan zemin parametrelerini elde etmekten daha kısa bir deney süresi gerektirmektedir (Leong ve ark., 2001).

SWCC'de izlenen zemin boşluklarındaki su dağılımının anlaşılabilmesi kılcallık olayının yorumlanması ile mümkündür (Fredlund ve ark., 2012). Doygun olmayan zeminler için SWCC, nem kaybı ve su tutma karakteristiklerini ifade eden önemli bir parametredir (Mengling ve ark., 2016).

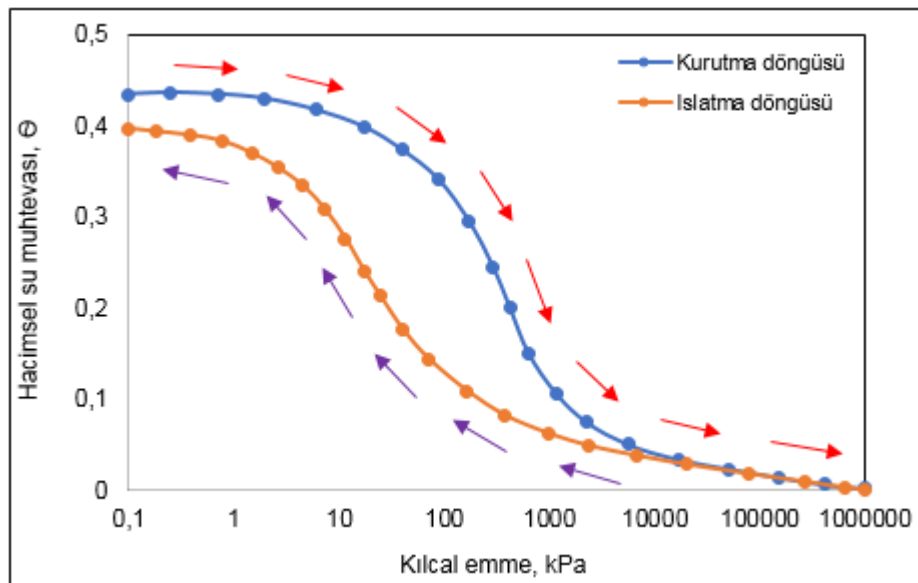
Doygun olmayan zeminlerin geçirgenlik ölçümleri, kesme dayanımı ve hacim değişimi gibi parametrelerinin laboratuvarında ölçülmesi ciddi zaman ve maliyet gerektirmektedir. SWCC, doygun olmayan zeminlere ait bu parametrelerin tahmin edilmesinde kullanılan dolaylı bir yöntemdir (Yusof ve ark., 2015).

Doygun olmayan zeminler için SWCC'nin çizilmesi önemlidir ve bu eğri gerçek doygunluk derecesinden bağımsız olarak her zaman bir "sıfır emme" durumundan başlamaktadır (Fredlund, 2019).

Zemin-su karakteristik eğrilerinden elde edilen hava giriş değeri ile kalıcı doygunluk değerleri, bu eğrilerin iki önemli özelliğidir. Hava giriş değeri, numunedeki suya doymun boşluklara havanın girmeye başladığı emme değeridir (suyun drene olmaya başladığı emme değeri) (Barbour, 1998). Numunelerde bulunan bu boşluklara havanın girmeye başladığı değere hava giriş değeri denilmekte olup bu nokta SWC eğrilerinde bulunan ilk kırılma noktasıdır (Elkady ve ark., 2015).

Leong ve Rahardjo (1997) SWC eğrilerinin zeminin türüne, dane boyut dağılımına, plastisitesine ve başlangıç boşluk oranına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

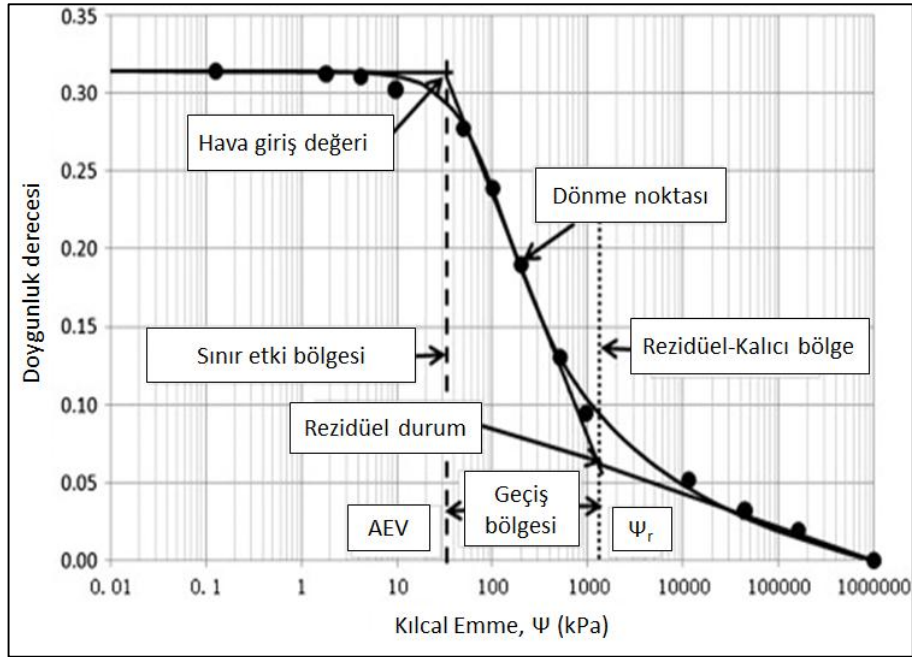
Şekil 3.16.'da gösterildiği üzere SWCC hem ıslatma döngüsü hem de kurutma döngüsü ile çizilebilmektedir. Kurutma döngüsünün araştırmalarda daha gerçekçi sonuçlar vermesi sebebi ile daha çok bu döngü tercih edilmektedir (Fredlund ve ark., 2012). İri daneli bir zemine ait SWC eğrisinin çizilebilmesi için en az 6 veya 8 okunabilir noktanın belirlenmiş olması gerekmektedir. Her bir emme değerinin okunabilmesi için ise 6-8 gün aralığında bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. İnce daneli zeminler için ise daha uzun süreler gerektirmektedir (Khanzode ve ark., 1989).



Şekil 3.16. SWC eğrisinin kurutma ve ıslatma yöntemi ile çizimi (Leong ve Rahardjo, 1997).

SWCC deneyleri yapılırken ıslatma eğrisinde bulunan bir emme değerindeki su içeriği, kuruma eğrisindekinden daha küçüktür (Haines, 1923; Topp ve Miller, 1966).

Şekil 3.17.'de tipik bir zemin-su karakteristik eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.17. Standart tipte bir zemin-su karakteristik eğrisi (Zhai ve Rahardjo, 2013).

Kalıcı (rezidüel) emme değeri, kılcal gerilmenin kayma direncine katkısının sona erdiği noktadır. Bu değerden sonra kırılma zarfı yatay hale gelmekte, bu etkide  $\Phi^b$  değerinin 0'a düşmesine neden olmaktadır (Chen ve Hai, 2012).

SWC eğrilerinin elde edilmesi için literatürde birden fazla yöntem mevcuttur. Laboratuvar ve arazide kullanılan ölçüm yöntemlerinden bazıları özet bir tablo halinde Tablo 3.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Özet emme ölçüm yöntemleri (Fondjo ve ark., 2020)

		Uygulanan yöntem	Emme aralığı (kPa)	Dengelenme zamanı	Laboratuvar (L) veya arazi (A) uygulaması	
Direkt Yöntem	Kılcal gerilme	Geleneksel tansiyometre	0 - 90	Dakika	L ve A	
		Emme plakası	20 - 85	Saat	L	
		Yüksek emme tansiyometresi	0 - 1500	Dakika	L ve A	
		Basınç plakası	0 - 1500	Saat - Gün	L	
		Eksen kaydırma	0 - 1500	1 – 16 saat	L	
İndirekt Yöntem	Kılcal gerilme	Elektriksel iletkenlik sensörü	50 - 1500	6 – 50 saat	L ve A	
		Termal iletkenlik sensörü	10 - 1500	Saat - Gün	L ve A	
		Temaslı filtre kağıdı	Tüm aralık	7 – 14 gün	L ve A	
		Zaman Alanı Reflektometrisi (TDR)	0 - 1500	Saat	L ve A	
	Eriyik emme	Toplam emme	Sıkıştırma tekniği	0 - 1500	Gün	L
			Termokupl psikrometre	100 - 8000	1 saat	L ve A
			Bağıl Nem Sensörü	100 - 10000	Saat - Gün	L
			Soğutulmuş ayna higrometresi	150 - 30000	10 dakika	L
		Temasız filtre kağıdı	Tüm aralık	7 – 14 gün	L ve A	

### 3.7.1. Filtre kağıdı yöntemi ile SWCC' nin belirlenmesi

Houston ve ark. (1994) filtre kağıdı yönteminin, dolaylı zemin emmesi ölçüm yöntemlerinden en çok kullanılan yöntem olduğunu söylemişlerdir. Aynı anda birden fazla zemine ait deney yapılabiliyor olması, ekonomik olması, kolay erişilebilir olması ve kullanımının kolay olması filtre kağıdı yönteminin daha çok tercih edilmesinin sebepleri arasındadır. Filtre kâğıdı yöntemi, 0-100 MPa gibi geniş bir aralıkta ölçüm yapabilen tek deney yöntemidir (Bulut ve Wray, 2005; Bicalho ve ark., 2007).

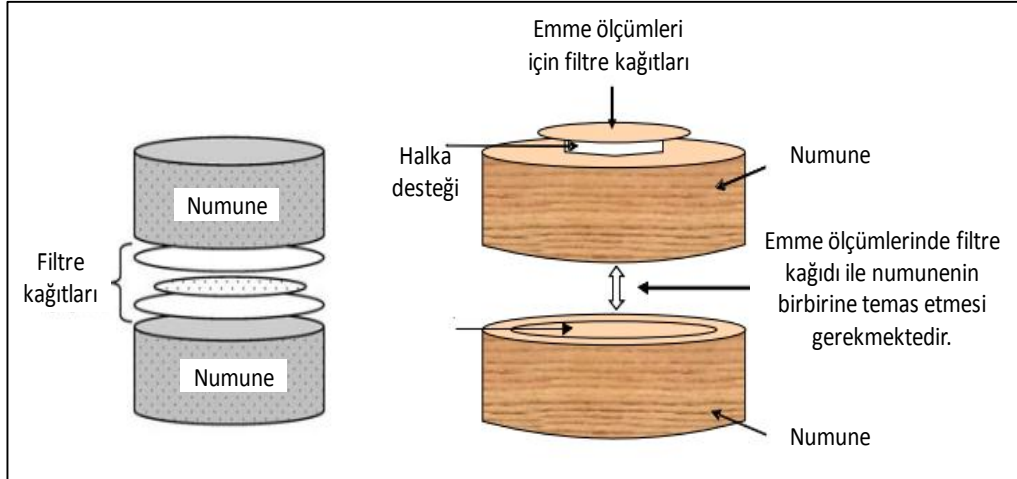
Temel olarak filtre kağıdı, buhar (toplam emme ölçümü) veya sıvı (matrik emme ölçümü) akışı yoluyla zeminin emmesiyle dengeye gelir. Denge durumunda filtre kağıdı ve zeminin aynı emme değerine sahip olması beklenir. Filtre kağıdı ile zemin arasında denge sağlandıktan sonra filtre kağıdının ağırlıksal su içeriği ölçülür. Bu

deneyde uygulanan ölçüm teknikleri ve kullanılan yöntem tamamen ASTM D 5298 standardına uygun olmalıdır. ASTM D 5298-94, hem toplam hem de kılcal gerilme ölçüm sonuçlarını ortaya çıkarmak için bir kalibrasyon eğrisi kullanır ve filtre kağıtlarının başlangıçta fırında kurutulmasını (16 saat veya gece boyunca) ve ardından oda sıcaklığındaki bir desikatörde soğumaya bırakılmasını önermektedir. ASTM D 5298'deki kalibrasyon eğrisi, hem ıslatma hem de kurutma eğrilerinin bir kombinasyonudur. Ancak, filtre kağıdı ile yapılan ıslatma ve kurutma deneylerinde zeminlerin türü, SWC eğrisinde kullanılan kalibrasyon eğrilerinin farklı olmasına neden olmaktadır (Chandler ve Gutierrez 1986; Marinho 1994).

Chandler ve ark. (1992) filtre kağıdı deneylerinde birçok filtre kağıdı kullanılmasına rağmen, Whatman No.42 ve Schleicher ve Schuell No.59 (veya SS 59) filtre kağıtlarının yaygın olarak kullanıldığını söylemişlerdir.

ASTM D5298-94 standardına göre zemin ile filtre kağıdı arasında bulunan su akışının dengeye ulaşma süresi yedi gündür (ASTM D5298-94, 2000). Leong ve ark. (2002) ise filtre kağıdı ile zemin arasındaki yedi günlük denge süresinin yeterli olmadığını öne sürmüşler ve gereken zamanın 14 gün olması gerektiğini söylemişlerdir.

Filtre kağıdı ile zemin numuneleri temas halinde değil ise toplam emme ölçümü yapılmaktadır. Kılcal gerilme ölçümünün gerçekleşebilmesi için su akışının dengeye gelmesi, toplam emme ölçümü için ise su buharının dengeye ulaşması gerekmektedir (Chandler ve ark., 1992). Chandler ve ark. (1992) kılcal gerilme değerinin belirlenebilmesi için filtre kağıdı ile zemin numunesinin birbirine temas etmesi gerektiğini söylemişlerdir (Şekil 3.18.).



Şekil 3.18. Toplam ve kılcal gerilme ölçümü için filtre kağıdının yerleşimi (Chandler ve ark., 1992; Yang ve ark., 2008; Bulut ve Wray, 2005).

### 3.7.2. Basınç plakası yöntemi ile SWCC'nin belirlenmesi

SWCC'yi belirlemenin bir başka yöntemi de basınç plakasıdır. Basınç plakası aparatı, zeminde su tutma ve 0,4 bar'dan büyük emmeleri belirlemek için kullanılır. Basıncın dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle, basınç ve zemin suyu gerilimi veya emmesinin çeşitli denge koşulları elde edilir. Bu çok yönlü aparat, çeşitli belirlemeler için kullanılabilir; mevcut su kapasitesi, su tutma kapasitesi, hidrolik iletkenlik ve saha kapasitesi. Sonuçların çeşitli pratik uygulamaları vardır; zemin sınıflandırması ve toprak etüdü bu avantajlardan sadece bazılarıdır. Bu yöntemin dezavantajlarından biri düşük bir emme aralığına sahip olmasıdır (Li ve Zhang, 2007).

Er ve ark. (2020) zemin numunesine hava basıncı uygulaması ile zeminin gözeneklerindeki suyun uzaklaşmasının bu yöntemde esas olduğunu ifade etmiştir.

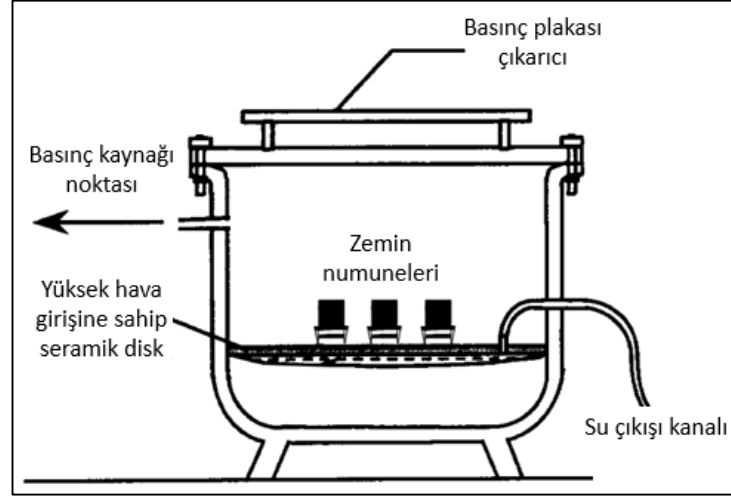
Numunelere basınç uygulanmasıyla oluşan hidrolik eğim, suyun numunelerden seramik plakaya doğru geçişini sağlar. Su geçişi denge durumuna geldiğinde istenilen emme altındaki su muhtevası değerine ulaşılmış demektir. Bu dengelenme süresi ince daneli zeminlerde yaklaşık yedi gün iken iri daneli zeminlerde daha kısa sürmekte ve maksimum iki gün içerisinde istenilen su muhtevası değerine ulaşılmaktadır. İri daneli zeminlerde daha büyük boşlukların olması numuneden suyun daha hızlı drene olması anlamına gelmektedir (Cresswell ve ark., 2008).



Filtre kağıdı yöntemi gibi bu yöntem sayesinde de zemin numunelerine ait zemin su karakteristik eğrileri çizilebilmektedir. Zemin içeriğinde bulunan iri ve ince dane oranına bağlı olarak bu yöntemde kullanılan basınç değeri değişkenlik göstermektedir. İri daneli zeminlerde 500 kPa emme değerine kadar ölçüm yapılabilirken ince daneli zeminlerde 0-1500 kPa emme aralığında ölçüm söz konusudur (Vanapalli ve ark., 2004).

Saffari ve ark. (2017) basınç plakası cihazının bir hava basıncı odası ve bir de yüksek hava giriş değerine sahip seramik disk olmak üzere iki parçadan oluştuğunu söylemişlerdir. Seramik disk yarı geçirgen olarak ifade edilmektedir. Bu deney yönteminde 50-75 mm çapa ve 20 mm yüksekliğe sahip numunelerin kullanılabilceğini ifade etmişlerdir.

Şekil 3.19.'da seramik disk üzerine zemin numuneleri yerleştirilmiş basınç plakası cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Basınç plakası şematik gösterimi (Saffari ve ark., 2017).

Bittelli ve Flury (2009) zemin numunelerinin seramik diske temas etmemesi ve deney öncesinde veya esnasında deforme olması durumlarında alınan sonuçların doğruluğunun test edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

### 3.8. Doygun Olmayan Zeminler İçin Üç Eksenli Deney Yöntemleri

Doygun olmayan zemin deneyleri esnasında güvenilir sonuçlar elde edilmesi için deneyi yapan kişinin deney kurulum aşamalarına ve deney kesme aşamalarına özen göstermesi gerekmektedir. Doygun olmayan zeminlerin deney süresi doygun zeminlere oranla daha uzun ve deney prosedürü daha zahmetli ve karmaşıktır (Fredlund ve ark., 2012).

Üç eksenli deneyler genellikle zeminin eksenel kesme altındaki davranışlarını anlamak için yapılır. Üç eksenli deneyde, test numuneler yanal ve düşey olmak üzere iki normal gerilmeye maruz bırakılırlar. Deney numunesine yanal yönde minimum asal gerilme ( $\sigma_3$ ) uygulanırken, düşey yönde ise maksimum asal gerilme ( $\sigma_1$ ) uygulanır. Hücre basıncı olarak da bilinen minimum asal gerilme ( $\sigma_3$ ) deney boyunca sabit tutulur. Piston yoluyla uygulanan düşey yük ise numunenin yenileceği zamana kadar kademeli olarak arttırılır. Yenilmenin gerçekleştiği andaki düşey yük, üç eksenli hücre kesme deneyine ait maksimum asal gerilme değerini ifade etmektedir (Lepakshi ve Reddy, 2020).

Doygun olmayan deney yöntemlerinde en önemli aşama kılcal gerilmenin ölçülebilmesi ve kontrol edilebilmesidir. Bu sebeple kılcal gerilme ve hacim değişimlerinin kontrolünün özenli bir şekilde yapılması gerekmektedir (Leong ve ark., 2013).

Fredlund ve ark. (2012) doygun olmayan zeminlerin deney sürelerinin uzun olmasının sebepleri olarak; numunelerin doygun olmaması, konsolidasyon aşamalarında su çıkışlarının daha yavaş olması (kılcallık ilişkilerinin düşük olması) ve bu sebeplere bağlı olarak geçirgenlik katsayılarının düşük olmasını göstermişlerdir. Literatürde üç eksenli hücre kesme deneylerine benzer şekilde yapılabilen farklı deney yöntemleri de mevcuttur. Tablo 3.2.'de farklı üç eksenli deney yöntemlerindeki ortam şartları ve ölçüm metotları ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 3.2. Doygun olmayan zeminler için çeşitli üç eksenli deney yöntemleri (Fredlund ve Vanapalli, 2002)

Deney yöntemleri	Kesme işleminden önce konsolidasyon	Drenaj		Kesme işlemi		
		Boşluk hava basıncı	Boşluk suyu basıncı	Boşluk hava basıncı, $u_a$	Boşluk suyu basıncı, $u_w$	Zemin hacim değişimi, $\Delta V$
Konsolidasyonlu- drenajlı	Var	Var	Var	K	K	Ö
Sabit su içeriği	Var	Var	Yok	K	Ö	Ö
Konsolidasyonlu- drenajsız	Var	Yok	Yok	Ö	Ö	
Drenajsız	Yok	Yok	Yok			
Serbest basma	Yok	Yok	Yok			

*K: Kontrol edilir; Ö: Ölçülür.*

Doygun olmayan zemin deneylerine başlamadan önce izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken deney prosedürleri mevcuttur. Numune altında bulunan seramik diskin doyurulması, bu disk altında biriken havanın dışarı alınabilmesi için kullanılacak olan yıkama (flush) sisteminin çalışır durumda olması ve numunedeki su giriş-çıkışını kontrol eden hacim değişim cihazının (volume change) çalışıyor olması gerekmektedir (Fredlund, 1973).

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deney yöntemi tercih edilmiştir. Bu sebeple deney yöntemlerinin başlığı altında sadece kullanılan deney yöntemi ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

### 3.8.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) deney yöntemi

Üç eksenli hücre kesme deney cihazı çeşitli deney prosedürlerinin gerçekleştirilebilmesi açısından esnek bir cihazdır. Gerekli modifikasyon işlemleri yapılarak farklı deney yöntemlerini tek cihaz üzerinde gerçekleştirmek mümkündür. Yapılacak deneye başlamadan önce deney cihazının tüm hatlarından ve borularından su geçirilerek sistemde bulunan tüm havanın çıkarılması gerekmektedir. Bu sayede deney sonuçlarının daha güvenilir olması sağlanmaktadır.

Bu deney, mevcut zemin numunesine hücre basıncı ( $\sigma_3$ ), boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) ve boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) gerilmeleri uygulanarak yürütülür. Eğer zemin numunesi çok aşamalı olarak kesilecek ise her bir kılcal gerilme (matric suction) aşamasından önce

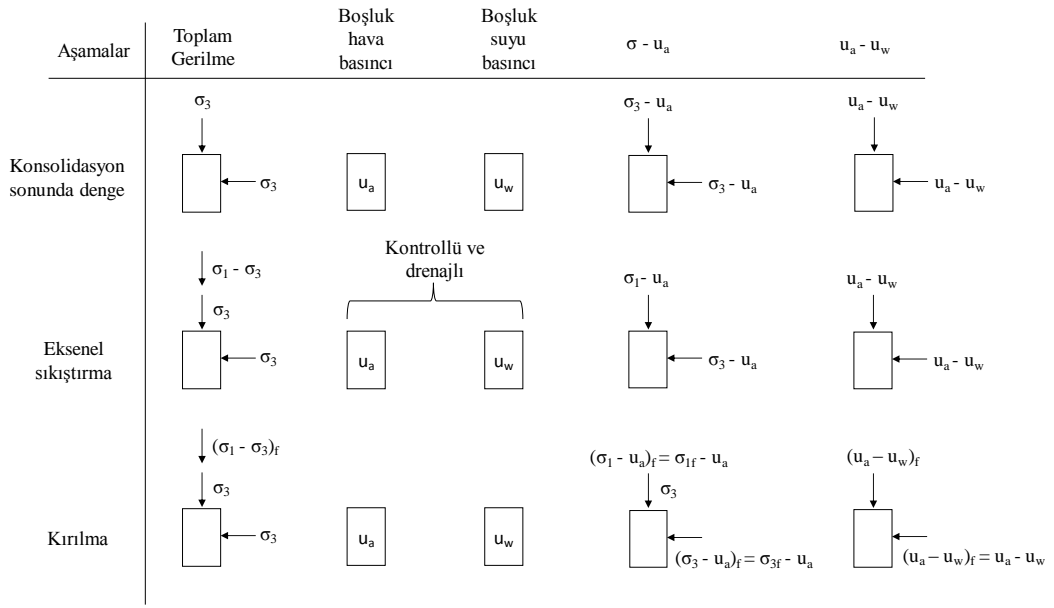
seramik disk altında biriken havanın dışarı alınması gerekir. Numunenin alt kısmına bağlanan vanaların ikisinin de açık olduğu tek aşama sadece yıkama (flush) uygulanacağı zaman olmalıdır. Bu aşama haricinde sadece boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) vanası açık bırakılmalıdır.

Konsolidasyon aşamasında numuneden çıkan su, hacim değişim ölçer tarafından kayıt altına alınmalıdır. Kesme aşamasındaki boy kısalması deformasyon saati aracılığı ile kontrol edilmeli ve kayıt altına alınmalıdır. Böylece numunede her aşamada meydana gelen hacim değişimi hesaplanabilmektedir. Konsolidasyon aşaması sonlandırıldıktan (numuneden su çıkışının bitmesi) sonra kesme aşamasına geçilmelidir.

Kesme aşaması boyunca boşluk suyu basıncı vanası açık olmalı ve numuneden çıkan su miktarı ölçülmelidir. Numune yenildiği anda eksenel kuvvet saatinin göstermiş olduğu maksimum değer kayıt altına alınır ve kesme aşaması sonlandırılır. Kurulan deney düzeneği sökülerek zemin numunesi çıkarıldıktan sonra numune ağırlığı belirlenir.

Bu deney yönteminin en dikkat edilmesi gereken detaylarından biri, seramik disk altında biriken havanın dışarı alınması işlemidir. Eğer disk altında biriken hava dışarı alınmaz ise numuneden çıkan suyun ölçümünde ve boşluk suyu basıncı değerlerinde hatalı sonuçlarla karşılaşılabilir. Seramik disk altında biriken havanın dışarı alınması, hücre tabanı ile hava hacim göstergesi arasında en az 20 - 25 kPa'lık bir basınç fark oluşturulmasıyla mümkündür. Bu işleme yıkama (flushing) adı verilmektedir. Yıkama işlemi sırasında hücre tabanı ile hava hacim göstergesi arasındaki basınç farkını artırmak gerekebilir. (Fredlund ve ark., 2012).

Konsolidasyonlu-Drenajlı deney yönteminde kullanılan gerilme durum ilişkileri Şekil 3.20.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme testinin çeşitli aşamalarındaki gerilme koşulları.

## **BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1. Giriş**

Bu tez çalışmasındaki bulgular Sakarya Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında farklı özelliklere sahip daneli zeminler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Literatür incelendiğinde iri daneli zeminler üzerinde doymun olmayan zemin mekaniğine ait birçok deneysel çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmada doymun olmayan ince daneli zeminlerin kayma direnci üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvarında hazırlanan farklı ince daneli deney numunelerinin kayma direnci davranışı farklı kılcal gerilme değerlerinde incelenmiştir. Öncelikle doymun zeminler üzerinde üç eksenli hücre kesme deneyleri yapılarak temel kayma direnci parametreleri bulunmuştur. Daha sonra, doymun olmayan koşullarda gerçekleştirilen deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu kapsamda deneysel çalışma programı aşağıdaki aşamaları içermektedir;

1. İlk olarak çalışmada kullanılacak olan 4 farklı zeminin temini gerçekleştirilmiştir.
2. Daha sonra üç eksenli hücre kesme deneylerde kullanılacak silindirik numunelerin elde edilmesi için konsolidasyon hücrelerinin tasarımı yapılmış ve bu tasarımlar bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) destekli cihazlarda hazırlanmıştır.
3. Deneysel çalışmalar için dört farklı zemin numunesinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesine yönelik fiziksel deneyler yapılmıştır.
4. Fiziksel özellikleri belirlenen numunelere kil içeriği yoğunluğuna göre sırasıyla N-1, N-2, N-3 ve N-4 isimleri verilmiştir. Numunelerde isim sırasına göre kil içeriği azalırken kum içeriği artmaktadır. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda kum oranı etkisinin inceleme kriteri olacağı belirlenmiştir.

5. Doymun olmayan deneylerde değişken parametre olan kılcal gerilmenin su muhtevası/doymunluk derecesi ile ilişkisinin belirlenmesi için tüm numunelerin filtre kağıdı yöntemi ile SWC eğrileri oluşturulmuştur.
6. Doymun ortamda ve drenajlı şartlar altında hazırlanan 5 cm çapında ve 10 cm boyundaki tüm silindirik numuneler üzerinde çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.
7. SWC eğrileri yöntemiyle belirlenen kılcal gerilme değerlerinin uygulamayla ve drenajlı şartlar altında çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyleri yapılmıştır. Doymun olmayan üç eksenli hücre kesme deneylerinde 5 farklı gerilme durum değişkeni ( $\sigma_3-u_a=40$  kPa,  $u_a-u_w=50-100-150$  kPa;  $\sigma_3-u_a=80$  kPa,  $u_a-u_w=50-100-150$  kPa;  $\sigma_3-u_a=90-140-190$  kPa,  $u_a-u_w=50$  kPa;  $\sigma_3-u_a=90-140-190$  kPa,  $u_a-u_w=100$  kPa;  $\sigma_3-u_a=90-140-190$  kPa,  $u_a-u_w=200$  kPa) kullanılmıştır.
8. Doymun ortam deneylerinden elde edilen kayma direnci parametrelerine ve doymun olmayan numunelerden elde edilen üç eksenli hücre kesme deneylerinin sonuçlarına göre gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, Mohr daireleri, kırılma zarfları ve 3 boyutlu kayma yüzeyini gösteren grafikler oluşturulmuştur.

Bu çalışma kapsamında doymun numuneler için 1 seri (4 numune), doymun olmayan zemin numuneleri için ise 5 seri (20 numune) çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi yapılmıştır.

#### **4.2. Malzeme ve Özellikleri**

Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri ve sınıflandırılma sonuçları, SWC eğrileri ve yapılan deneyler açıklanmaktadır.

Çalışmada kullanılan zemin örnekleri 1999 depreminde Adapazarı şehir merkezinde zeminden kaynaklanan birçok problemin yaşandığı farklı alanlardan ve Serdivan bölgesinden alınmıştır. Jeolojik kökenleri aynı olduğu için örneklerin aynı bölgeden alınmasının bir avantaj olduğu düşünülmektedir. Bu topraklar, Sakarya Nehri'nin çökelme havzasındaki akarsu birikintileridir.

Çalışmada kullanılan iki numune Adapazarı şehir merkezinden, bir numune ise Serdivan bölgesinden alınmıştır. Kent merkezinden alınan numunelerden biri (Enlem: 40,771222°, Boylam: 30,407780°) Adapazarı Yenigün mahallesinden diğeri ise (Enlem: 40,768593° ,30,403860°) Adapazarı Yenicami mahallesinde bulunan Yenikent Sitesi arazisinden alınmıştır. Serdivan bölgesinden alınan numune Enlem: 40,762432°, Boylam: 30,359056° koordinatlarına sahip Serdivan ilçesinde bulunan Ak-Özgün Sitesi arsasından alınmıştır. Şekil 4.1.'de çalışmada kullanılan üç doğal numunenin alındığı bölgelerin haritadaki yerleri gösterilmiştir.

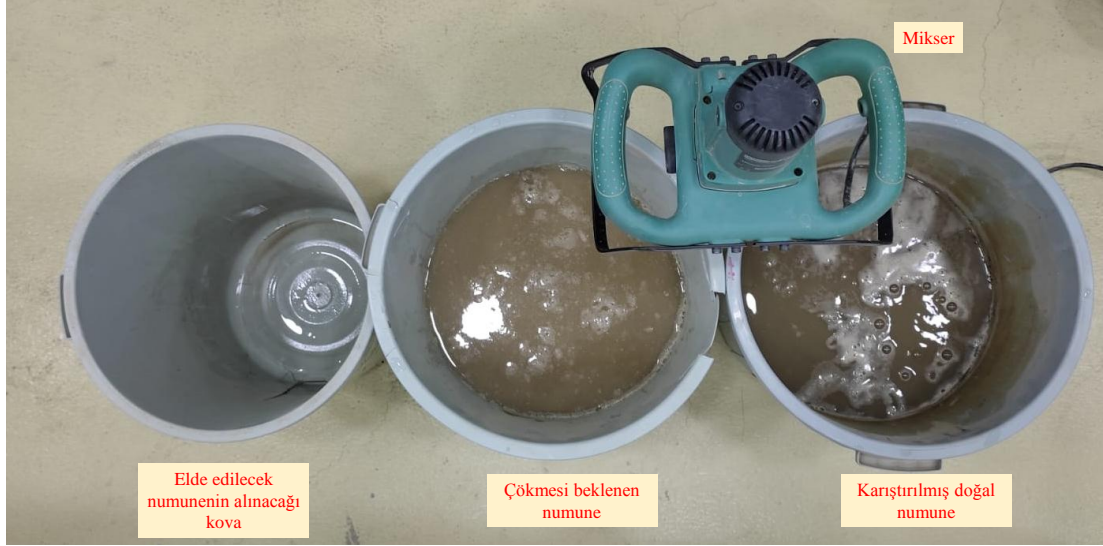


Şekil 4.1. Çalışmada kullanılan üç doğal numunenin konumları.

Çalışmada, Adapazarı ve Serdivan bölgesinden alınan silt ağırlıklı zemin örnekleri kullanılmıştır. Adapazarı Yenigün mahallesinden 3.00-4.00 m derinlikten alınmış zemin numunesinin içerisindeki iri dane ile kili birbirinden ayırmak için çöktürme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, zemin numunesi içi su dolu bir kovada karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra 3 dk boyunca iri danelerin çökmesi beklenmiştir. 3 dk sonunda su ile beraber askıda kalan ince daneli zemin ayrı bir kovaya alınmıştır. Çökmesi gerçekleşen zemin numunesi üç defa aynı şekilde karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Her 3 dk bekleme sonunda su ile beraber askıda kalan zemin numunesi ayrı bir kovaya alınmıştır. Ayrı kovaya alınan zemin numunesi, çalışmada kullanılacak olan 4. numune

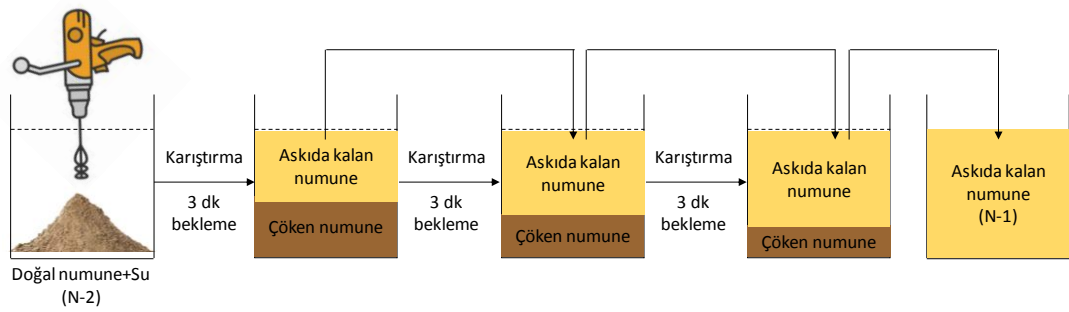


olarak elde edilmiştir. Şekil 4.2.'de karıştırılmış, çökmesi beklenmiş ve elde edilecek numunenin alınacağı kap gösterilmiştir.



Şekil 4.2. 4. Zemin numunesinin çöktürme tekniği ile elde edilme aşaması.

Doğal numune büyük bir kapta karıştırılmış ve çökmeye bırakılmıştır. Zamanla birlikte önce iri daneler (kum), sonra orta boyuttaki silt ve en son olarak en küçük boyutlu kil danecikleri suda çökmüştür. En yüksek kil-silt içeriğine sahip üst tortu tabakası ayrı bir kapta toplanmıştır. Bu numunenin elde edilmesi için uygulanan çöktürme işleminin uygulama aşamaları Şekil 4.3.'te gösterilmiştir.

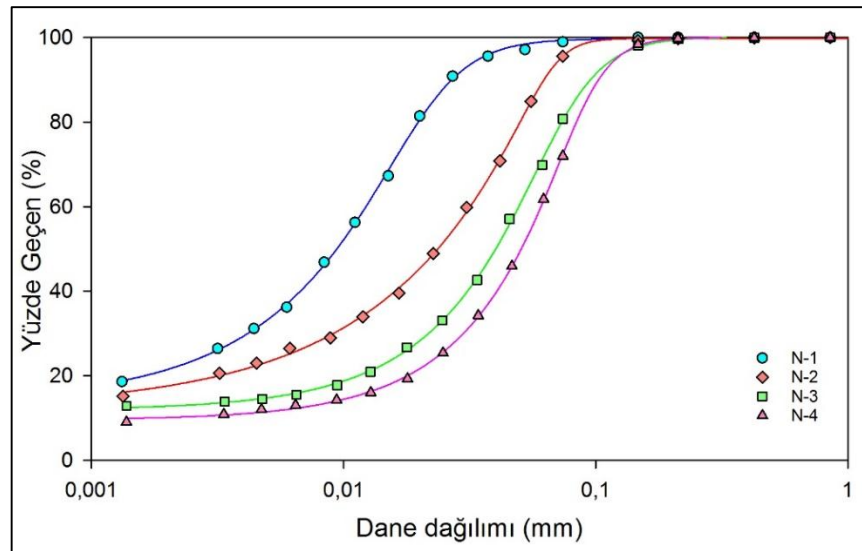


Şekil 4.3. N-1 numaralı numunenin çöktürme işlemi ile elde edilme süreci.

Gerçekleştirilen fiziksel deneylerle dört numunenin kil, silt, kum ve çakıl yüzdeleri belirlenmiş ve dane dağılım eğrileri çizilmiştir. Kil ve silt içeriğinin (ince daneli) belirlenebilmesi için hidrometre, kum, çakıl yüzdelerinin belirlenebilmesi için elek analizi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elek analizi sonuçları ile hidrometre sonuçları bir araya getirilerek numunelerin dane boyut dağılım eğrileri ve

çakıl, kum, silt ve kil yüzdeleri belirlenmiştir. Numunelere ait dane dağılım eğrileri Şekil 4.4.'te gösterilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda numunelere ait fiziksel özellikler ve elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Çalışmada kullanılan 4 numunenin dane boyut dağılımı.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan zemin özellikleri

Numune numarası	N-1	N-2	N-3	N-4
Zemin sınıfı (TS 1500)	CI	CI	ML	ML
Zemin sınıfı (USCS)	CL	CL	ML	ML
Likit limit ( $w_L$ )	40	36	33	34
Plastik limit ( $P_L$ )	24	21	NP	NP
Plastisite indeksi ( $I_p$ )	16	15	NP	NP
Özgül ağırlık ( $G_s$ )	2.66	2.76	2.67	2.78
Kil içeriği (%)	22	18	14	10
Silt içeriği (%)	77	78	68	67
Kum içeriği (%)	1	4	18	23

Numune isimleri N-1, N-2, N-3 ve N-4 olarak sırası ile artan kum içeriğine göre belirlenmiştir. En düşük kum içeriğine (%1) sahip numune N-1, en yüksek kum içeriğine (%23) sahip numune ise N-4 olarak isimlendirilmiştir. Numunelerdeki kil içeriği artar iken kum içeriği azalmaktadır. N-1 numaralı numunede en yüksek kil içeriği (%22) varken, N-4 numaralı numunede kil içeriği (%10) en düşük yüzdeye sahiptir.

Bilindiği gibi killerin su emme kapasiteleri yüksektir. Bu sebeple SWC eğrilerinin belirlenmesinde danecik yapısındaki kil oranı, numunelerin su tutma kapasitelerini belirleyen önemli bir etkidir. Bu sonuca göre en fazla su tutma kapasitesine sahip numune N-1'dir. N-1, N-2, N-3 ve N-4 numunelerinde kil içeriği giderek azalmaktadır. Sınıflandırma deneyleri sonuçlarına göre N-1 ve N-2 numunelerinin kil içerikleri sırası ile %22 ve %18 iken C (kil) grubu içinde yer aldıkları tespit edilmiştir. Bu durum killerin yüksek aktivite özelliğinden kaynaklanmaktadır. N-1 ve N-2 numunelerinde kum yüzdeleri ise sırası ile %1 ve %4 olarak tespit edilmiştir. N-3 ve N-4 numunelerinde kil içerikleri sırası ile %14 ve %10 olarak bulunurken kum yüzdeleri sırası ile %18 ve %23 bulunmuş ve zemin sınıfları hem USCS (Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) hem de TS1500 standartlarına göre M (Silt) olarak belirlenmiştir.

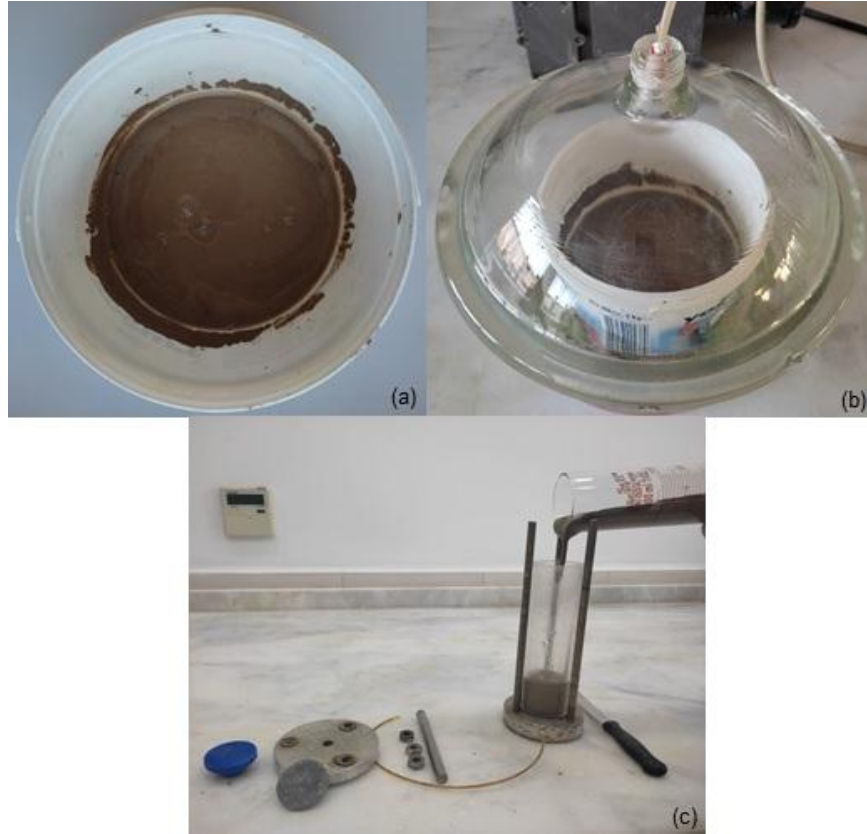
#### **4.3. Zemin Numunelerinin Hazırlanması**

Üç eksenli deneylerde kullanılacak olan silindirik numuneler 50 mm çapa ve 100 mm yükseklikte oluşturulmuştur. Çap ve yükseklik ölçülerinde istenmeyen deformasyonlar olması durumunda ise ölçüler standardın %5'inden fazla değişmemelidir. Deney numunesinin dane boyutunun numune çapının 1/6'sından küçük olması gerekmektedir (ASTM D 4767, 2003).

Ho ve Fredlund, (1982), zemin numunelerinin hazırlanma aşamasında veya ön konsolidasyon yüklemelerinde aşırı derecede deforme olmamasını önermişler, hazırlanmasında aşırı zorlama ile sıkıştırılmasının kırılma zarflarının hatalı çıkmasına ve numunede dayanım kaybı meydana gelmesine neden olabileceğini söylemişlerdir.

Bir zemin numunesinin kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi isteniyorsa, denenecek tüm numuneler aynı başlangıç su içeriğinde ve özdeş sıkıştırma, karıştırma ve hazırlama enerjisi ile hazırlanmalıdır (Fredlund ve ark., 2012). Deneysel çalışmalar için hazırlanan numuneler aynı fiziki ortam koşullarında ve homojen olarak hazırlanmıştır. Bu sebeple yapılacak olan doymuş ve doymuş olmayan deneylerdeki her numune için bir defa harmanlama/karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylelikle

deneylerde numunelerin eş fiziki özelliklere sahip olması sağlanmaya çalışılmıştır. Aynı fiziki özelliklere sahip olan numunelerden elde edilen sonuçlar üzerinde değerlendirme yapmak daha gerçekçi olacaktır. 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde deney numuneleri hazırlayabilmek için yeterli kuru numune miktarı hesaplanmıştır. Hazırlanacak silindirik numunelerdeki su miktarı numunenin likit limit değerinin 1,5 katı olarak seçilmiştir. Bulamaç kıvamda hazırlanan numune silindirik konsolidasyon hücresine yerleştirilmeden önce boşluklarındaki havanın alınması işlemi için 0,5 bar vakum altında desikatörde bekletilmiştir. Bulamaç karışım, desikatörde hava alma işlemi ve bulamaç karışımın silindirik hücreye yerleştirme aşamalarına ait görseller Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. (a) Bulamaç kıvamda hazırlanan numune (b) Numunenin desikatörde hava alınma işlemi, (c) Silindirik hücreye yerleştirme işlemi.

Havası alınmış numune alt ve üst kısımlarına poroz taşlar konularak silindirik şeffa hücreye yerleştirilmiştir. Numunenin üzerine filtre kağıdı, gözenekli taş ve yükleme başlığı yerleştirildikten sonra üst hücre kapağı kapatılmıştır. Numunelerin istenen gerilmeler altında oturmana izin vererek ön konsolidasyon işlemi ile yapay olarak

hazırlanmıştır. Her bir kademe altında su çıkışı tamamlanan numune için toplamda 100 kPa'lık bir gerilme uygulanır (Hyde ve Ward, 1985; Kuerbis ve Vaid, 1988; Carraro ve Prezzi, 2007; Liu et al, 2017). Şekil 4.6.'da 100 kPa altında konsolidasyona bırakılan zemin numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6. 100 kPa altında tek boyutlu konsolidasyon işlemi.

Konsolidasyon sonunda tamamen su çıkışı duran numuneler ayakta durabilmeleri için dondurucuda bekletilmiştir. Dondurucudan alınan numune şeffa hücreden çıkarılarak zaman kaybetmeden üç eksenli hücreye yerleştirilmiştir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. Dondurucudan çıkarılan numunelerin şeffaf hücreden çıkarılma işlemi.

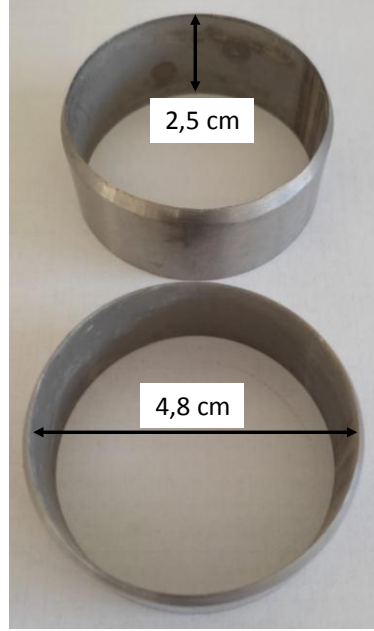
Bu aşama donmuş numunenin çözülme işlemi başlamadan hızlı bir şekilde ve deforme edilmeden gerçekleştirilmelidir. Şeffaf hücreden çıkarılan numune üç eksenli hücre kesme hücresine yerleştirilmiştir.

#### 4.4. Numunelerin Zemin-Su Karakteristik Eğrilerinin (SWCC) Çizilmesi

Doygun olmayan zeminlerin mühendislik davranışlarının belirlenebilmesi için su emme kapasitelerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Su ile olan ilişkileri sonucu zeminlerde meydana gelen doygunluk derecesi ile emme değeri arasındaki grafiksel ilişkiye “Zemin Su Karakteristik Eğrisi” (SWCC) denilmektedir (Fredlund ve Rahardjo, 1993). Bu çalışmada, numunelerin kılcal gerilme değerlerinin belirlenebilmesi için; filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemleri kullanılmıştır.

Likit limit değerinin 1,5 katı su muhtevasında hazırlanan bulamaç kıvamındaki numuneler, boşluklarındaki havanın olabildiğince dışarı atılması için desikatör içerisine konulmuş ve bulamaçtan hava kabarcığı çıkmayana kadar vakum uygulanmıştır. Numuneler ilk önce konsolidasyon hücresinde 100 kPa düşey gerilme altında ön konsolidasyona bırakılmıştır. Konsolidasyonu tamamlanan (su çıkışı duran) numuneden filtre kağıdı ve basınç plakası ile yapılacak emme uygulama ve ölçümlerinde kullanılmak üzere 2,5 cm yüksekliğinde ve 4,8 cm çapındaki silindirik numune alıcı halkalar ile deney numuneleri alınmıştır.

Filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemi ile numunelere ait emme değerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak olan ve yukarıda ölçüleri verilen numune alıcı halkalara ait görseller Şekil 4.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Filtre kağıdı ve basınç plakası için numune alma halkaları.

Bulamaç kıvamında hazırlanan numunelerin her iki emme ölçümü yönteminde de SWC eğrilerinin adım adım oluşturulabilmesi için %100 doygun olması gerekmektedir, çünkü SWC eğrilerinin ilk başlangıç kılcal gerilme değeri 0'dır ( $S_r = \%100$ ).

Filtre kağıdı yöntemi için ASTM D5298-94'de ölçüm tekniği ve kalibrasyonu verilen Whatman No.42 filtre kağıdı kullanılmıştır. Yapılan ölçüm işlemleri sonucunda verilmiş kalibrasyon eğrisinden yararlanılarak SWC eğrileri çizilmiştir.

Emme deneylerinde kullanılan Whatman No.42 filtre kağıdı Şekil 4.9.'da görülmektedir.



Şekil 4.9. Filtre kağıdı deney yönteminde kullanılan Whatman No.42 filtre kağıdı.

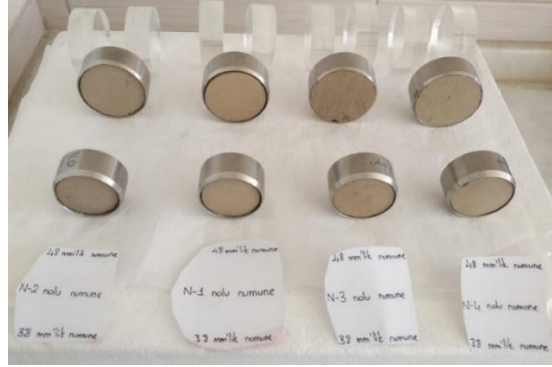
Filtre kağıdı deney yönteminde kullanılacak olan filtre kağıtlarının tamamen kuru olması gerekmektedir. Bu sebeple filtre kağıtları kullanılmadan önce etüvde kurutulmuştur. Kılcal gerilme ölçümlerinde filtre kağıtlarının zemin numunesine tam temas etmesi gerektiğinden filtre kağıdı üzerine şeffaf silindirik bir ağırlık bırakılmıştır. Numune önce streç filme ardından da alüminyum folyoya sarılarak deney aşaması başlatılmıştır. Daha sonra numune, sabit sıcaklık ve nem ortamının sağlanabileceği yalıtılmış bir ortamda zemin ve filtre kağıdı arasındaki su içeriği değişiminin dengelenmesi için yedi gün bekletilmiştir. Zemin numunesinin emme ölçümü için yapılan ön hazırlığına ait detaylar Şekil 4.10.' da verilmiştir.



Şekil 4.10. Filtre kağıdı deney yöntemi detayları.



Yedi günlük bekleme sonucunda yalıtılmış ortamdan çıkarılan numunede meydana gelen su kaybı hesaplanmıştır. Numuneden ayrılan filtre kağıdına ait su içeriği ölçümü yapıldıktan sonra bir sonraki ölçümde numuneye ait farklı bir emme değeri elde edebilmek için numune dışarıda belirli bir süre bekletilmiştir. Numunelere ait açık halde bekleme aşamaları Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 7 gün sonunda ölçümleri yapılan numunelerin su muhtevası kaybı için bekleme aşaması.

Yedi günlük bekleme sonunda su muhtevaları ölçülen filtre kağıtları tamamen kurumaları için bir kap içerisinde etüve bırakılmıştır. Kuruyan filtre kağıdı yukarıda bahsedildiği şekilde numune üzerine yerleştirilerek bir sonraki emme değeri ölçümü için yedi günlük bekleme bırakılmıştır. Numunedeki su kaybı durağan hale gelene kadar ölçümler sürdürülür. Ölçümler sonunda numunenin kuru ağırlığı tespit edilir. Emme ölçümleri tamamlanan dört numuneye ait deney sonu görselleri Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Filtre kağıdı deney sonunda numunelere ait son haller.

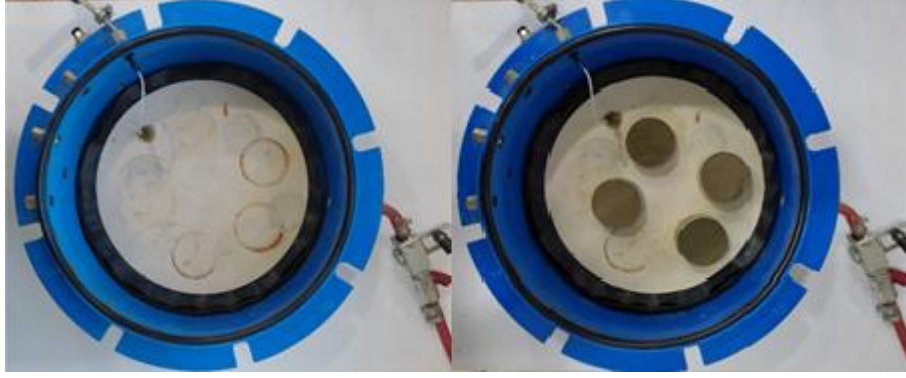
Basınç plakası ve filtre kağıdı deney yöntemleri ile ölçülen emme değerleri kullanılarak numunelerin SWC eğrileri çizilmiş ve eğrilerden elde edilen hava giriş değerleri üç eksenli hücre kesme deneylerinde kullanılmıştır. Basınç plakası olarak 15 bar basınca dayanıklı Şekil 4.13.'te gösterilen basınç plakası hücresi kullanılmıştır.



Şekil 4.13. 15 bar basınca dayanıklı basınç plakası hücresi.

Basınç plakası deneyi ile SWCC oluşturulabilmesi için ilk olarak hücre içerisinde bulunan özel seramik diskin doyurulması gerekmektedir. Seramik disk, doygun duruma gelme süresinin kısılması için basınç plakasına yerleştirilmeden önce 0,5 bar vakumlu desikatörde saf su içerisinde bekletilmiştir. Desikatörden çıkarılan seramik disk basınç plakasına yerleştirilmiştir. Basınç plakası içerisine yerleştirilen seramik diskin üzerine diski tamamiyle su altında bırakacak kadar saf su ilave edilmiştir. Hücreye 1 bar basınç uygulanmış ve yaklaşık 24 saat boyunca seramik taşın doyması beklenilmiştir. Doyurma işlemi esnasında basınç plakasına ait su çıkış hortumu gözlenerek hava kabarcıklarının çıkışı takip edilmiştir. 24 saat süren doyurma işleminin sonunda hortumdan hava kabarcıklarının çıkmadığı ve tamamen su çıkışının olduğu gözlemlendiğinde seramiğin doyurma işlemi sonlandırılmıştır.

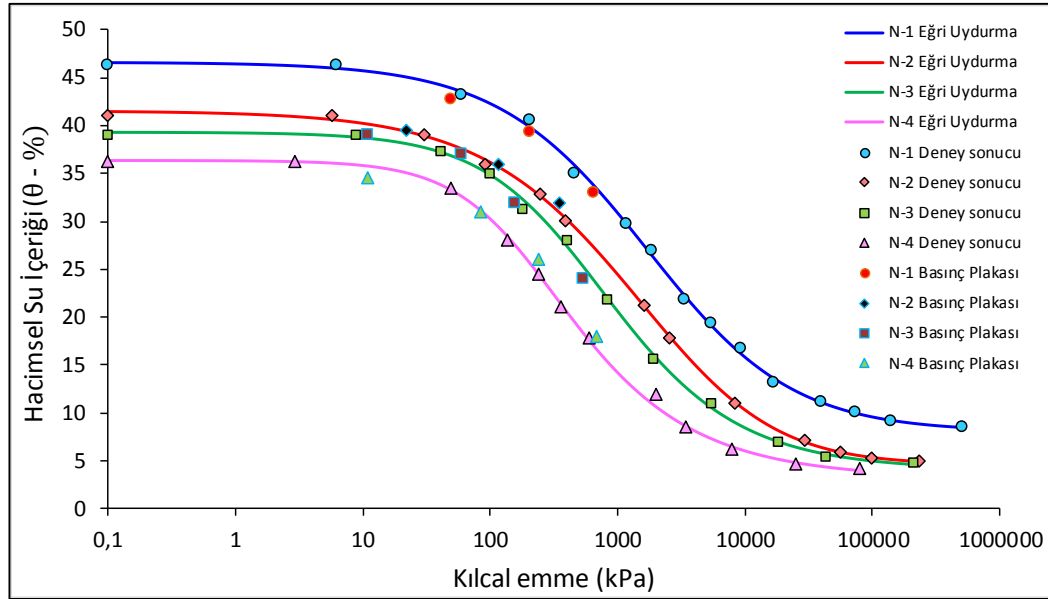
Doyurma işlemi tamamlanan seramik disk üzerine yerleştirilen numuneler Şekil 4.14.'te gösterilmiştir. Numuneler yerleştirildikten sonra basınç plakası kapatılarak hücreye basınç verilmeye başlanmıştır.



Şekil 4.14. Emme ölçümü için basınç plakasına yerleştirilen numuneler.

Hücreye başlangıçta 10 kPa hava basıncı uygulanmış ve hücreden su çıkışı takip edilmiştir. Basınç plakası deneyinde her emme ölçümü için dört farklı numunede de su çıkışının kararlı hale gelmesi (su çıkışının durması) ortalama yedi gün sürmüştür. Basınç plakası içerisindeki tüm numunelere sırasıyla 10-25-50-100-200-400-800 kPa hava basıncı uygulanmıştır. Basınç plakasında kullanılan doygun seramik diskin hava giriş değeri 1500 kPa'dır. Basınç plakasında numunelere uygulanan basınç değerleri iki kat artırılarak uygulanmaktadır. Bu nedenle 800 kPa değerinden sonra basınç plakası deneyi sonlandırılmıştır. Basınç plakasında uygulanan her kılcal gerilme aşaması sonunda numunenin su muhtevası değeri belirlenmiş ve zemin-su karakteristik eğrisi oluşturulmuştur. Basınç plakası ölçümleri tamamlanan numunelerin 800 kPa'dan daha yüksek emme ölçümleri filtre kağıdı yöntemiyle devam ettirilmiştir. SWCC ölçümlerine yönelik basınç plakası deneyleri gerçekleştirilirken ASTM D6836 standardı kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan dört numune için yapılan filtre kağıdı ve basınç plakası deneylerinden elde edilen SWC eğrileri Şekil 4.15.'te gösterilmiştir. Çizilen bu SWC eğrilerinden dört numuneye ait hava giriş değerleri ve buna karşılık gelen su içerikleri ile residüel (kalıcı) emme değerleri ve buna karşılık gelen su içerikleri belirlenmiştir. SWC eğrileri incelendiğinde basınç plakası ve filtre kağıdı ile elde edilen sonuçların birbirini tamamlayıcı oldukları görülmektedir.



Şekil 4.15. Filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemiyle elde edilen zemin su karakteristik eğrileri (SWCC)

Tablo 4.2.'de numunelerin hava giriş ve rezidüel değerleri ile bunlara karşılık gelen su muhtevalarına yer verilmiştir. Hava giriş değeri, numunede meydana gelen su muhtevası değişimi ile birlikte artık numunede sürekli boşluklarının meydana geldiğinin göstergesidir. Rezidüel değer ise o numunedeki su muhtevası değişiminin sonuna yaklaşıldığını ve numune içerisinde bulunan su miktarının artan emme ile artık değişmediğini göstermektedir.

Tablo 4.2. Çizilen SWC eğrisinden elde edilen sonuçlar

	$\phi_{ae}$ (kPa)	$w_{ae}$ (%)	$\phi_r$ (kPa)	$w_r$ (%)
N-1	110	46	18000	10,2
N-2	90	41	13000	6,8
N-3	80	39	6800	6,5
N-4	50	36,2	2700	6,3

SWC eğrileri değerlendirildiğinde, en düşük hava giriş değerinin N-4'te, en yüksek hava giriş değerinin ise N-1'de olduğu görülmektedir. Numune içerisinde yer alan iri dane miktarına bağlı olarak SWC eğrisinden elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur. İri dane miktarı fazla olan numunenin hava giriş değerinin küçük olması beklenen bir davranıştır. N-4 içerisindeki kil miktarı en az, kum miktarı ise en fazladır. N-1'de ise kil miktarı en fazla, kum miktarı en azdır. İri dane içeriği yüksek olan numunedeki boşluk hacmi fazla olduğundan su kaybı hızlı bir şekilde gerçekleşmiş ve

en düşük residüel değer (su muhtevası) N-4' te elde edilmiştir. En yüksek rezidüel değer N-1'de elde edilmiştir. N-1, en yüksek kil oranına sahip ve aynı zamanda likit limiti en yüksek olan numunedir.

Dört numune içerisinde en düşük hava giriş değeri 50 kPa ile N-4'te (kum miktarı en fazla) elde edilmiştir. Yani, numune içerisinde bulunan kum miktarının artması ile hava giriş değeri azalmıştır. İri dane yüzdesi fazla olan N-4, aynı kılcal gerilme değerine diğer üç numuneden daha düşük su muhtevasında ulaşmıştır.

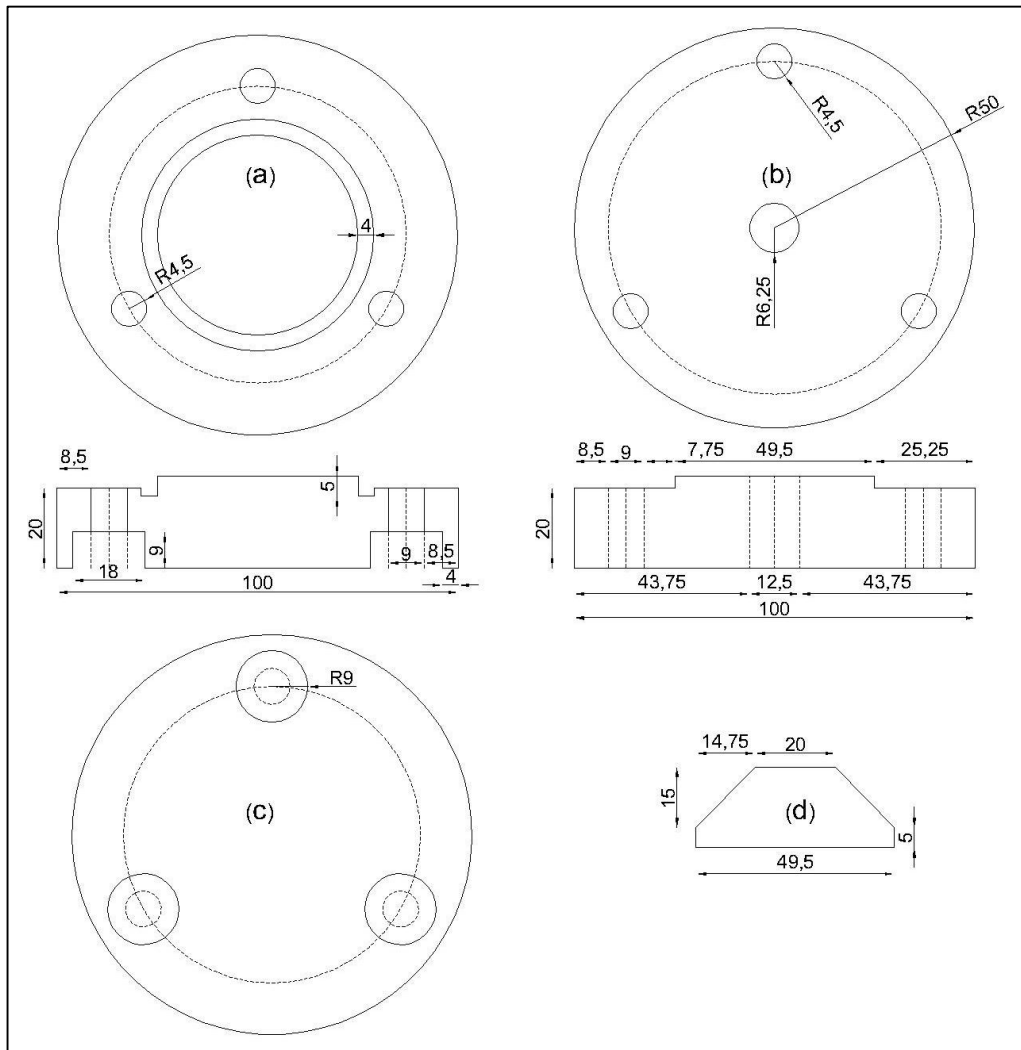
SWC eğrisinden elde edilen hava giriş değerleri üç eksenli hücre kesme deneylerinde uygulanacak sınır kılcal gerilme değerleri olarak kullanılmıştır. Hava giriş değeri, zeminlerin gözenek yapısındaki havanın sürekli hale geldiği en alt sınır olarak bilinmektedir. Bu nedenle, doymun olmayan zeminlerin kayma dayanımını belirlemek için yapılacak çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerindeki kılcal gerilme değerleri 50 kPa'nın üstünde tutulmuştur.

#### **4.5. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) Deney Yöntemi**

Bu tez çalışmasında ince dane oranının doymun olmayan ortam koşullarında kayma direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Fiziksel özellikleri belirlenen numunelerin kayma dayanımları modifiye edilmiş üç eksenli deney sisteminde emme kontrollü konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deneyler ile belirlenmiştir. Kayma direnci deneyleri esnasında boşluk hava basıncı ve boşluk suyu basınçları kontrol edilmiştir. Eksen kaydırma tekniğini uygulayabilmek için zemin numunesinin altına yüksek hava giriş değerli (5 bar) bir seramik disk yerleştirilmiştir. Bu seramik disk doymun durumda suyu geçirdiği halde kapasitesi ayarında havayı geçirmemektedir. Seramik disk boşluk suyu basıncı ve boşluk hava basıncının birbirinden bağımsız olarak ölçülebilmesi veya kontrol edilebilmesi için de kullanılmaktadır. Seramik disk, numune altına hava geçişini engellemek için uygulanacak kılcal gerilme değerinden daha büyük bir hava giriş basıncına sahip olmalıdır. Böylece deney sonuçlarına etki edebilecek bir hava varlığının veya istenmeyen bir su basıncının önüne geçilmiş olmaktadır.

#### 4.6. Emme kontrollü deneyler için geleneksel üç eksenli deney cihazının modifiye işlemi

Emme kontrollü deneyler için geleneksel üç eksenli hücre kesme deney cihazı modifiye edilerek doygun olmayan zeminler için kullanılabilir hale getirilmiştir. Modifiye işlemi için öncelikle 5 cm çaplı numunelerin hazırlanmasında kullanılan konsolidasyon hücreleri hazırlanmıştır. Tasarımı yapılan hücre tabanı ve başlıkları üretimi paslanmaz malzeme ile yaptırılmıştır. Ayrıca numunelerin bulamaçtan önce ön konsolidasyon ile hazırlanacağı şeffaf silindir hücreler pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Tasarlanan hücre tabanı Şekil 4.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Deney numunelerinin hazırlanması için tasarlanan konsolidasyon hücreleri (Ölçüler mm'dir).

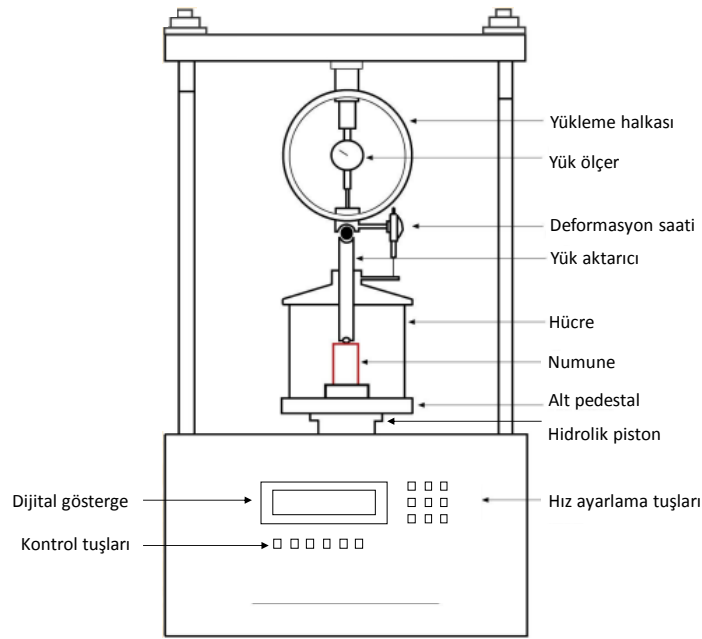
Şekil 4.16a.'da, ön konsolidasyon hücresinde numunenin oturtulacağı alt taban (pedestal) gösterilmiştir. Şekil 4.16b.'de ise, konsolidasyon hücresinin üst başlık bileşeni sunulmuştur. Şekil 4.16c.'de, konsolidasyon hücresinin üstten görünüşü verilmiştir. Numunenin konsolidasyon hücresine yerleştirilmesinden sonra pistondan gelen yükü numuneye uniform olarak dağıtan yükleme başlığı Şekil 4.16d.'de gösterilmiştir. Konsolidasyon hücresine ait verilen tüm boyutlar mm cinsindedir.

Emme kontrollü kesme deneyleri için yapılan modifikasyonlardaki en önemli hususlardan biri numunenin oturduğu alt tabanın iç kısmına helezon biçiminde bir kanal açılmasıdır. Pedestala açılan helezon kanal Şekil 4.17.' de gösterilmiştir. Konsolidasyon, kılcal gerilme ve kesme aşamalarında numuneden su çıkışının sürekli ve kolay olması için bu kanalın helezon biçiminde olması avantaj sağlamaktadır. Aksi takdirde numune altına yerleştirilen seramik disk ile diskin oturduğu yüzey arasında boşluk kalmamaktadır. Bu durumda numuneden çıkan su, seramik disk ile yüzey arasında sıkışmakta ve yanlış boşluk suyu basıncı okumalarına sebep olmaktadır.



Şekil 4.17. Alt pedestal içerisine açılan helezon biçimli detay.

Tez çalışmasında kullanılan üç eksenli hücre kesme deney cihazının hücre kısmına ait şematik genel görünüm Şekil 4.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Modifiye edilmiş üç eksenli hücre kesme deney aleti.

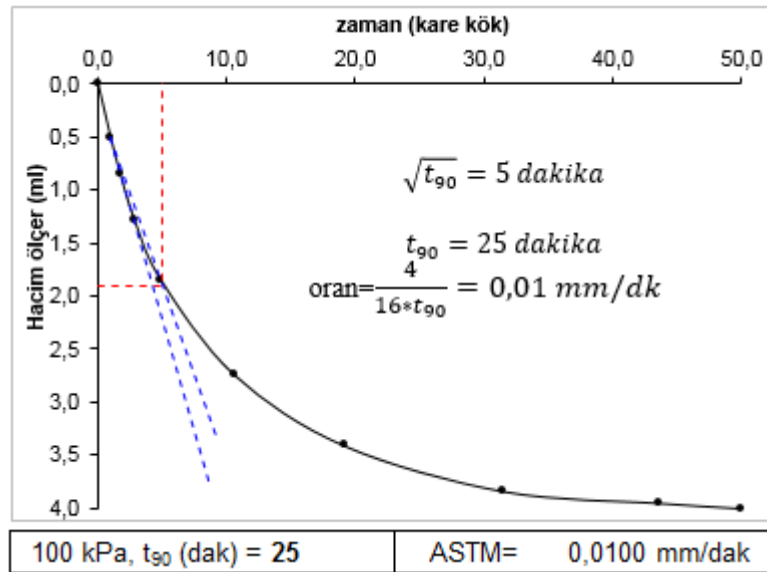
## 4.7. Üç Eksenli Hücre Kesme Deney Sonuçları

### 4.7.1. Doymun üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

Doymun olmayan zeminlerin kayma direnci davranışını belirlemek için öncelikle doymun zeminler üzerinde deneylerin yapılması ve kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi, çizilecek kayma direnci yüzeyi için gereklidir. Bu çalışmada, kullanılan numunelerin kayma direnci parametrelerini belirlemek için doymun numuneler üzerinde geleneksel çok aşamalı konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin çok aşamalı olarak yapılmasının birden fazla sebebi vardır. Doymun olmayan zeminlerde deney süreleri çok uzun zaman almaktadır. Ayrıca maliyet değerlerinin yüksek olması sebebi ile tek numune üzerinde ve birden fazla gerilme altında çok sayıda veri elde edilmeye çalışılmaktadır.

Üç eksenli hücre kesme deneyinde kesme hızının belirlenmesi için ASTM D7181'de önerilen yöntem kullanılmıştır. Buna göre tüm numuneler için kesme hızı 0,01 mm/dk olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.19.).





Şekil 4.19. Üç eksenli deney aşaması için kesme hızının belirlenmesi.

Deneyleerin kesme hızları deneysel çalışmalarla veya boşluk suyu basıncının denge durumuna göre belirlenebilmektedir. Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleerinin kesme aşamalarında boşluk suyu basıncının artma ihtimali bulunmaktadır. Bu açıdanda kullanılan kesme hızı teyit edilmiştir.

Konsolidasyonlu-drenajlı (CD) ortam koşullarında ve doygun numuneler üzerinde yapılan üç eksenli hücre kesme deneyinde uygulanan hücre basıncı ile ve boşluk suyu basıncı değlereri Tablo 4.3.'te gösterilmiştir.

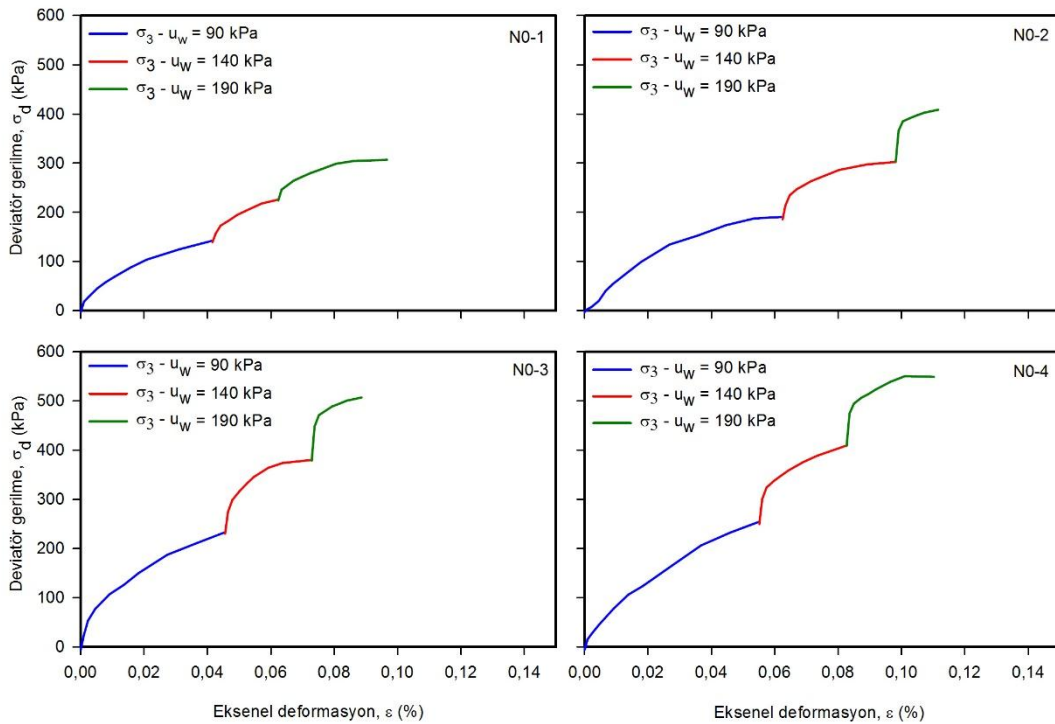
Tablo 4.3. Doygun numunelere ait gerilme durum değışkenleri

	$\sigma_3$	$u_w$	$\sigma_3 - u_w$
1.aşama	140	50	90
2.aşama	190	50	140
3.aşama	240	50	190

Doygun deneyleerde boşluk geri basıncı değeri sabit 50 kPa alınmıştır. Çok aşamalı deneyleerde değışken parametre olarak hücre basıncı değeri seçilmiştir. Her numune için üç farklı aşamada uygulanan efektif gerilme değlereri sırası ile 90, 140 ve 190 kPa olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.20.'de dört farklı doymun zemin numunesine ait konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli hücre kesme deney sonuçları görülmektedir. Elde edilen deney sonuçlarına göre en düşük kayma direnci mukavemeti N0-1'de elde edilirken, en büyük kayma direncine N0-4 numunesinde ulaşılmıştır. Tüm numunelerde 3. aşamalar sonucunda en büyük deviatör gerilmeye kum içeriği en fazla olan N0-4'te ulaşılmıştır. Artam kum içeriğine göre numunelerden elde edilen kayma direnci değerleri artış göstermiştir.

Şekil 4.20.'de gösterilen çok aşamalı hücre kesme deneylerine ait gerilme-şekil değiştirme deney sonuçlarından da anlaşıldığı üzere, kesme aşamalarında elde edilen deviatör gerilme değerlerinin artış eğimlerinde azalma meydana geldiği değerlerde kesme aşaması sonlandırılmış ve diğer aşamaya geçilir. Söz konusu grafiklerde, her eğrinin farklı eğime sahip olduğu görülmektedir. Numune içeriklerindeki farklılıklar deney sonuçlarını değiştirebilecek etkenlerdir. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği laboratuvarın fiziki ortam koşulları sabit tutulmuştur.



Şekil 4.20. Doymun zeminler için çok aşamalı hücre kesme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

N0-1 numunesinde kil içeriğinin fazla olması diğer numunelere göre daha hızlı direnç kaybı göstermesine sebep olmuştur. Kil içeriği yüksek olan numunelerin kayma

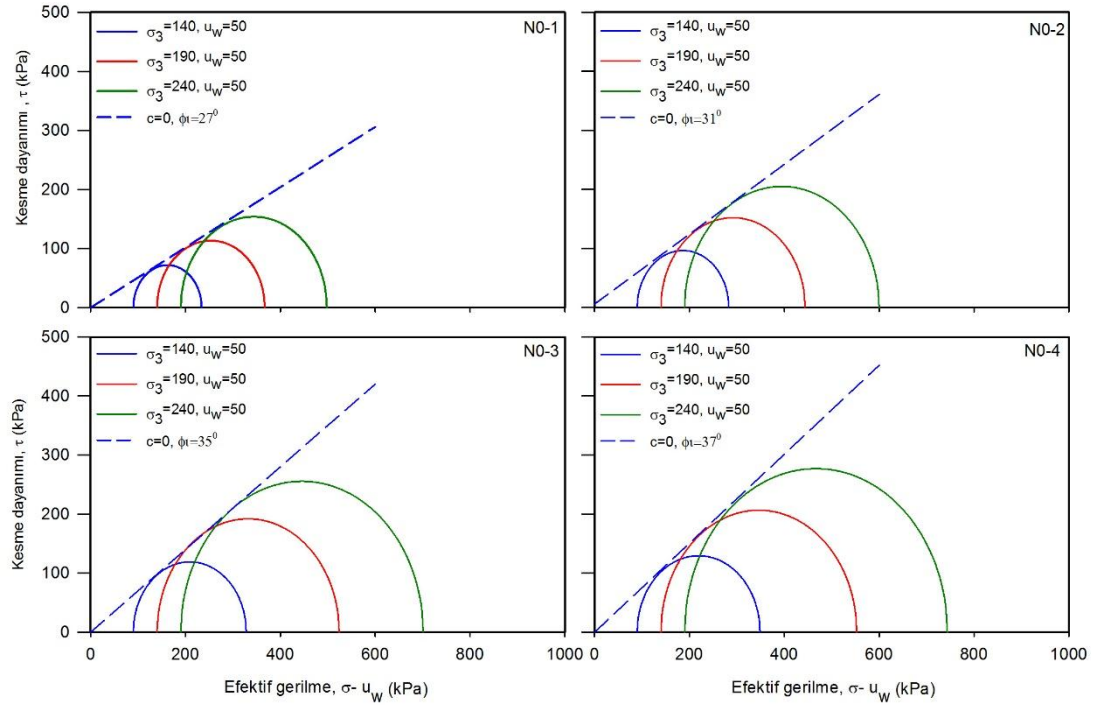
direnci değerleri düşmüştür. Numuneler içerisinde bulunan kum oranı arttıkça kayma direnci değerleride artış göstermiştir. Bunun sonucunda en fazla kum içeriğine sahip N0-4, en fazla yük alan (en dirençli) numune olmuştur.

Kil oranı fazla olan N0-1 numunesi 3. aşama sonunda yaklaşık %10'luk birim deformasyon değerine ulaşırken, kum içeriği en fazla olan N0-4 ise yaklaşık %12'lik birim deformasyon değerini görmüştür. Deviatör gerilmelerde N0-1 için bir önceki aşamaya göre sırasıyla %36,56 ve %26,30 oranında bir artış elde edilmiştir. Aynı gerilme koşullarındaki N0-2'de ise bir önceki aşamaya göre sırasıyla %36,51 ve %25,85 oranlarında deviatör gerilme artışı elde edilmiştir. Benzer şekilde N0-3 ve N0-4'deki deviatör gerilme artışları Tablo 4.4.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Doymun zemin çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviatör gerilme artış oranları

	1. aşama		2. aşama		3. aşama	
	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (1. aşamaya göre)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)	
1. Seri	N0-1	144	227	36,56	308	26,30
	N0-2	193	304	36,51	410	25,85
	N0-3	238	384	38,02	511	24,85
	N0-4	259	413	37,29	552	25,18

Şekil 4.21.'de doymun ve konsolidasyonlu-drenajlı şartlar altında gerçekleştirilen dört numuneye ait üç eksenli deney sonuçları gösterilmiştir. Deneyler geleneksel üç eksenli deney cihazında çok aşamalı olarak yapılmıştır. Çizilen Mohr daireleri kullanılarak dört numune için kayma direnci parametreleri (görünür kohezyon ve kayma direnci açısı) belirlenmiştir. Grafik sonuçları incelendiğinde en düşük kayma direnci açısının ( $\phi'$ ) N0-1'de olduğu belirlenmiştir. En az kil ve en çok kum oranına sahip N0-4'te ise beklenildiği gibi en yüksek kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) elde edilmiştir. Her numuneye ait deney sonucundan elde edilen kayma direnci açıları kullanılarak Mohr dairelerine teğet çizilerek her numune için kırılma zarfları oluşturulmuştur. Bu kırılma zarfının y eksenini kestiği nokta doymun zemin numunesine ait efektif kohezyon ( $c'$ ) değerini vermektedir. Şekil 4.21.'de verilen sonuçlara göre tüm numunelerde efektif kohezyon değeri 0 (sıfır) olarak bulunmuştur.



Şekil 4.21. Doymun numunelere ait efektif gerilme ile kesme dayanımı arasındaki ilişki.

N0-1, N0-2, N0-3 ve N0-4 numunelerinin deney sonuçları Tablo 4.5.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Doymun zemin numunelerine ait çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

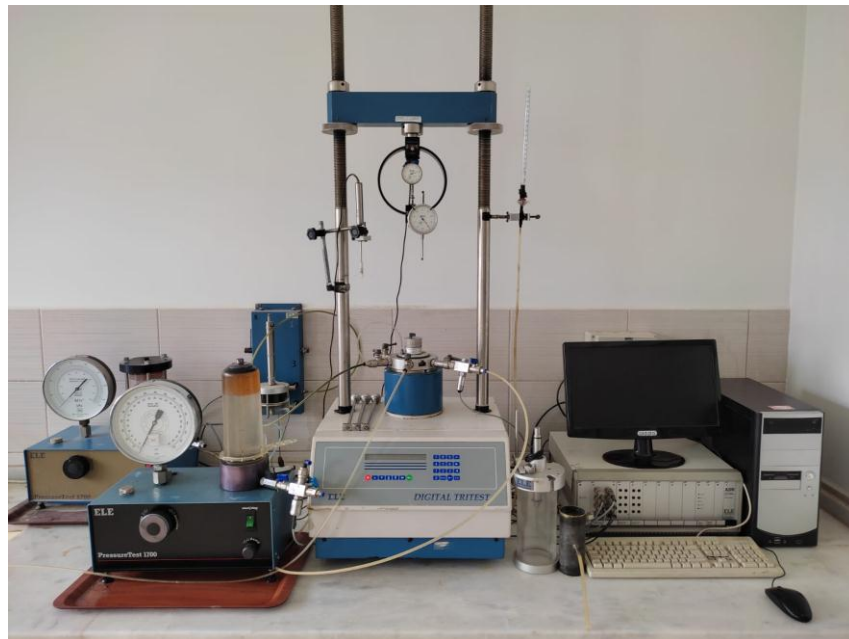
Numune ismi	Kesme aşaması	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_3 - u_w$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (Derece)
N0-1	1. aşama	140	90	145	0	27
	2. aşama	190	140	228		
	3. aşama	240	190	308		
N0-2	1. aşama	140	90	193	0	31
	2. aşama	190	140	304		
	3. aşama	240	190	410		
N0-3	1. aşama	140	90	238	0	35
	2. aşama	190	140	384		
	3. aşama	240	190	511		
N0-4	1. aşama	140	90	259	0	37
	2. aşama	190	140	413		
	3. aşama	240	190	554		

Tablo 4.5.'te gösterilen sonuçlara göre artan kum içeriği kayma direncini artırmaktadır. Ayrıca her numune için kesme aşamalarında uygulanan efektif gerilme değerinin artışı ile kayma direncinde artış sağlanmaktadır. En düşük kum içeriği ve en fazla kil içeriği olan N0-1'de en düşük kayma direnci elde edilmiştir. En yüksek kayma direnci ise en

yüksek kum içeriğine ve en düşük kil içeriğine sahip N0-4'te belirlenmiştir. Sonuçlar kum içeriğinin artmasının kayma direnci açısını ( $\phi'$ ) yükselttiğini göstermiştir.

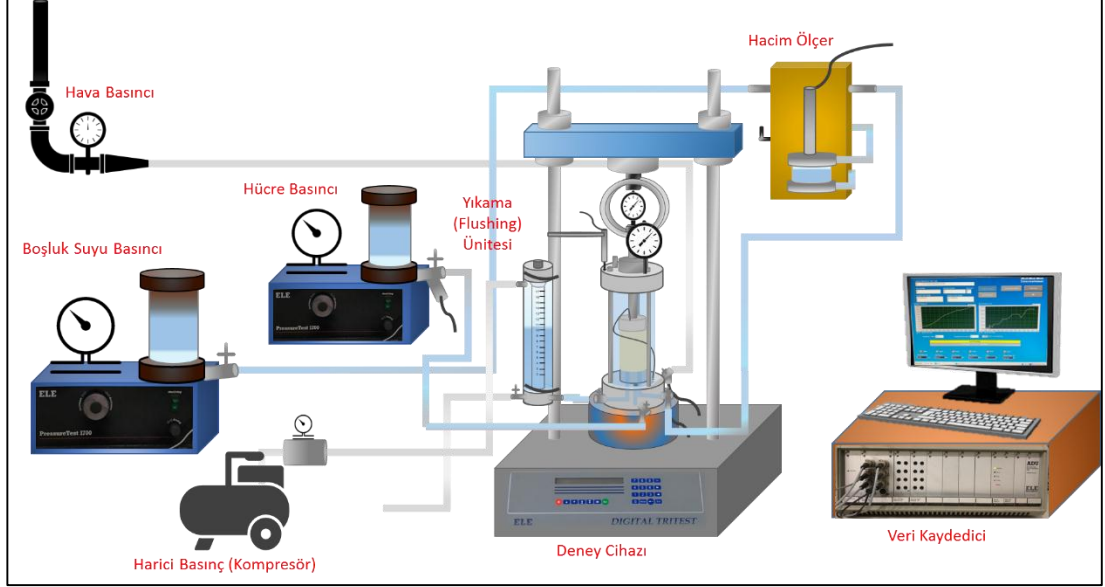
#### 4.7.2. Emme kontrollü (doygun olmayan) üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

Doygun olmayan zeminlerin mekanik davranışları ve deney aşamaları (Doyurma, konsolidasyon, kılcal gerilme ve kesme) kılcal gerilme ( $u_a-u_w$ ) ve net normal gerilme ( $\sigma-u_a$ ) değişkenleri tarafından başarılı bir şekilde kontrol edilebilmektedir (Fredlund ve Morgenstern, 1977). Doygun olmayan ince daneli zeminlerin kayma direnci parametrelerini elde etmek için, doygun numunelerdeki prosedüre benzer olarak konsolidasyonlu-drenajlı (CD) deney yöntemi tercih edilmiştir. Numunelerin istenen kılcal gerilme değerine sahip olabilmesi için doygun deney sisteminden farklı olarak; hava ve boşluk suyu basıncı ile eksen kaydırma tekniği uygulanmıştır. Doygun zemin deneylerinde kullanılan deney cihazı Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Bu cihaz modifiye edilerek doygun olmayan zemin şartlarına uygun hale getirilmiştir. Hücre tabanına yüksek hava giriş değerli seramik disk ve bu seramiğin altında birikecek havanın dışarı alınması için yıkama ünitesi (flushing device) ve harici bir kompresör eklenmiştir. Ayrıca kılcal gerilme uygulayabilmek için ikinci harici bir kompresörden hava basıncı sağlanmıştır.



Şekil 4.22. Çalışmada doygun deneyler için kullanılan üç eksenli hücre kesme deney cihazı.

Doymun olmayan deney sistemi yapılan bu modifikasyonlarla birlikte Şekil 4.23.'teki şematik bilgisayar çizimlerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Çalışmada doymun olmayan deneyler için kullanılan üç eksenli hücre kesme deney cihazı.

Eksen kaydırma tekniğinin uygulanabilmesi için, numunenin üst kısmına bağlanan bir vana vasıtasıyla numuneye hava basıncı verilmiştir. Boşluk suyu basıncı ise numunenin alt kısmına bağlanmıştır. Doymun olmayan deneyler, doymun deneylere benzer olarak numunelerde meydana gelebilecek farklılıkları en aza indirmek ve az sayıda numune ile çok fazla veri elde etmek için çok aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir.

Doymun olmayan zeminlerin mekanik davranışını belirlemek için boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) ve boşluk suyu basınçlarının ( $u_w$ ) ölçülmesi veya kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle hücre tabanında hava çıkışını engelleyen ancak suyun geçişine izin veren seramik bir disk kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan seramik diskin hava giriş değeri 500 kPa (5 bar)'dır. Boşluk suyu basınçları, seramik diskin altındaki doymun hatta bağlanan 1700 kPa kapasiteli basınç sağlar ile uygulanmıştır.

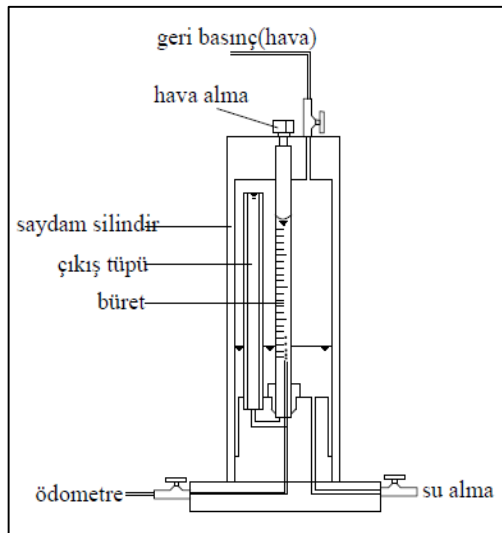
Söz konusu seramik disk, deneylerde kullanılmadan önce 24 saat süre ile su içinde bekletilerek doyurulmuştur. Bu doyurma işleminin yapılmaması boşluk suyu

basınçlarının hatalı ölçülmesine sebep olabilmektedir. Şekil 4.24.'te 5 bar basınca sahip seramik diskin doyurma işlemi için su içinde bekletilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.24. 5 barlık seramik poroz taş ve filtre kağıdının doyurma aşaması.

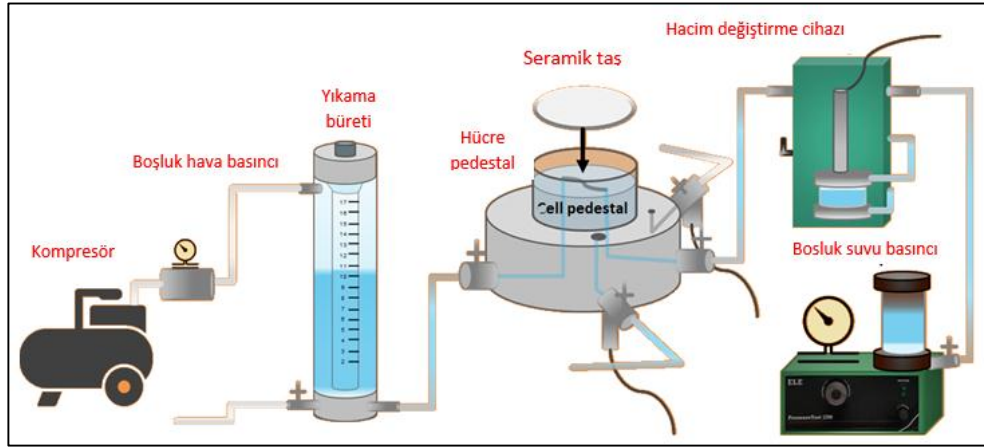
Numuneye uygulanan havanın bir kısmı difüzyon yolu ile seramik diskin altında birikebilmektedir. Bu sebeple boşluk suyu basıncı ve hacim değişim okumaları hatalı olabilmektedir. Alt pedestaldaki helezon boşlukta biriken bu çözülmüş hava basınçlı su ile drene edilir. Yıkama sistemi (flushing) sayesinde (suyun drene edilmesi), seramik diskin altında biriken hava periyodik aralıklarla dışarı alınır. Bu işlem (yıkama-flush) için tasarlanan yıkama sistemi Şekil 4.25.'te gösterilmiştir. Hem yıkama sistemi hem de kılcal gerilme kontrolü için gerekli olan hava basıncı harici bir kompresör ile sağlanmıştır.



Şekil 4.25. Numune altında biriken havanın alınmasında kullanılan yıkama sistemi (Özocak, 2003).

Araştırmacılar kılcal gerilme uygulamak için kullanılan eksen kaydırma tekniğinin 50 kPa üzerindeki kılcal gerilme değerlerinde çok daha doğru sonuçlar verdiğini söylemişlerdir (Bocking ve Fredlund, 1980; Ho ve Fredlund, 1982). Bu bilgiler ışığında, ayrıca SWC eğrilerinden elde edilen hava giriş değerleri uyarınca minimum kılcal gerilme 50 kPa olarak seçilmiştir.

Bu yıkama sistemi sayesinde numune altında su içerisinde biriken hava kabarcıkları dışarıya alınarak deneylerden elde edilecek sonuçların hatalı olmasının önüne geçilmektedir. Bu tez çalışmasında da yıkama (flushing) işlemi hem konsolidasyon aşamasında hem de kesme aşamalarında uygulanmıştır. Yıkama ünitesine ait tüm yardımcı donanımlar ve detaylar Şekil 4.26.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Yıkama (flushing) sistemi şematik gösterimi.

Şekil 4.26'da gösterilen yıkama (flush) sistemi ile konsolidasyon ve kesme aşamaları sonunda seramik disk altında birikmiş hava dışarı çıkarılır. Havanın dışarı alınabilmesi için numunenin alt kısmına bağlanan vanalardan su geçirilmektedir. Bu sayede diskin altına geçen hava miktarı bulunmuş olur. Sistemde yer alan yıkama bütetinin bir ucu numunenin altına yani boşluk suyu basıncı vanasına takılı iken diğer ucu harici kompresöre bağlanır. Bütetin iki ucu arasında 20-25 kPa'lık bir fark oluşturularak kompresör çalıştırılır. Böylece kompresörden bütete bir basınç uygulanmış olur ve bütette bulunan su numunenin altına doğru hareket eder. Numunenin altına doğru hareket eden su, helezon kısımda biriken boşlukları doygun hale getirdikten sonra bütetin diğer ucundan dışarı alınır. Bütetin üzerindeki ölçeklendirilmiş sistem ile hücre



içerisine giren su miktarı ölçülür. Yıkama işleminden sonra bir sonraki deney aşamasına geçilir.

Numune üç eksenli hücreye yerleştirildikten sonra hücre su ile doldurulur ve numune doyurma işlemine tabi tutulur. Doyurma işleminde boşluk suyu basıncı ölçülerek numunenin doygunluğa yakınlığı belirlenir. Zeminler için doygunluğun göstergesi olan boşluk suyu basıncı parametresi B değeri için sınır değer 0,95 kabul edilmektedir. Doyurma işleminden sonra tüm numuneler Tablo 4.6.'da verilen basınçlar altında konsolide edilmişlerdir.

Tablo 4.6. Doygun olmayan zemin deneyleri için gerilme değişkenleri

Aşama	$\sigma_3$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$(\sigma_3 - u_a)$ (kPa)	$(u_a - u_w)$ (kPa)
1	140	100	50	40	50
2	190	150	50	40	100
3	290	200	50	40	150

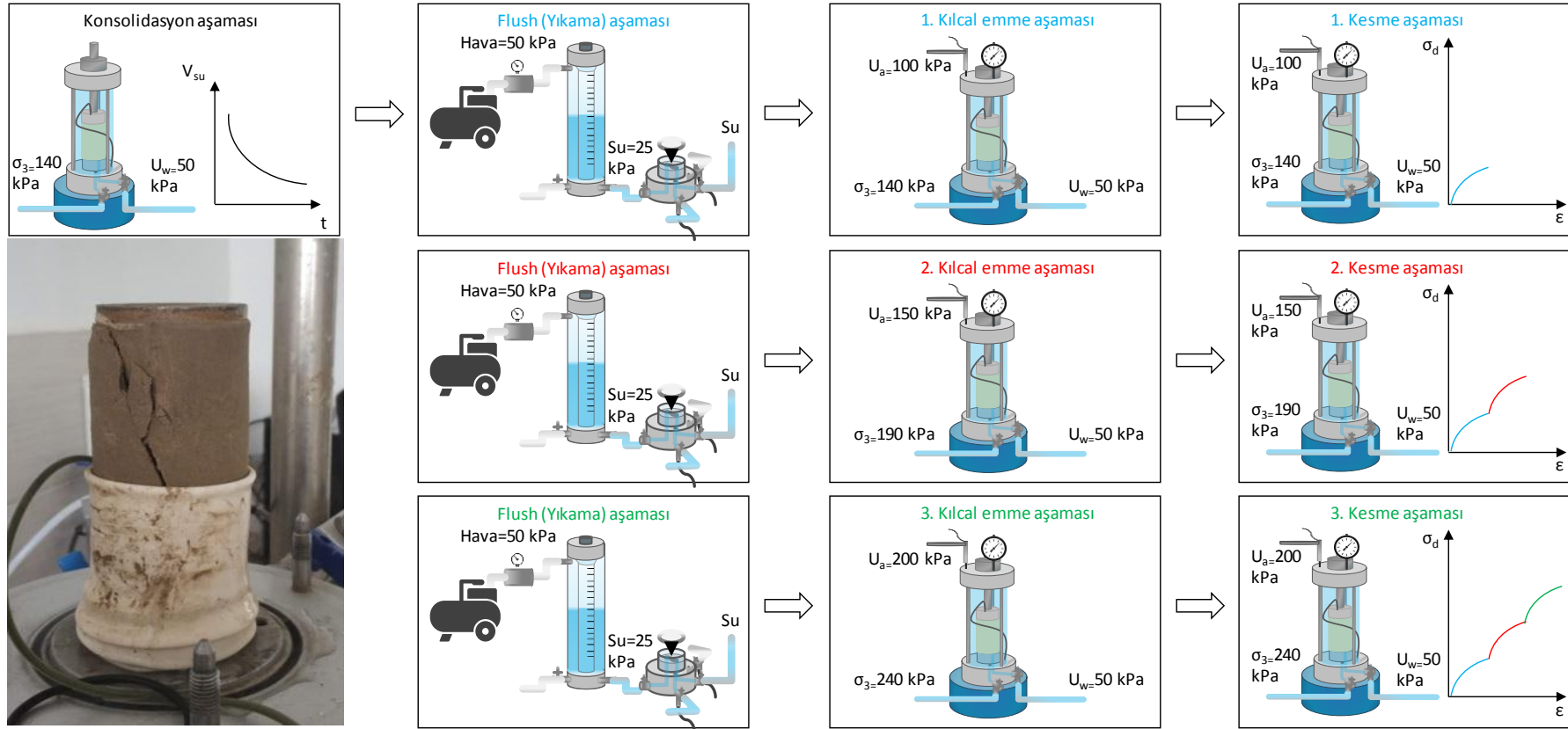
Numunelere uygulanacak hücre basıncı ( $\sigma_3$ ) ve boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) ayarlandıktan sonra konsolidasyon aşaması başlatılır ve numuneden çıkan su kontrol edilir. Konsolidasyon aşaması numuneden su çıkışı durunca sonlandırılır. Bu aşamada numuneden çıkan su miktarı hacim ölçer tarafından ölçülmektedir.

Konsolidasyon tamamlandıktan sonra seramik disk altında biriken havanın dışarı alınması için yıkama işlemi gerçekleştirilir. Yıkama işlemi tamamlandıktan sonra kılcal gerilme aşamasına geçilir.

Kılcal gerilme uygulama aşaması başlatıldıktan sonra boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) değeri takip edilir. Bu aşamada numunenin üstünden uygulanan hava basıncının ( $u_a$ ) numunenin altına uygulanan boşluk suyu basıncından büyük olması gerekmektedir. Uygulanan gerilmeler altında numuneden su çıkışında takip edilir. Numuneden su çıkışının durması, kılcal gerilme aşamasının dengelenmesi (sonlanması) anlamına gelmektedir. Numunenin dengeye ulaşması durumunda kesme aşamasına geçilir. Çok aşamalı kesme aşamasında uygulanan basınçlar Tablo 4.6.'da gösterilmiştir.

Kesme hızı 0,01 mm/dk olarak belirlenmiştir (Şekil 4.19). Kesme işlemi esnasında boşluk suyu basıncı sürekli takip edilmiştir. İlk kesme aşamasının ne zaman sonlandırılacağına uygulanan aksel gerilmeye karşı çizilen deformasyon eğrisi takip edilerek karar verilmiştir. Grafik üzerinde numunenin gösterdiği direnç artış eğimi azaldığında kesme aşaması sonlandırılmıştır. 2. aşama için ilk aşamada numuneye uygulanan aksel yük sıfırlanmadan belirlenen gerilme durum değişkenleri ayarlanır. Artırılan hücre basıncı ve boşluk hava basınç değerleri için kılcal gerilme aşaması başlatılır. Kılcal gerilme aşaması numuneden su çıkışı tamamlanınca sonlandırılır ve numune aynı basınçlar altında aynı kesme hızında kesilir. 2. kesme aşaması tamamlanan numune için 3. aşamada uygulanacak olan hücre basıncı ve boşluk hava basınç değerleri numuneye uygulanır ve kılcal gerilme aşaması başlatılır. Kılcal gerilme aşaması tamamlandıktan sonra son kesme aşaması başlatılır ve numunede yenilme meydana geldiğinde veya artış eğimi azaldığında deney sonlandırılır. Deneyi tamamlanan numune hücreden çıkarılır ve kuru ağırlığının alınması için etüve atılır.

Bu tez kapsamındaki üç eksenli hücre kesme deney aşamalarında iki ayrı uygulama yöntemi kullanılmıştır. Çalışmadaki 1. ve 2. seri deneylerin uygulandığı (Net normal gerilme sabit, kılcal gerilme değişken) ve sonuçlarının alındığı deneysel çalışmalara Yöntem 1 ismi verilmiştir. 3.- 4. ve 5. seri deneylerinin uygulanmasına (Net normal gerilme değişken, kılcal gerilme sabit) ise Yöntem 2 ismi verilmiştir. Uygulanan her iki yöntemde zemin numunelerine ait kayma direnci değerleri tespit edilmiş ve detaylı tüm bulgular ilgili deneysel çalışma başlığının altında anlatılmıştır. Doygun olmayan deneylerde uygulanan aşamalar bilgisayar ortamında tüm detayları ile çizilerek Şekil 4.27.'de gösterilmiştir.



Deney Sonu

Şekil 4.27. Doygun olmayan zeminler için bir numuneye ait tüm aşamaların detayı.

#### 4.7.2.1. 1. seri emme kontrollü zemin üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

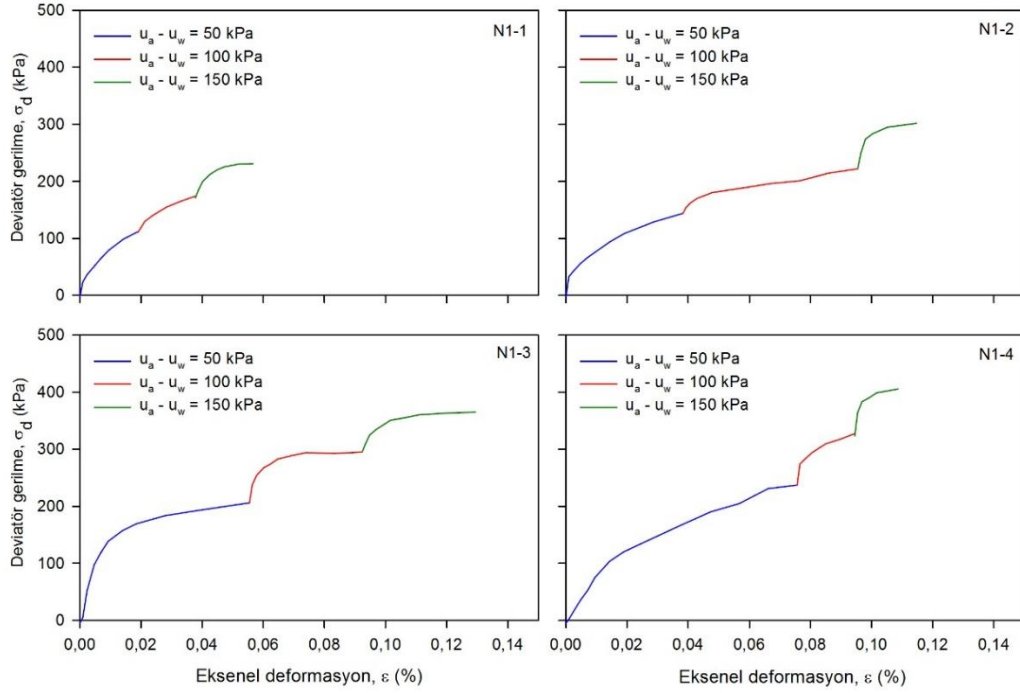
Bu seride kılcal gerilme değerindeki değişimi sağlamak için boşluk suyu basıncı 50 kPa ( $u_w$ ) değerinde sabit tutulmuş ve boşluk hava basıncı ise ( $u_a$ ) her aşamada kademeli olarak artırılmıştır. 1. seriye ait doymun olmayan konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme deneyi için uygulanan gerilmeler Tablo 4.7.'de gösterilmiştir.

Bu aşamada çevre basıncı ( $\sigma_3$ ) her bir aşamada 140, 190 ve 240 kPa alınmıştır. Buna karşılık hava basıncı ( $u_a$ ) sırasıyla 100, 150, 200 kPa değerlerinde tutulmuştur. Su basıncı ( $u_w$ ) tüm aşamalarda sabit (50 kPa) olduğundan ( $u_a-u_w$ ) kılcal gerilme değeri sırası ile 50, 100, 150 kPa olarak tutulmuştur.

Tablo 4.7. 1. seri gerilme durum değişkenleri

	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3-u_a$ (kPa)	$u_a-u_w$ (kPa)
1.aşama	140	50	100	40	50
2.aşama	190	50	150	40	100
3.aşama	240	50	200	40	150

Şekil 4.28.'de sırasıyla 50, 100 ve 150 kPa farklı kılcal gerilme değerlerinde kesilen numunelerin gerilme – eksenel şekil değiştirme ilişkileri gösterilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde; numuneye uygulanan net normal gerilme değeri ve kılcal gerilme değerinin etkisine bağlı olarak numunelerin rijitliğinin arttığı rahatlıkla görülebilir. Bu durumun uygulanan kılcal gerilmenin etkisi ile zemin danelerinin birbirine daha sıkı tutunmalarının sonucu olarak meydana gelmektedir.



Şekil 4.28. 1. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Çok aşamalı deneylerde aksel deformasyon ve gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin sergilemiş olduğu eğilimlere göre deneylerin hangi aşamada sonlandırılacağı konusu kayma direnci parametrelerinin doğru olarak tahmin edilebilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Fredlund ve ark. (2012) deney aşamalarının numune yenilmek üzere iken sonlandırılabilceğini belirtmişlerdir. Numunelerin özellikle 1. aşamada (en düşük çevre basıncı aşaması) aşırı deformasyona uğratılmaması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca 1. aşamada aşırı deformasyona uğrayan numunelerin diğer aşamalarda daha zayıf dayanım göstereceğini ve gerçek mukavemete ulaşamayacaklarını söylemişlerdir. Bu çalışmada yapılan tüm üç eksenli deneylerde bu detaylar dikkate alınarak süreç yürütülmüştür. Numuneler aşırı deformasyona uğramadan, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başladığı seviyelerde aşama sonlandırılmış ve sonraki aşamaya geçilmiştir (Şekil 4.28.).

Fredlund ve ark. (2012), 2. ve 3. aşamalar sırasında zemin yapılarının bir miktar bozularak deney sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebileceklerini söylemişlerdir. Şekil 4.28.'de verilen gerilme-şekil değiştirme sonuçlarındaki 2. ve 3. aşamalarda ortaya çıkan kayma direnci artışlarının, 1. aşamadaki kayma direnci artışları kadar yüksek

olmadıkları sonucuna ulaşılmıştır. Tez kapsamında yürütülen tüm emme kontrollü deneylerin 2. ve 3. aşamalarında benzer durumla karşılaşılmıştır.

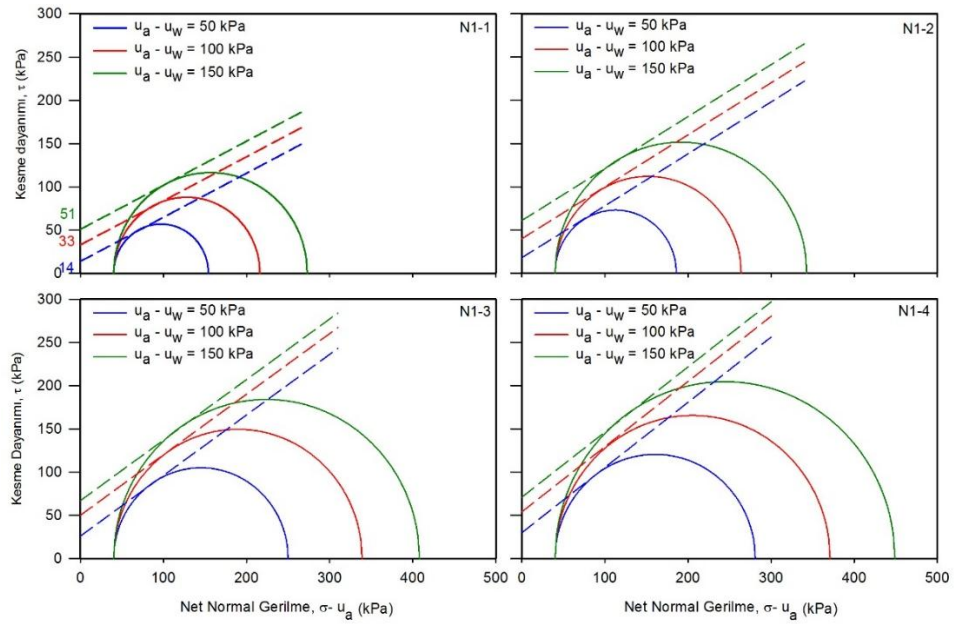
1. seri deney sonuçlarından N1-1 numunesinin yüksek kil içeriğine sahip olmasından dolayı diğer numunelere göre daha çabuk direnç kaybettiği sonucuna ulaşılmıştır. Kum oranı arttıkça numunelerin daha fazla direnç kazandığı izlenmiştir. Bunun sonucunda doğal olarak en fazla kum içeriğe sahip N1-4 numunesi en fazla yük alan numune olmuştur. Kil oranı fazla olan numunelerin gerilme-deformasyon ilişkilerinin eğimleri, kum oranı fazla olan numunelere göre daha düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu sonuçlara göre kum miktarının artması numunelerin elastik davranış sergilemesi potansiyelini artırmaktadır. Kil oranı en fazla olan N1-1 numunesinin 3. aşama sonunda aldığı maksimum aksenal yüke yaklaşık %6 birim deformasyon değerlerinde ulaşılırken, kum içeriği en fazla olan N1-4 numunesinde son aşamada maksimum yüke yaklaşık olarak %12 birim deformasyon değerlerinde ulaşılmıştır.

Sabit tutulan net normal gerilme (40 kPa) ve her aşamada artan kılcal gerilme (50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa) ile elde edilen deviatör gerilmelerde sırası ile bir önceki aşamaya göre N1-1 numunesinde %35,23 ve %23,81 oranında bir artış elde edilmiştir. N1-2 deney numunesinde yapılan üç eksenli deney sonuçlarında ise sırası ile bir önceki aşamaya göre %34,82 ve %25,08 oranlarında deviatör gerilme artışı elde edilmiştir. Benzer şekilde N1-3 ve N1-4 numaralı numunelerin deney sonuçlarına göre deviatör gerilmelerde elde edilen artışlar Tablo 4.8.'de gösterilmiştir. Fredlund ve ark. (2012), çok aşamalı kesilen deney numunelerinin giderek azalan bir mukavemet artışı oranına sahip olabileceklerini belirtmişlerdir. Tablo 4.8.'deki sonuçlar incelendiğinde aşamalar arasında elde edilen sonuçların bu bilgi ile örtüştüğü görülmektedir.

Tablo 4.8. 1. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviatör gerilme artış oranları

	1. aşama		2. aşama		3. aşama	
	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (1. aşamaya göre)		$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)
1. Seri	N1-1	114	176	35,23	231	23,81
	N1-2	146	224	34,82	299	25,08
	N1-3	207	294	29,59	360	18,33
	N1-4	241	326	26,07	400	18,50

Modifiye üç eksenli deney cihazında, eksen kaydırma tekniği ile yürütülen 1. seri numunelerin drenajlı kesme deney sonuçları Şekil 4.29.'da gösterilmiştir. Doygun zemin numunesinden elde edilen kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) ile her bir kılcal gerilme değeri için Mohr dairelerine teğet bir kırılma zarfı çizilmiştir. Doygun olmayan deneylerde Mohr dairelerine teğet olarak çizilen doğrusal çizginin y eksenini kestiği nokta ilgili kılcal gerilmedeki görünür kohezyon ( $c$ ) değerini vermektedir.



Şekil 4.29. 1. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki.

N1-1, N1-2, N1-3 ve N1-4 numunelerinden farklı emme değerleri için elde edilen görünür kohezyon değerleri Tablo 4.9.'da gösterilmiştir. N1-1, N1-2, N1-3 numunelerinde kılcal gerilme değeri arttıkça, elde edilen görünür kohezyon değerleri artmaktadır. Beklenildiği gibi numunelere uygulanan kılcal gerilmenin artması ile deviator gerilmeler artmakta ve Mohr dairelerinin çapları büyümektedir.

Tablo 4.9. 1. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

1.SERİ-DOZ								
N-1 (En Üst)								
	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3-u_a$ (kPa)	$u_a-u_w$ (kPa)	C (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\Phi^b$ (Derece)
1.aşama	140	50	100	40	50	14	114	
2.aşama	190	50	150	40	100	33	176	18
3.aşama	240	50	200	40	150	51	231	
N-2 (Doğal numune)								
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$			
1.aşama	140	50	100	40	50	17	146	
2.aşama	190	50	150	40	100	40	224	22
3.aşama	240	50	200	40	150	60	299	
N-3 (Ak_Özgün)								
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$			
1.aşama	140	50	100	40	50	25	207	
2.aşama	190	50	150	40	100	48	294	25
3.aşama	240	50	200	40	150	67	360	
N-4 (Yenikent)								
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$			
1.aşama	140	50	100	40	50	30	241	
2.aşama	190	50	150	40	100	52	326	37/18(Çift doğrusal)
3.aşama	240	50	200	40	150	70	400	

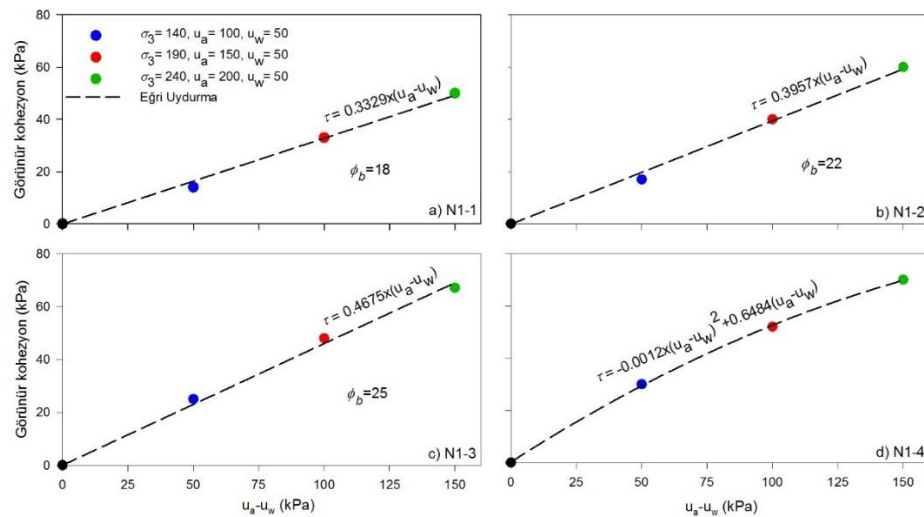
Şekil 4.29.'daki grafiklere göre en fazla kil içeren N1-1 en düşük görünür kohezyona sahipken, en az kil içeren N1-4 en yüksek görünür kohezyon değerini vermektedir. Aynı zamanda en yüksek kum içeriğe sahip N1-4 numunesinde en yüksek dayanım elde edilmiştir. Görünür kohezyon değeri artan kılcal gerilme ile artmaktadır. Kum içeriği yüksek olan numunelerde artan kılcal gerilme değerleri ile kayma direncindeki bu artışın etkisi daha fazladır.

Numunelere uygulanan kılcal gerilmeye bağlı olarak görünür kohezyon değerlerini gösteren grafikler incelendiği zaman, N1-4'te 50 kPa değerinden sonra görünür kohezyonun doğrusal olarak artmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte söz konusu bu değer, N4 numunesinin hava giriş değeri olan 50 kPa ile çakışması dikkat çekmektedir.

Fredlund ve ark. (1987), doygun olmayan zeminlerdeki doğrusal olmayan kırılma zarfi eğilimlerinin tam olarak gösterilebilmesi için uygulanan emme aralığının geniş tutulması gerektiğini söylemişlerdir. Bu bilgiler göz önüne alınarak tez kapsamında emme aralığı 50 kPa ile 150 kPa aralığında tutulmuştur.



Şekil 4.30. emme kontrollü deneylerde kılcal gerilmeye ( $u_a - u_w$ ) - görünür kohezyon ilişkisini (c) göstermektedir. Numunelere uygulanan kılcal gerilme ve görünür kohezyon değerleri arasında genelde doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Kılcal gerilmenin küçük olduğu deneylerde kırılma zarfı doğrusaldır. Ancak, N1-4 50 kPa kılcal gerilmeden itibaren doğrusal olmayan bir davranış sergilemiştir. Bu kılcal gerilme değeri, numunelerin SWC eğrilerinden elde edilmiştir (Şekil 4.15. ; Tablo 4.2.). SWC eğrilerine göre tüm numunelerdeki hava giriş değerleri 50-110 kPa arasında değişmektedir. Literatürde numunelere uygulanan hava giriş değerlerine göre uygulanan emmeye bağlı olarak numunelerin çift doğrusal davranış sergileyebileceklerini öne süren çalışmalarda mevcuttur (Zhao ve ark., 2013).



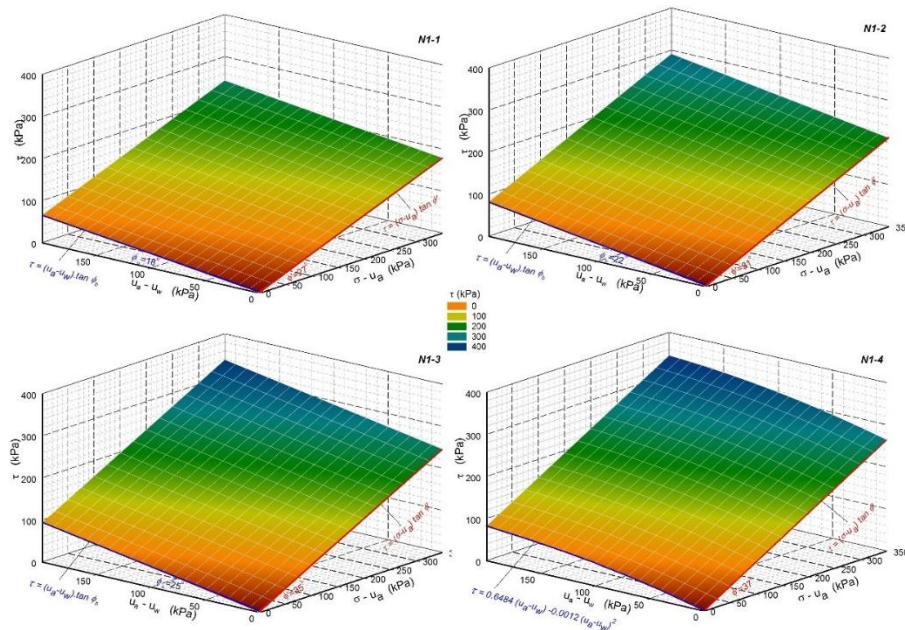
Şekil 4.30. 1. seri kılcal gerilmeye karşılık görünür kohezyon değerleri (Doğrun durumda kohezyon değerleri 0'dır).

Vanapalli ve ark. (1996), Fredlund ve ark. (1987), Rassam ve Cook (2002) ve Fredlund ve ark. (2012) kayma direncinin hava giriş değerine kadar doğrusal olarak arttığını ve daha büyük emmelerde ise kayma direncinde doğrusal olmayan bir ilişkinin meydana geldiğini belirtmişlerdir. Rezidüel (kalıcı / kalıntı) emme değerinden sonra kayma direncinin artabileceğini, azalabileceğini ve sabit kalabileceğini de belirtmişlerdir. Özellikle çoğu araştırmacılar kumlu ve siltli zeminlerde kalıcı emme değerinden sonra kayma direnci artışının düşebileceğini ifade etmişlerdir. Numuneler kalıcı su içeriği değerine ulaştığında genellikle gözeneklerinde çok az su kalmaktadır. Özellikle kum ve siltlerde kalıcı emme değerleri çok düşüktür. Buna karşılık, killer yüksek emme

değerlerinde bile kayma direncine katkıda bulunabilir ve kalıcı emme değerinde bile bir miktar su içerebilir. Yüksek silt içerikli N1-1 ve N1-2 numunelerinde sırasıyla 110 ve 90 kPa hava giriş değerleri elde edilmiştir.

Chen ve Hai (2012), killi zeminler üzerinde yapılan üç eksenli deney sonuçlarına dayanarak kırılma zarfının doğrusal (linear) olması gerektiğini söylemişlerdir. Ancak bu doğrusallık, sadece yüksek hava giriş değerlerine sahip killi zeminler için geçerlidir. İri daneli zeminlerin kırılma zarflarının ise rezidüel su içeriğindeki düşük emme değerleri nedeniyle doğrusal olmayabileceğini bildirmişlerdir. Araştırmacıların bu bulguları tez kapsamındaki deney sonuçları örtüşmektedir.

Şekil 4.31.'de 1. seriye ait doymun olmayan numunelerin kayma yüzeyleri 3 boyutlu yüzey olarak gösterilmektedir. Bu grafiklerde, kılcal gerilmeye bağlı kayma direnci artışları tüm boyutlarıyla görülmektedir. N1-1, N1-2 ve N1-3 için çizilen kayma yüzeyleri oldukça düzlemseldir, en yüksek kum içeriğine sahip N1-4'ün ise kayma yüzeyi düzlemsel değildir. N1-4 için rezidüel su içeriği diğer numunelere göre nispeten düşüktür. Şekil 4.31.'de ayrıca incelenen dört numune için çizilen kayma yüzeyleri ve elde edilen  $\phi^b$  açısı değerleri gösterilmektedir. Numunelerdeki kum miktarı arttıkça  $\phi^b$  değerleri de artmıştır.



Şekil 4.31. 1. seri kayma yüzeyi çizimlerinin 3 boyutta gösterimi.

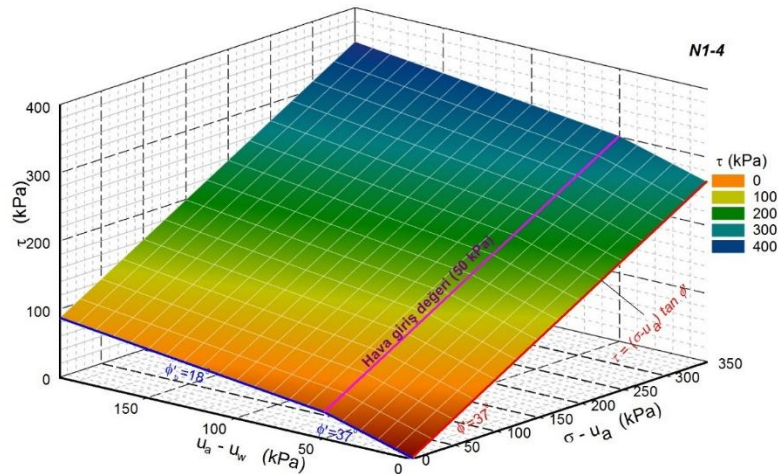
Doğrusal olmayan bir kırılma zarfına sahip numunenin kayma direnci değeri, basit bir çift doğrusal model ile temsil edilmiştir. Bu durumda, aşağıda numune yüzeyine ait genel eşitlik (Denklem 4.1) ile verilmiştir.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + a(u_a - u_w) - b(u_a - u_w)^2 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1.'deki a ve b katsayıları,  $\tau-(u_a-u_w)$  eksenindeki ikinci dereceden denklemin katsayılarıdır. Bu çalışmada kullanılan N1-4 numaralı numunenin doymun durumdaki kohezyon değeri 0 olarak bulunmuştur. Doğrusal olmayan davranış sergileyen bu örneğin matematiksel modeli aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.2) ile sunulmuştur.

$$\tau_{ff} = (\sigma_f - u_a)_f \tan 37 + 0.6484(u_a - u_w) - 0.0012(u_a - u_w)^2 \quad (4.2)$$

Şekil 4.32.'de ise doğrusal olmayan davranış gösteren söz konusu doymun olmayan zeminlerin kayma yüzeyi, iki farklı açığa sahip çift düzlem ile gösterilmiştir. Buna göre hava giriş değerine kadar olan emme değerlerinde doymun zemin davranışı sergilenmektedir. Diğer bir ifadeyle; zeminin kılcal gerilme nedeniyle kazandığı kayma direncindeki artış ( $\phi'$ ) açısı ile temsil edilmektedir. Bu açı da zeminin hava giriş değerine kadar olan kayma direnci açısına ( $\phi'$ ) eşittir (N4 numunesi için bu değer,  $\phi'$ : 37°).



Şekil 4.32. N1-4 numaralı numuneye ait çift düzlem ile kayma yüzeyi çizimi.

Hava giriş değerinden sonra beliren ikinci düzlemde, kayma yüzeyi daha düşük sabit bir  $\phi^b$  açısı (bu örnekte  $18^\circ$ ) ile devam etmektedir. İkinci düzleme çizilen  $\phi^b$  açısı ise Şekil 4.32.'de görüldüğü üzere  $\phi'$  açısından daha düşüktür.

Burada olduğu gibi doğrusal olmayan yüzeyi iki düzlemli (çift düzlemsel yüzey) temsil etmenin bir avantajı vardır. Bu değerlendirme aynı zamanda literatürdeki çalışma sonuçlarıyla da güçlü bir uyum göstermektedir (Fredlund ve ark., 1978; Gan ve ark., 1988; Oloo ve ark., 1997). Sıfır net normal gerilmedeki doymun olmayan bir zeminin kayma direnci denklemi, çift doğrusal bir kırılma zarfıyla aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.3) ile verilmektedir.

$$\tau_{ff} = c' + (u_a - u_w)\tan\phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b]\tan\phi^b \quad (4.3)$$

Bu denkleme göre;

Eğer  $(u_a - u_w) \leq (u_a - u_w)_b$  ise  $\phi^b = \phi'$  olmaktadır (Gan ve ark., 1988).

Yukarıda (Denklem 4.3) verilen sıfır net normal gerilmedeki tüm numunelere ait kayma direnci ( $\tau$ ), doymun olmayan zeminin toplam kohezyonu olarak kabul edilir. Net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ), sıfırdan büyükse, çift doğrusal bir zarfa dayalı doymun olmayan bir zeminin kayma direnci için genel formülü (Denklem 4.4) aşağıdaki gibidir.

$$\tau_{ff} = [c' + (u_a - u_w)\tan\phi' + [(u_a - u_w) - (u_a - u_w)_b]\tan\phi^b] + (\sigma - u_a)\tan\phi' \quad (4.4)$$

Gan ve ark. (1988) ve Oloo ve ark. (1997)' na göre kum ve kilin görünür kohezyonu tek modlu bir dağılım gösterir. Görünür kohezyon, hava giriş değerine kadar doğrusal olarak artar. Ayrıca Zhao ve ark. (2013) geçiş bölgesinde su zeminden drene oldukça görünür kohezyonun doğrusal olmayan bir şekilde arttığını ifade etmişlerdir.

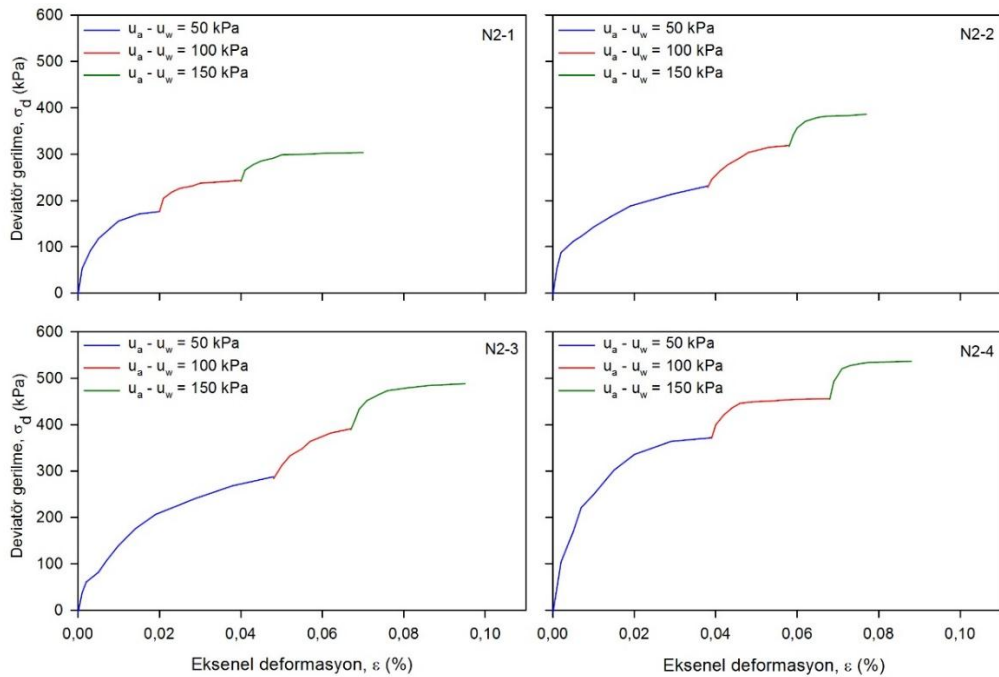
#### 4.7.2.2. 2. seri emme kontrollü üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

2. seri deneylerde 1. seri deneylerden farklı olarak net normal gerilme değeri ( $\sigma_3 - u_a$ ) 80 kPa değerine yükseltilmiştir. Boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) 50 kPa değerinde sabit tutulmuş ve boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) her aşamada kademeli olarak artırılmıştır. 2. seriye ait konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme deneylerde uygulanan gerilme değişkenleri Tablo 4.10.'da gösterilmiştir.

Tablo 4.10. 2. seri gerilme durum değişkenleri

	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)
1. aşama	180	50	100	80	50
2. aşama	230	50	150	80	100
3. aşama	280	50	200	80	150

2. seri emme kontrollü deney numunelerine uygulanan üç eksenli hücre kesme deneylerin sonuçlarına ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.33.'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; numunelere uygulanan net normal gerilme ve kılcal gerilme değerleri katkısıyla numunelerin sergilemiş oldukları rijitliğin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu artış, danelerin emme etkisinde birbirine daha kuvvetli tutunmaları sayesinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.33. 2. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

2. seri zemin numunelerine ait Şekil 4.33.'te verilen gerilme-şekil değiştirme sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, numunelerde aşırı deformasyonlar meydana gelmeden kesme aşamaları sonlandırılmış ve diğer deney aşamasına geçilmiştir. Böylelikle sonraki aşamalarda numune doğal direncini korumaktadır.

Bu seride bir önceki seriye benzer bulgular elde edilmiştir. Dört numune için çizilen gerilme-şekil değiştirme grafik sonuçlarına göre kil miktarı en fazla olan N1-1 numunesinde kayma direnci değeri en düşüktür. Numuneler içerisindeki kum miktarı en fazla olan N1-4 numunesinde ise en yüksektir.

2. seriye ait üç eksenli hücre kesme deney sonuçlarına göre içerisinde kil oranı en fazla olan N1-1 numunesi 3. aşama sonunda aldığı maksimum eksenel yüke, yaklaşık %7 birim deformasyon değerinde ulaşırken, kum içeriği en fazla olan N1-4 numunesi yaklaşık olarak %10 birim deformasyon değerinde ulaşmıştır.

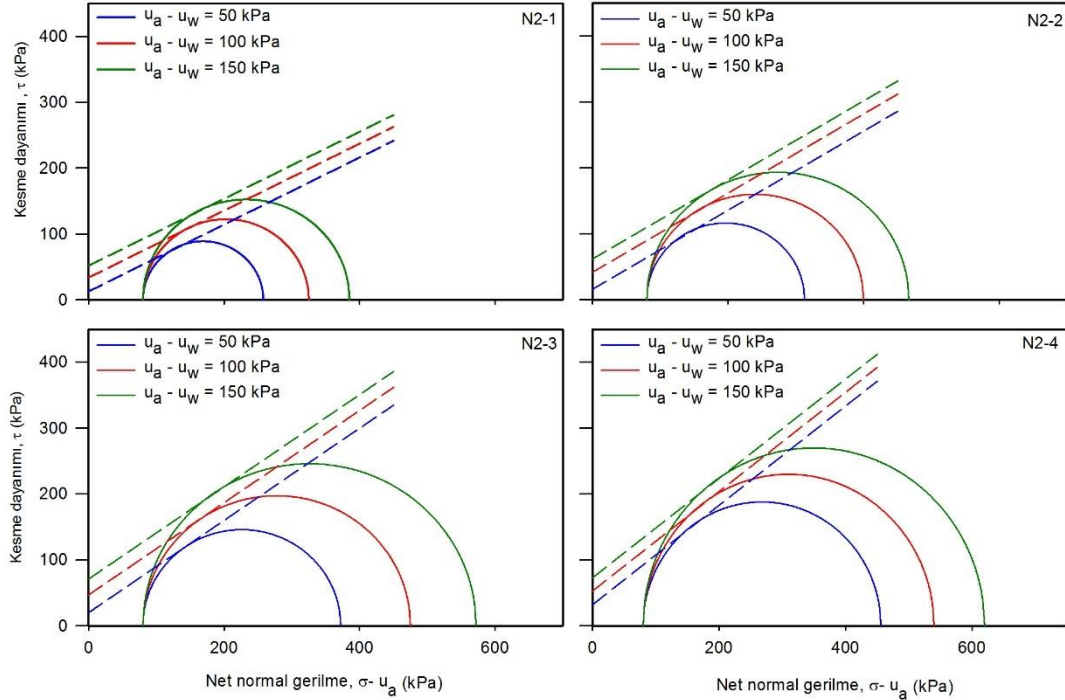
Bu seride net normal gerilme değeri (80 kPa) sabit tutulmuş, kılcal gerilme değeri ise sırası ile kılcal gerilme aşamalarında (50 kPa, 100 kPa ve 150 kPa) olacak şekilde uygulanmıştır. N2-1 numunesinde uygulanan bu gerilme değişkenlerinin etkisiyle deviatör gerilme değerlerinde sırası ile bir önceki aşamaya göre %37,64 ve %24,49 oranlarında artışlar elde edilmiştir. N2-2'de elde edilen deviatör gerilme artış oranları ise bir önceki aşamaya göre %37,34 ve %20,94 olarak bulunmuştur. N2-3 ve N2-4 numunelerinde kesme deney sonuçlarına göre elde edilen deviatör gerilme artış oranları da Tablo 4.11.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11. 2. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviatör gerilme artış oranları

	1. aşama		2. aşama		3. aşama		
	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (1. aşamaya göre)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)
2. Seri	N2-1	178	245	37,64	305	24,49	
	N2-2	233	320	37,34	387	20,94	
	N2-3	292	395	35,27	492	24,56	
	N2-4	376	460	22,34	540	17,39	

2. seriye ait numunelerin konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli hücre kesme deney sonuçları Şekil 4.34.'te gösterilmiştir. Grafiklerdeki her bir Mohr dairesi için bir

kırılma zarfı çizilmiştir. Bu kırılma zarfları çizilirken kullanılan kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) doygun zemin numunelerindeki deneylerden elde edilmiştir.



Şekil 4.34. 2. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki.

2. seri deneylerde kılcal gerilmenin kayma direncine olan etkisi araştırılmıştır. Bu seride net normal gerilme değeri (80 kPa) sabit tutulmuş, kılcal gerilme değeri 3 aşamada sırası ile (50, 100 ve 150 kPa) olarak uygulanmıştır. Şekil 4.34.'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde kılcal gerilmenin artışının kayma direncini artırdığı görülmüştür. Artan kılcal gerilmeye paralel olarak çapı her aşamada büyüyen Mohr daireleri çizilmiştir. Aşamalarda artırılan kılcal gerilme değerleri için görünür kohezyon değerlerinde de artışlar elde edilmiştir.

Şekil 4.34.'teki Mohr dairesi grafikleri incelendiğinde üç aşama içinde en düşük görünür kohezyon değerleri N2-1'de elde edilmiştir. Dört numune içerisinde en yüksek görünür kohezyon değeri ise N2-4'te elde edilmiştir. N2-4'te kum miktarının fazla olması hem görünür kohezyon değerini artırmış hem de numuneden elde edilen kayma direnci değerini yükseltmiştir. Sonuçlar Tablo 4.12.'de özetlenmiştir.

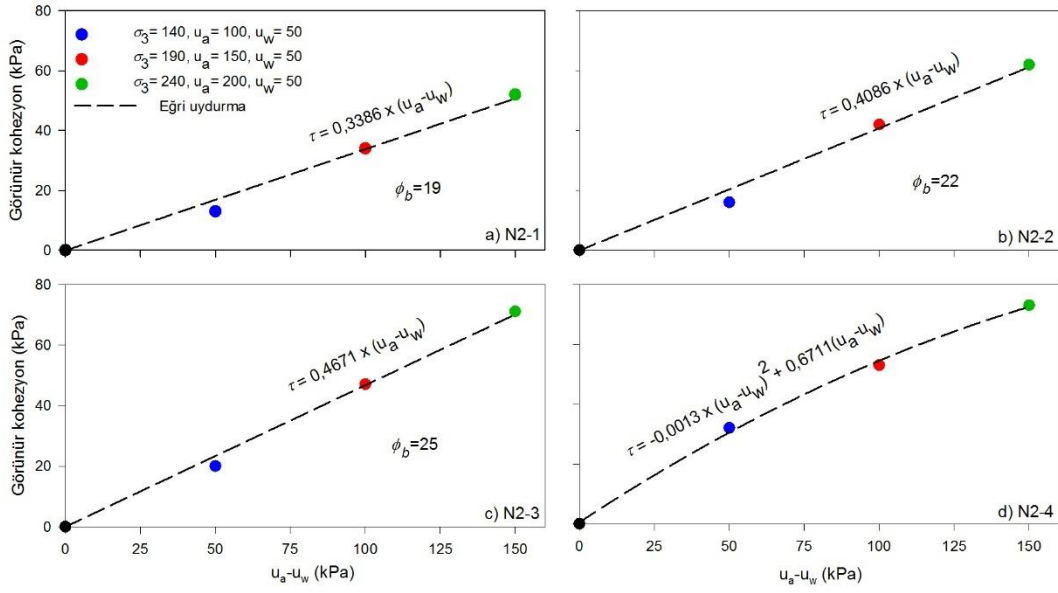
Tablo 4.12. 2. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

2.SERİ-DOZ								
N-1 (En Üst)								
	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3-u_a$ (kPa)	$u_a-u_w$ (kPa)	$c$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\Phi^b$ (Derece)
1.aşama	180	50	100	80	50	13	178	
2.aşama	230	50	150	80	100	34	245	19
3.aşama	280	50	200	80	150	52	305	
N-2 (Doğal numune)								
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$			
1.aşama	180	50	100	80	50	16	233	
2.aşama	230	50	150	80	100	42	320	22
3.aşama	280	50	200	80	150	62	387	
N-3 (Ak_Özgün)								
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$			
1.aşama	180	50	100	80	50	20	292	
2.aşama	230	50	150	80	100	47	395	25
3.aşama	280	50	200	80	150	71	492	
N-4 (Yenikent)								
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$			
1.aşama	180	50	100	80	50	32	376	
2.aşama	230	50	150	80	100	53	460	37/19(Çift doğrusal)
3.aşama	280	50	200	80	150	73	540	

Şekil 4.35.'teki kılcal gerilme-görünür kohezyon ilişkisini gösteren kırılma zarfları incelendiğinde N2-1, N2-2 ve N2-3 numaralı numunelerin grafiklerinin doğrusal olduğu sonucuna ulaşılmıştır. N2-4 numaralı numunenin kırılma zarfının ise doğrusal olmadığı görülmektedir.

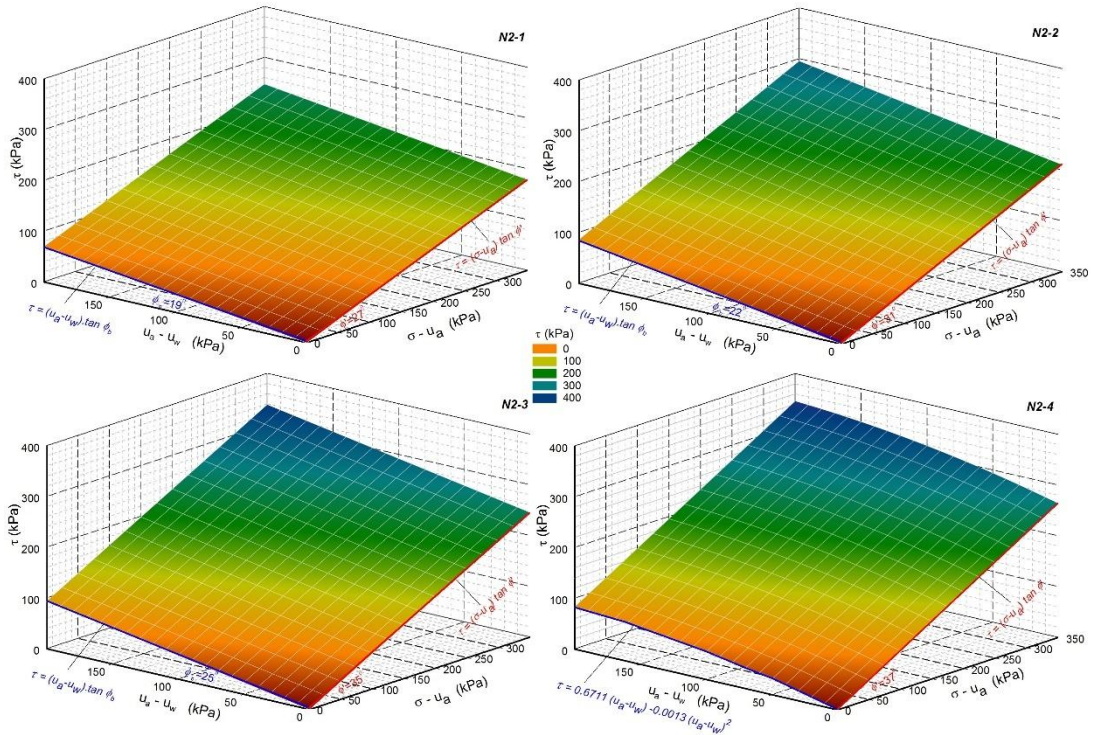
N2-1, N2-2 ve N2-3 numaralı numunelerde kılcal gerilme değeri artışına bağlı olarak görünür kohezyon değeri de doğrusal bir şekilde artmaktadır. Fakat N2-4 numaralı numuneye ait kırılma zarfı grafiği incelendiğinde 50 kPa kılcal gerilme değerine kadar doğrusal bir eğilim sergilerken, 50 kPa değerini aştığı andan itibaren ise doğrusal olmayan davranış görülmüştür. 50 kPa kılcal gerilme değeri N2-4 numaralı numunenin hava giriş değeridir. Bu değer, numune için elde edilen SWC eğrisinden elde edilmiştir (Şekil 4.15. ; Tablo 4.2.).





Şekil 4.35. 2. seri kılcal gerilmeye karşılık görünür kohezyon değerleri (Doygun durumda kohezyon değerleri 0'dır).

Şekil 4.36.'da 2. seriye ait doygun olmayan numunelerin kayma yüzeyleri 3 boyutlu olarak gösterilmektedir.



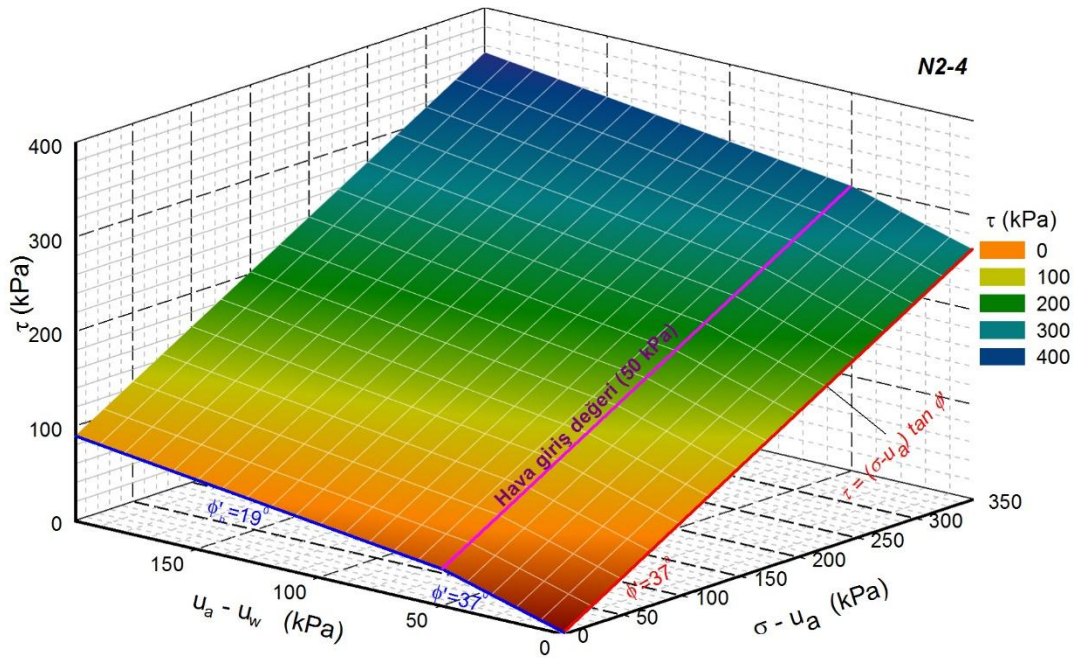
Şekil 4.36. 2. seri kayma yüzeyi çizimlerinin 3 boyutta gösterimi.

Şekil 4.36.'da tez çalışmasında kullanılan dört numuneye ait 2. seri emme kontrollü üç eksenli hücre kesme deney sonuçları verilmiştir. Bu grafiklerde numunelere uygulanan gerilme değişkenleri neticesinde elde edilen kayma direnci yüzeyleri detayları ile gösterilmiştir. Grafikler incelendiği zaman uygulanan gerilme durum değişkenleri sonucunda elde edilen kayma direnci değerinin artmasına bağlı olarak grafikler renklendirilerek sonuçlar daha rahat izlenebilecek şekilde ortaya konulmuştur. N2-1, N2-2 ve N2-3 numaralı numunelerin kayma yüzeylerine bakıldığında kılcal gerilme ekseninin doğrusal devam ederek oluşturduğu 3 boyutlu kayma direnci yüzeylerinin tam düzlemsel olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İçerinde kum miktarı en fazla olan N2-4 numaralı numunenin ise kılcal gerilme ekseninin doğrusal çizilemediği görülmektedir. Kılcal gerilme ekseninde çizilen kırılma zarfı eğrisinin N2-4 numaralı numuneye ait 3 boyutlu kayma yüzeyinin de düzlemsel çizilemediği görülmektedir. SWC eğrileri incelendiğinde en yüksek kalıcı su içeriği değerine N2-1'de ulaşılrken, en düşük kalıcı su içeriği değerine N2-4'te ulaşılmıştır. Bu sonuç, iri daneli numunelerin daneleri arasındaki boşlukların daha büyük olması sebebi ile numunede meydana gelen su kayıplarının daha hızlı gerçekleşmesi anlamına gelmektedir. Aynı zamanda Şekil 4.36.'da kılcal gerilme etkisindeki numunelere ait kayma direnci açıları ( $\phi^b$ ) gösterilmiştir. Kılcal gerilme ekseninde gösterilen  $\phi^b$  açıları incelendiği zaman en büyük değer kırılma zarfı lineer olanlar içinde N2-3 numunesine ait olduğu görülmektedir. Böylelikle numune içerisinde bulunan kum miktarının artması numunelerden elde edilen  $\phi^b$  açısını artırmaktadır.

N2-4 numaralı numuneye ait doğrusal olmayan kırılma zarfı için kayma direnci değerinin basit bir çift doğrusal model ile gösterilebileceği tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan doygun durumdaki N2-4 numaralı zeminin görünür kohezyonu 0 bulunmuştur. Bu durumda doğrusal olmayan davranış sergileyen N2-4 numaralı numunenin kayma direnci yüzeyinin genel formülü aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.5) ile verilmiştir.

$$\tau_{ff} = (\sigma_f - u_a)_f \tan 37 + 0,6711(u_a - u_w) - 0.0013(u_a - u_w)^2 \quad (4.5)$$

Şekil 4.37.'de ise doğrusal olmayan davranış gösteren N2-4 numaralı numuneye ait kayma yüzeyi, iki farklı düzlem ile gösterilmiştir. Bu düzlemler iki farklı açı ile temsil edilmektedir. İki farklı açı ile çizilen bu 2 düzlemlili kayma yüzeyi, hava giriş değerine kadar doygun zemin davranışını sergilemektedir. Yani çizilen birinci düzleme ait eğim açısı  $\phi'$  (doygun zemin kayma direnci açısı) açısına eşittir (N-4 numunesi için bu örnekte  $37^\circ$ ).



Şekil 4.37. N2-4 numaralı numuneye ait çift düzlem ile kayma yüzeyi çizimi.

İkinci düzleme ait olan açı ise deneyler sonucunda elde edilen parametrelere bağlı olarak ve birinci düzlem ile birleştirilerek elde edilmiştir. İkinci düzleme çizilen  $\phi^b$  açısı ise Şekil 4.37.'de görüldüğü üzere  $\phi'$  açısından daha düşük bir değere sahiptir.

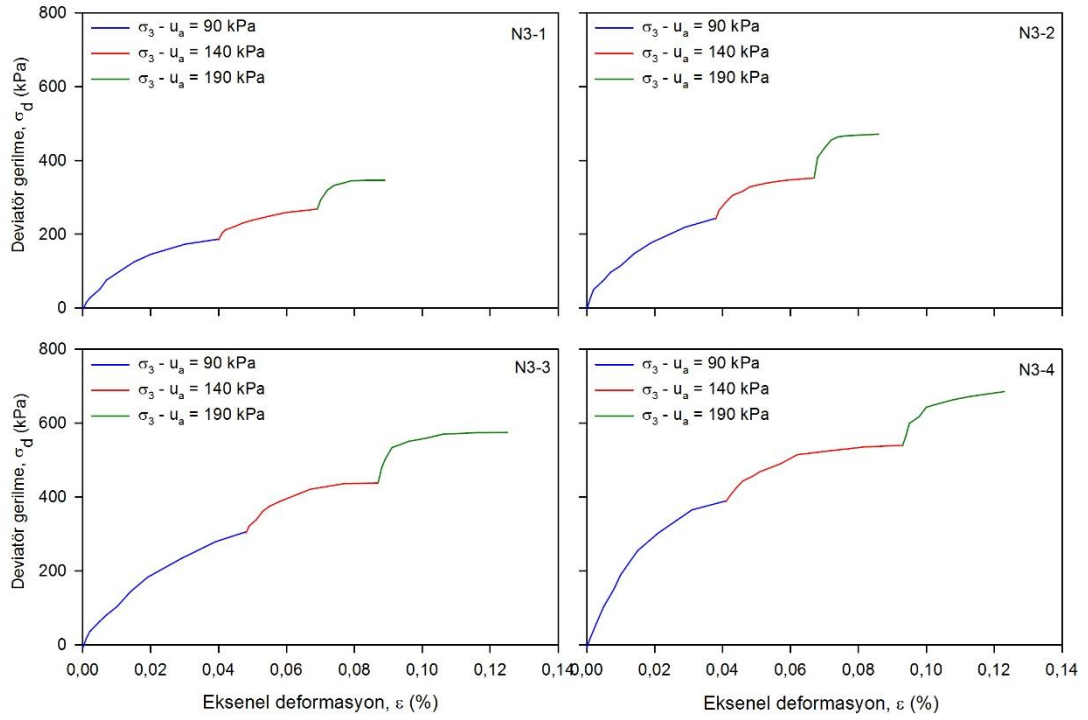
#### 4.7.2.3. 3. seri emme kontrolü üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

Bu serinin 1. ve 2. seri deneylerden farkı, kılcal gerilmenin sabit tutularak net normal gerilmenin değişken olarak kullanılmasıdır. Bu gerilme değişkenlerinin uygulanması için boşluk suyu basıncı ve boşluk hava basıncı sabit tutulmuş, çevre basıncı her aşamada kademeli olarak arttırılmıştır. Bu seriye ait üç eksenli hücre kesme deneylerinde uygulanan gerilme değişkenleri Tablo 4.13.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.13. 3. seri gerilme durum değişkenleri

	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)
1. aşama	190	50	100	90	50
2. aşama	240	50	100	140	50
3. aşama	290	50	100	190	50

Şekil 4.38.'de bu seriye ait gerilme-şekil değiştirme sonuçları verilmiştir. N3-1, N3-2, N3-3 ve N3-4 numunelerine ait gerilme-şekil değiştirme sonuçları incelendiğinde, numunelerde bulunan kum miktarının artması ile numunelerdeki rijitliğin arttığı görülmektedir. Ayrıca kılcal gerilme artışıyla da numunelerin sergilemiş olduğu rijitlik davranışı artmaktadır.



Şekil 4.38. 3. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Çok aşamalı olarak yapılan deneysel çalışmaların Şekil 4.38.'de verilen sonuçlarından anlaşılacağı üzere, kesme deneylerinde numunelerin aldığı yük kapasitelerini gösteren grafiklerde eğim azalmaya başladığı anda deneyler sonlandırılmıştır. Böylelikle numunelerde yenilme meydana gelmeden diğer aşamalara geçilmiş ve deneye kaldığı yerden devam edilmiştir.

2. ve 3. kesme aşamalarındaki kayma direnci artış oranlarına bakıldığında, 1. aşamaya oranla daha az artış ortaya çıkmıştır. Her aşamada numune belirli bir miktarda deformasyona uğradığı için bir sonraki aşamada daha düşük kayma direnci artışı olmuştur. N3-1 numunesinin kil oranının fazla olması sebebi ile en düşük kayma direnci bu numunede elde edilmiştir. Kil oranı fazla olan numuneler, kil oranı az olan numunelere oranla daha plastik davranış sergilemektedir. Aynı zamanda kil oranının fazla olması gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde çizilen eğrilerin eğimlerinin az olması sonucunu ortaya koymaktadır. Grafiklerde çizilen eğrilerin eğimlerine bakılarak numunelerin dane dağılım içeriği hakkında da tahminler yapılabilmektedir.

Bu seriye ait yapılan deneylerde N3-1 numunesi 3. aşama sonunda aldığı maksimum eksenel yüke yaklaşık %9'luk birim deformasyon değerinde ulaşırken, N3-4 numunesi son aşamada maksimum yüke yaklaşık %13 birim deformasyonda ulaşmıştır. N3-4 numunesi içerisinde bulunan kum miktarı N3-1 numunesine oranla daha fazladır.

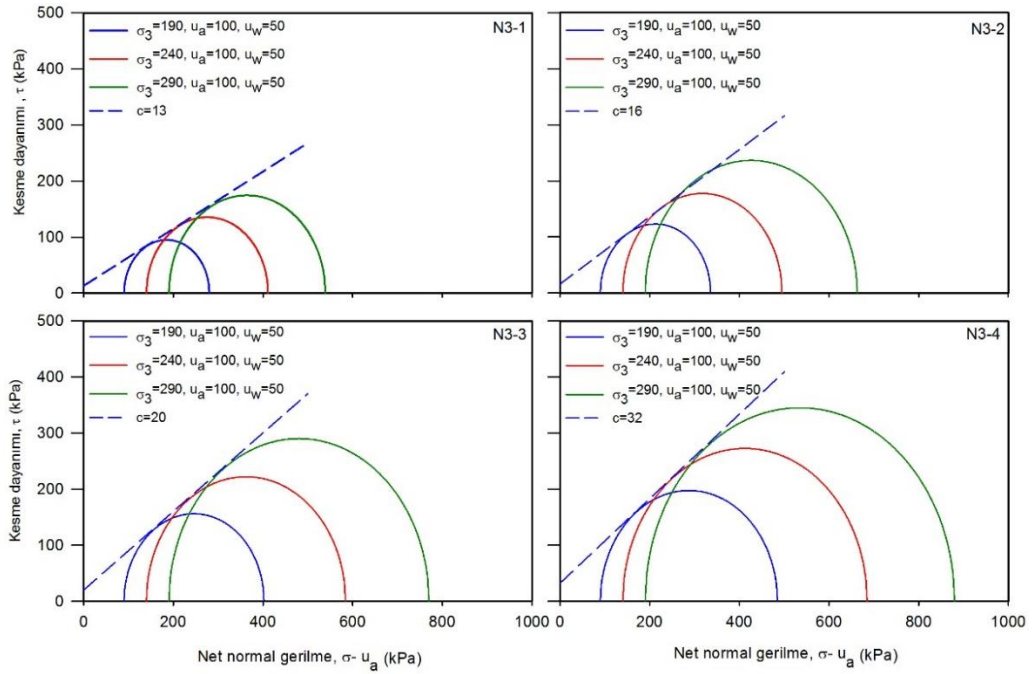
Bu seri deneylerde kılcal gerilme 50 kPa değerinde sabit tutularak net normal gerilme değerleri kılcal gerilme aşamalarında sırası ile 90, 140 ve 190 kPa değerlerinde kademeli olarak arttırılmıştır. Üç eksenli hücre kesme deney sonuçlarına göre N3-1 numunesinin 2. kesme aşamasında maksimum deviatör gerilme değeri 1. kesme aşamasına göre %42,63 oranında artış göstermiştir. Aynı deneyde 3. kesme aşamasında ise 2. kesme aşamasına göre %28,78 oranında bir artış elde edilmiştir. N3-2 numunesinde ise bu artışlar sırası ile %44,31 ve %33,24 olarak elde edilmiştir. Seriyeye ait diğer N3-3 ve N3-4 numaralı numunelerin deviatör gerilme değerlerinde elde edilen artış oranları Tablo 4.14.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.14. 3. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviatör gerilme artış oranları

	1. aşama		2. aşama		3. aşama	
	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (1. aşamaya göre)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)	
3. Seri	N3-1	190	271	42,63	349	28,78
	N3-2	246	355	44,31	473	33,24
	N3-3	312	444	42,31	580	30,63
	N3-4	395	545	37,97	690	26,61

Gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinden elde edilen deviatör gerilme değerlerine göre çizilen Mohr daireleri Şekil 4.39.'da gösterilmiştir. Üç aşamada kesilen numuneler için üç ayrı Mohr dairesi çizilmiştir. Her bir Mohr dairesi, bir kesme aşamasından elde edilen deviatör gerilmeye karşılık gelmektedir.

Mohr dairelerine teğet olarak çizilen kırılma zarflarının çiziminde numunelerin doğgun durumdaki kayma direnci açısından ( $\phi'$ ) yararlanılmıştır. Dört numune için yapılan ve Şekil 4.39.'da gösterilen konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli hücre kesme deney sonuçlarına göre elde edilen görünür kohezyon değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.39. 3. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki.

Deneylerden elde edilen deviatör gerilme ve görünür kohezyon değerleri Tablo 4.15.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.15. 3. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

3.SERİ-DOZ							
N-1 (En Üst)							
	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3-u_a$ (kPa)	$u_a-u_w$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	c (kPa)
1.aşama	190	50	100	90	50	190	
2.aşama	240	50	100	140	50	271	13
3.aşama	290	50	100	190	50	349	
N-2 (Doğal numune)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$		
1.aşama	190	50	100	90	50	246	
2.aşama	240	50	100	140	50	355	16
3.aşama	290	50	100	190	50	473	
N-3 (Ak_Özgün)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$		
1.aşama	190	50	100	90	50	312	
2.aşama	240	50	100	140	50	444	20
X"3.aşama	290	50	100	190	50	580	
N-4 (Yenikent)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$		
1.aşama	190	50	100	90	50	395	
2.aşama	240	50	100	140	50	545	32
3.aşama	290	50	100	190	50	690	

Tablo 4.15.'te verilen deney sonuçları incelendiğinde, N3-1 numunesinde en düşük görünür kohezyon değeri ve aşamalarda en düşük deviatör gerilme değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Numunenin kum oranının artması ile görünür kohezyon değeri ve deviatör gerilme değeri artmaktadır (N3-4).

#### 4.7.2.4. 4. seri emme kontrollü üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

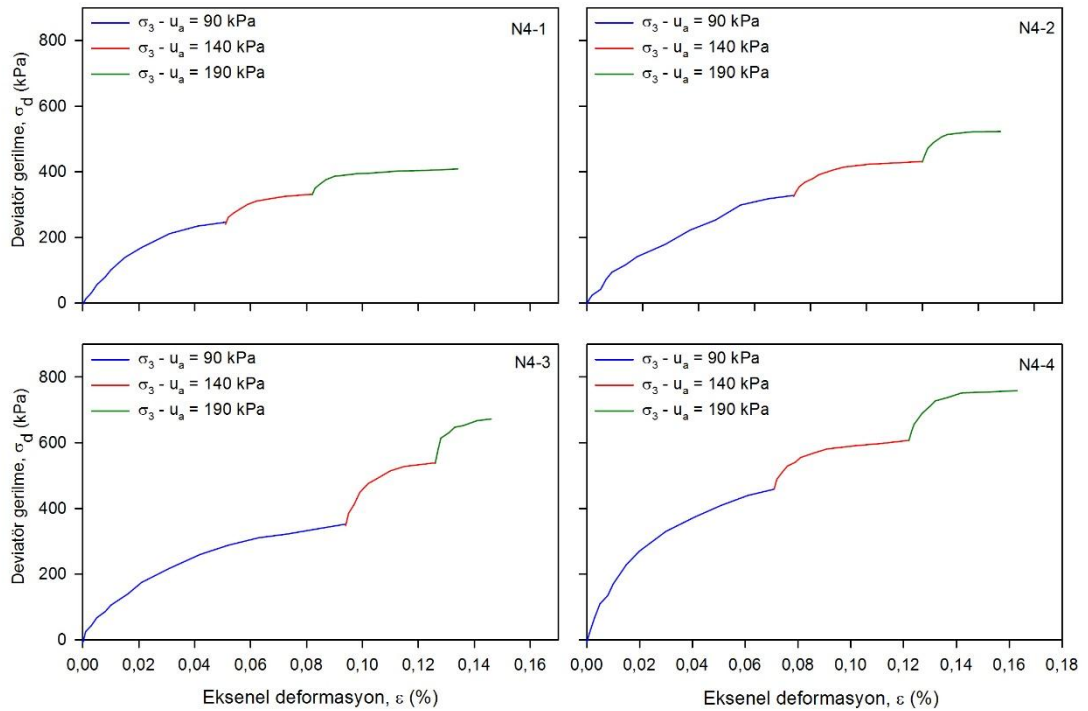
Tez çalışmasındaki 4. seri deneylerde kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) 100 kPa değerinde sabit tutulmuş ve net normal gerilme ( $\sigma - u_a$ ) üç aşamada sırası ile 90, 140 ve 190 kPa olarak uygulanmıştır. Kılcal gerilme ve kesme aşamalarında boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) ve boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) sabit tutulmuş, çevre basıncı ( $\sigma_3$ ) ise söz konusu aşamalarda sırası ile 340, 390 ve 440 kPa olarak kademeli şekilde arttırılmıştır.

4. deney serisinde doygun olmayan zemin numuneleri için uygulanan gerilme değişkenleri Tablo 4.16.'da gösterilmiştir.

Tablo 4.16. 4. seri gerilme durum değişkenleri

	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)
1.aşama	240	50	150	90	100
2.aşama	290	50	150	140	100
3.aşama	340	50	150	190	100

Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. Söz konusu grafiklerde her aşamada numunenin göstermiş olduğu direnç farklı renklerle çizilmiştir. Çizilen grafiklerin ordinatı numunenin eksenel yüklemeye karşı göstermiş olduğu direnci yani deviatör gerilmeyi vermektedir. Her numune için üç aşamadan oluşan toplamda on iki deviatör gerilme değeri içerisinde N4-1 numunesi en düşük değeri vermiştir. İçerisinde bulunan kil miktarının fazla olması numunenin almış olduğu eksenel yük taşıma kapasitesini olumsuz etkilemektedir. N4-4 numunesi ise en düşük kil içeriğine ve en yüksek kum içeriğe sahip numune olduğu için eksenel yüklere karşı en dirençli numunedir.



Şekil 4.40. 4. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Numunelerin eksenel yük kapasitesinde azalma meydana geldiği sırada kesme aşamasının sonlandırıldığı gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden görülmektedir. Daha sonra diğer aşamaya geçilmiştir. Tamamlanan aşama eğer 3. aşama ise deney



sonlandırılarak numune deney hücresinden çıkarılmıştır. Söz konusu numunenin almış olduğu aksenal yük oranında azalma olduğu noktada deney sonlandırılmaz ise numunede yenilme veya büyük çapta deformasyonlar meydana gelebilir.

Şekil 4.40.'ta verilen aksenal deformasyon-gerilme şekil değiştirme sonuçlarına göre 2. ve 3. aşamalarda ortaya çıkan deviatör gerilme değeri artışlarının, 1. aşamalarda elde edilen deviatör gerilme artışları gibi yüksek olmadıkları sonucuna ulaşılmıştır.

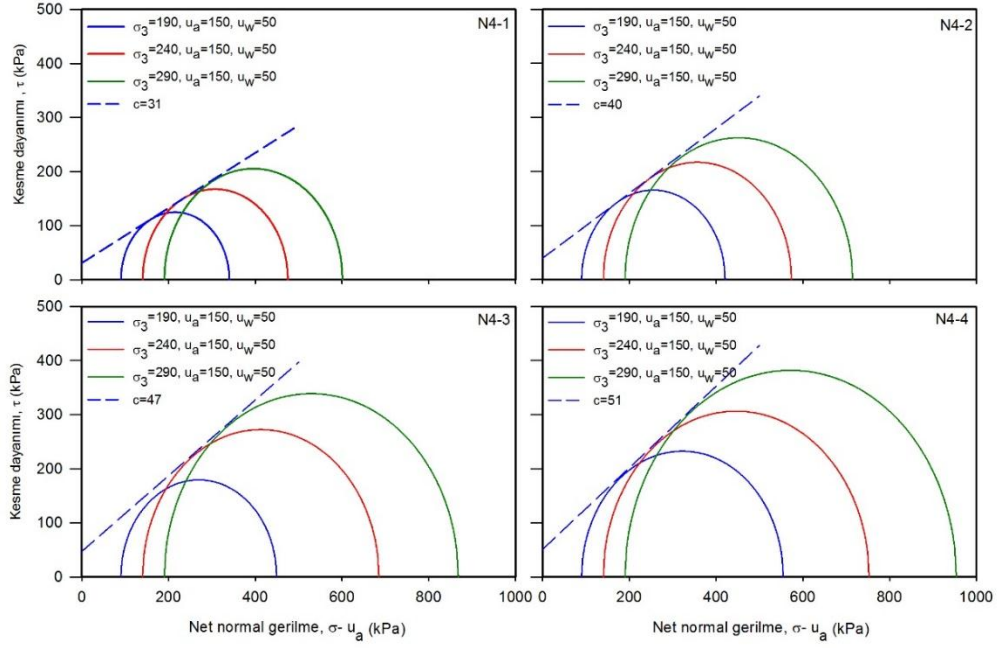
4. seri için yapılan üç eksenli hücre kesme deneylerindeki gerilme-şekil değiştirme sonuçlarına göre N4-1 numunesi 3. aşama sonunda aldığı maksimum aksenal yüke yaklaşık %13'lük birim deformasyon değerinde ulaşırken, N4-4 numunesi son aşamada maksimum yüke yaklaşık %17 birim deformasyona ulaşmıştır.

Yapılan çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyleri sonucunda, N4-1'e ait deviatör gerilme değerinde 2. ve 3. aşamalarda bir önceki aşamaya göre %34,00 ve %22,69 oranında bir artış elde edilmiştir. N4-2'deki deviatör gerilme değerlerinde ise sırası ile bir önceki aşamaya göre %31,12 ve %20,97 oranlarında artış elde edilmiştir. N4-3 ve N4-4 için elde edilen deviatör gerilme artış oranları Tablo 4.17.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.17. 4. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviatör gerilme artış oranları

		1. aşama		2. aşama		3. aşama	
		$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (1. aşamaya göre)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)	
4. Seri	N4-1	250	335	34,00	411	22,69	
	N4-2	331	434	31,12	525	20,97	
	N4-3	359	545	51,81	678	24,40	
	N4-4	465	613	31,83	764	24,63	

4. seriye ait drenajlı kesme deney sonuçları Şekil 4.41.'de gösterilmiştir. Doymun zemin numunesi için yapılan çok aşamalı üç eksenli deney sonucunda elde edilen kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) ile bu serideki her bir kılcal gerilmedeki Mohr dairelerine teğet bir kırılma zarfı çizilmiştir. 4. seri deneylerde kılcal gerilme değeri sabit tutularak net normal gerilmenin kayma direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm numuneler üç aşamalı olarak kesilmiş ve her aşamada artan bir net normal gerilme uygulanmıştır.



Şekil 4.41. 4. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki.

N4-1, N4-2, N4-3 ve N4-4 numunelerinden elde edilen görünür kohezyon değerleri Tablo 4.18.'de gösterilmiştir. N4-1, N4-2, N4-3 numunelerinde net normal gerilme arttıkça, görünür kohezyon artmaktadır. Numunelere uygulanan kılcal gerilmenin artması ile deviyör gerilmeler artmakta ve Mohr dairelerinin çapları büyümektedir.

Tablo 4.18. 4. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

4. SERİ-DOZ							
N-1 (En Üst)							
	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	$u_a - u_w$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$c$ (kPa)
1. aşama	240	50	150	90	100	250	
2. aşama	290	50	150	140	100	335	31
3. aşama	340	50	150	190	100	411	
N-2 (Doğal numune)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3 - u_a$	$u_a - u_w$		
1. aşama	240	50	150	90	100	331	
2. aşama	290	50	150	140	100	434	40
3. aşama	340	50	150	190	100	525	
N-3 (Ak_Özgün)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3 - u_a$	$u_a - u_w$		
1. aşama	240	50	150	90	100	359	
2. aşama	290	50	150	140	100	545	47
3. aşama	340	50	150	190	100	678	
N-4 (Yenikent)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3 - u_a$	$u_a - u_w$		
1. aşama	240	50	150	90	100	465	
2. aşama	290	50	150	140	100	613	51
3. aşama	340	50	150	190	100	764	

Şekil 4.41.'deki grafiklere göre en fazla kil içeren N4-1 en düşük görünür kohezyon değerini verirken, en az kil içeren N4-4 en yüksek görünür kohezyona sahiptir. Aynı zamanda N4-4 numunesi en yüksek kum içeriğine sahip olduğu için en yüksek mukavemet de bu numunede elde edilmiştir. Görünür kohezyon, artan net normal gerilme değeri ile artmaktadır. Kum içeriği yüksek olan numunelerdeki görünür kohezyon değerlerinin kayma direncine olan etkisi net normal gerilme arttıkça büyümektedir.

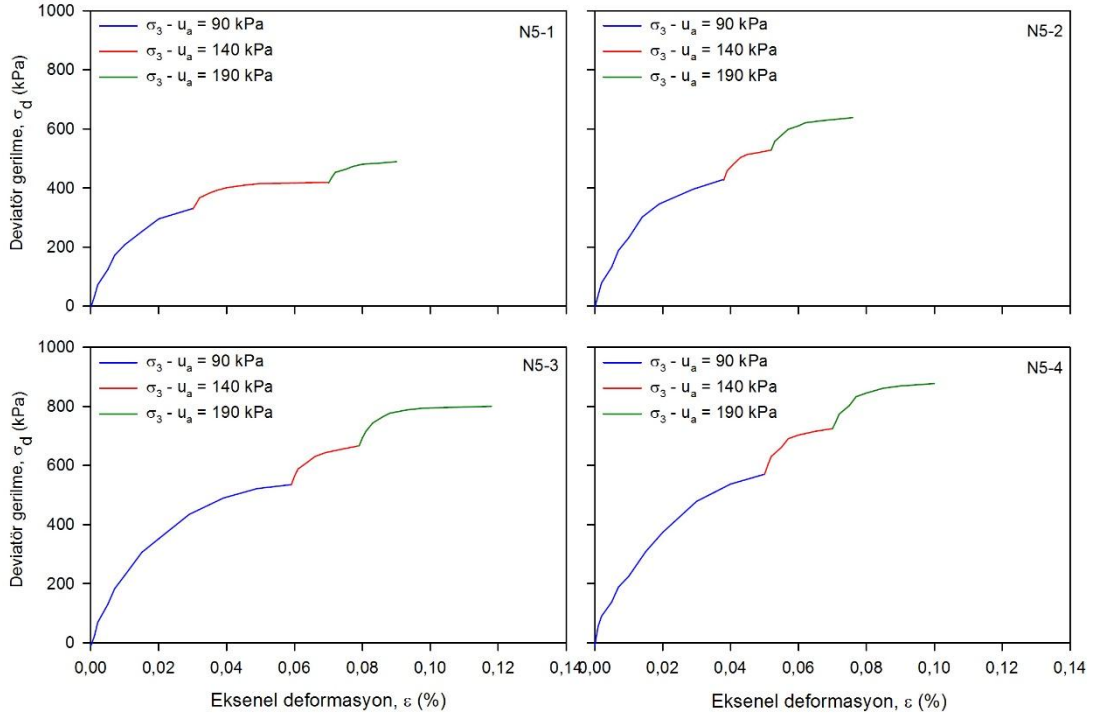
#### 4.7.2.5. 5. seri emme kontrollü üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

5. seri deneylerde numunelerde kılcal gerilme 100 kPa, net normal gerilme ise aşamalarda sırası ile 90, 140 ve 190 kPa olarak uygulanmıştır. Deneylerin kılcal gerilme ve kesme aşamalarında boşluk suyu basıncı ( $u_w$ ) ve boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) sabit tutulmuş, çevre basıncı ( $\sigma_3$ ) ise aşamalarda sırası ile 340, 390 ve 440 kPa olarak kademeli şekilde arttırılmıştır. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) yapılan üç eksenli hücre kesme deneyleri için 5. seriye ait emme kontrollü deneylerde uygulanan gerilme değişkenleri Tablo 4.19.'da gösterilmiştir.

Tablo 4.19. 5. seri gerilme durum değişkenleri

	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3-u_a$ (kPa)	$u_a-u_w$ (kPa)
1.aşama	340	50	250	90	200
2.aşama	390	50	250	140	200
3.aşama	440	50	250	190	200

Şekil 4.42.'de dört numunede çok aşamalı olarak yapılan deneysel çalışmaların gerilme-şekil değiştirme deney sonuçları verilmiştir. Gerilme-şekil değiştirme davranışları incelendiğinde, en hızlı direnç kaybına uğrayan N5-1 olmuştur. N5-4 ise en yüksek mukavemet gösteren numune olmuştur. Her aşamada numunelere uygulanan net normal gerilme değeri numunelerin eksenel yüklere karşı göstermiş oldukları dirençlerde artışa neden olmaktadır. N5-1'in eksenel yüklere karşı diğerlerine oranla daha fazla direnç göstermesi, içerisinde bulunan kum miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.42. 5. seri emme kontrollü gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

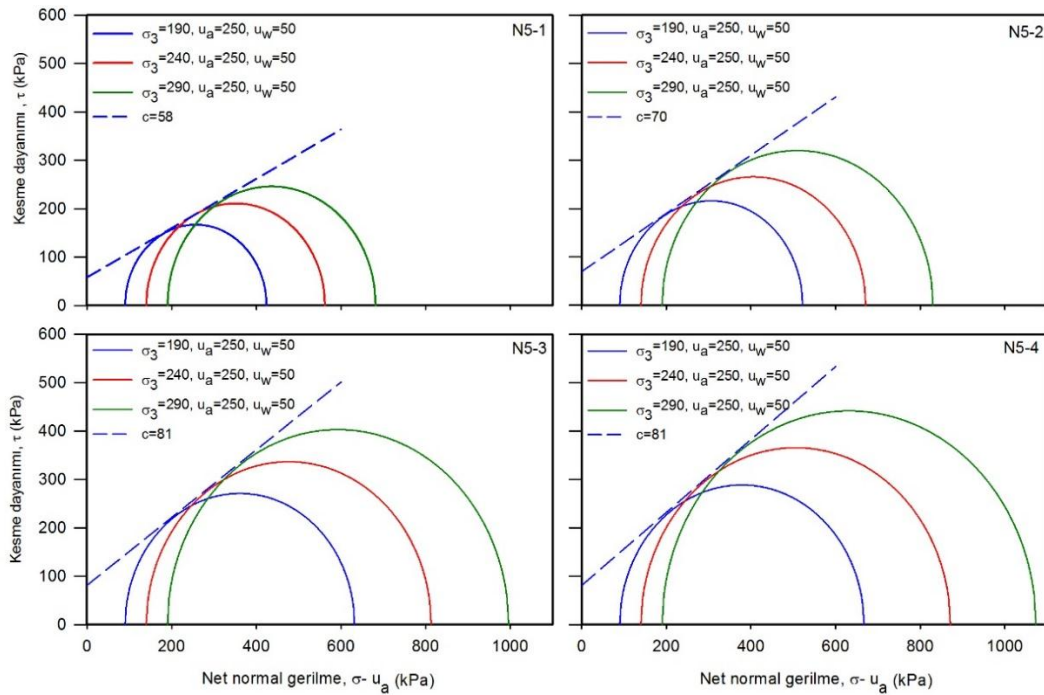
Şekil 4.42.'de verilen gerilme-eksenel deformasyon sonuçlarına göre 2. ve 3. aşamalarda ortaya çıkan deviatör gerilme değeri artışlarının, 1. aşamalarda elde edilen deviatör gerilme artışları gibi yüksek olmadıkları sonucuna ulaşılmıştır. 5. seriden elde edilen gerilme-şekil değiştirme sonuçlarına göre N5-1 numunesi 3. aşama sonunda aldığı maksimum aksenal yüke yaklaşık %9'luk birim deformasyon değerinde ulaşılırken, N5-4 numunesi son aşamada maksimum yüke yaklaşık %11 birim deformasyonda ulaşmıştır.

5. seri için yapılan hücre kesme deneyleri sonunda çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden tüm aşamalarda numunelere ait deviatör gerilme değerleri elde edilmiştir. N5-1 numunesinin deviatör gerilme değerinde bir önceki aşamaya göre %26,35 ve %16,59 oranında bir artış elde edilmiştir. N5-2 numunesine ait yapılan çok aşamalı hücre kesme deneyin sonucunda elde edilen deviatör gerilme değerlerinde ise sırası ile bir önceki aşamaya göre %22,92 ve %20,53 oranlarında deviatör gerilme değeri artışı elde edilmiştir. N5-3 ve N5-4 numaralı numuneler içinde aynı şekilde yürütülen çok aşamalı deney sonuçlarına göre kesme aşamasından elde edilen deviatör gerilme artış oranları Tablo 4.20.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.20. 5. seri çok aşamalı deneyler sonucunda aşamalar arasındaki deviyör gerilme artış oranları

	1. aşama		2. aşama		3. aşama	
	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (1. aşamaya göre)	$\sigma_d$ (kPa)	Artış oranı (%) (2. aşamaya göre)	
5. Seri	N5-1	334	422	26,35	492	16,59
	N5-2	432	531	22,92	640	20,53
	N5-3	542	673	24,17	806	19,76
	N5-4	577	731	26,69	883	20,79

Emme kontrollü üç eksenli hücre kesme deneyi uygulamasında alternatiflerden biri eksen kaydırma tekniğidir. 5. seriye ait drenajlı kesme deney sonuçları Şekil 4.43.'te gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelere ait Mohr daireleri çizilmiştir. Mohr dairelerine teğet olarak çizilen kırılma zarfı çizimlerinde doygun deney sonuçlarından belirlenen kayma direnci açıları ( $\phi'$ ) kullanılmıştır.



Şekil 4.43. 5. seri net normal gerilme ile kayma direnci arasındaki ilişki.

Bu seride numunelere 200 kPa kılcal gerilme ve 3 aşamada sırası ile 90 kPa, 140 kPa ve 190 kPa net normal gerilmeler uygulanmıştır. Numunelerin bu gerilme değişkenleri altında sergilemiş olduğu mekanik davranışlar Şekil 4.43.'te gösterilmiştir. Yapılan kesme deneyleri sonucunda numunelere ait elde edilen görünür kohezyon değerleri Tablo 4.21.'de verilmiştir. Mohr dairesi grafikleri incelendiğinde numunelere

uygulanan net normal gerilme değerindeki artışı görünür kohezyonu artırdığı görülmektedir.

Tablo 4.21. 5. seri DOZ üç eksenli hücre kesme deney sonuçları

5. SERİ-DOZ							
N-1 (En Üst)							
	$\sigma_3$ (kPa)	$u_w$ (kPa)	$u_a$ (kPa)	$\sigma_3-u_a$ (kPa)	$u_a-u_w$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$c$ (kPa)
1. aşama	340	50	250	90	200	334	
2. aşama	390	50	250	140	200	422	58
3. aşama	440	50	250	190	200	492	
N-2 (Doğal numune)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$		
1. aşama	340	50	250	90	200	432	
2. aşama	390	50	250	140	200	531	70
3. aşama	440	50	250	190	200	640	
N-3 (Ak_Özgün)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$		
1. aşama	340	50	250	90	200	542	
2. aşama	390	50	250	140	200	673	81
3. aşama	440	50	250	190	200	806	
N-4 (Yenikent)							
	$\sigma_3$	$u_w$	$u_a$	$\sigma_3-u_a$	$u_a-u_w$		
1. aşama	340	50	250	90	200	577	
2. aşama	390	50	250	140	200	731	81
3. aşama	440	50	250	190	200	883	

Dört numune içerisinde en fazla kil (en az kum) içeren N5-1 en düşük görünür kohezyon değerini verirken, en az kil içeren (en yüksek kum) N5-4 en yüksek görünür kohezyon değerine sahiptir. Aynı zamanda uygulanan eksenel yüklemeye en çok mukavemet gösteren N5-4 olurken, en az mukavemet gösteren N5-1'dir. Kum içeriği yüksek olan numunelerde, yüksek görünür kohezyon değerleri kayma direncinde artış sağlamaktadır.

#### 4.7.2.6. 3. 4. ve 5. serilere (Yöntem 2) ait kayma yüzeyinin çizilmesi

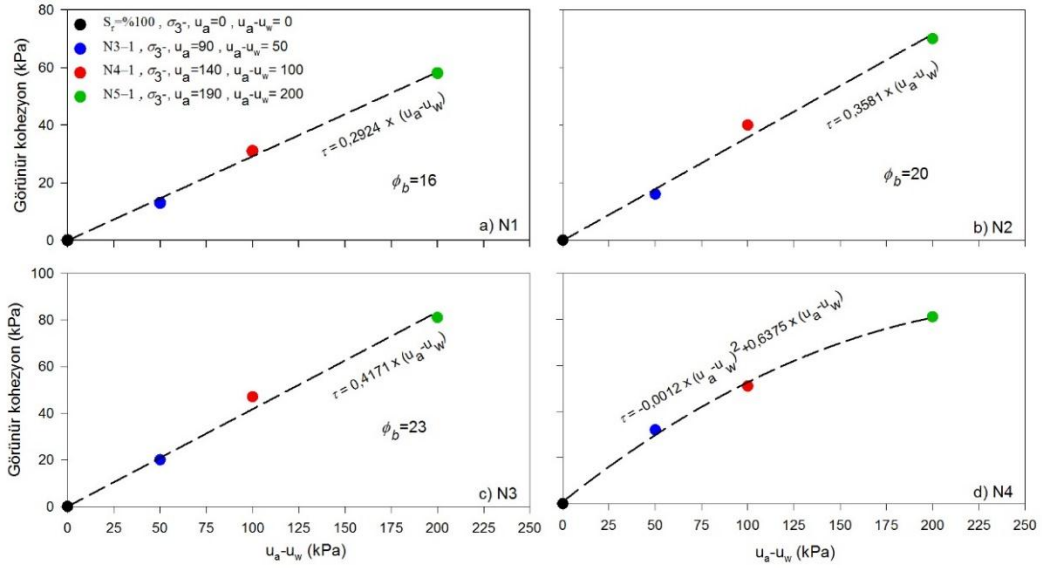
1. ve 2. seri deneysel çalışmalara ait tüm sonuçlar analiz edilerek numunelere ait 3 boyutlu kayma yüzeyleri çizilmiştir. Aynı şekilde numunelere ait kırılma zarfları da 3 boyutlu kayma yüzeylerinde gösterilmiştir. Çizilen kayma yüzeyleri ve Mohr dairelerinden numunelerin kırılma zarflarının lineer ve nonlineer olduğu durumlar tespit edilmiştir. Aynı zamanda çizilen kırılma zarfları 2 boyutlu eksenler yardımı ile de çizilerek elde edilen sonuçların etkisi daha net gösterilmeye çalışılmıştır. Çizilen

kırılma zarfları sonucunda N1, N2 ve N3 numunelerine ait kırılma zarfları doğrusal olarak elde edilirken, N4 isimli numunenin kırılma zarfı doğrusal olmayan bir eğilim sergilemiştir.

1. ve 2. seri deneylerde net normal gerilme sabit tutulmuş, çok aşamalı kesme aşamalarında kılcal gerilme değeri artırılmıştır (Yöntem 1). 3., 4. ve 5. seri deneylerde ise net normal gerilme artırılmış, çok aşamalı kesme aşamalarında kılcal gerilme değeri sabit tutulmuştur (Yöntem 2). Bu gerilme durum değişkenleri ile üç eksenli hücre kesme deneyleri yapıldığında kayma yüzeylerinin elde edilmesi Yöntem 1 ile çok daha kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir. Yöntem 1 ile çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi sonunda doygun olmayan zemin kayma yüzeyi tek bir numune ile çizilebilmektedir. Fakat Yöntem 2 ile tek numune üzerinde gerçekleştirilen çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi tamamlandığı zaman numuneye ait kayma yüzeyi çizilememektedir.

Yöntem 2’de numunelere ait kayma yüzeylerinin çizilebilmesi için en az bir seri deney daha yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Yöntem 2 ile üç seri deney yapılmış ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar ile kayma yüzeyleri çizilmiştir.

Şekil 4.44. Yöntem 2 deneyleri için doygun olmayan zeminlerde kılcal gerilmeye ( $u_a - u_w$ ) karşı görünür kohezyonu göstermektedir. Numunelere uygulanan kılcal gerilme değerlerine karşılık elde edilen görünür kohezyon değerleri N1, N2 ve N3 numuneleri için doğrusal artan bir ilişki göstermektedir. Ancak, N4 numaralı numune 50 kPa (hava giriş değeri) değerinden büyük emme değerleri için doğrusal olmayan davranış göstermektedir.



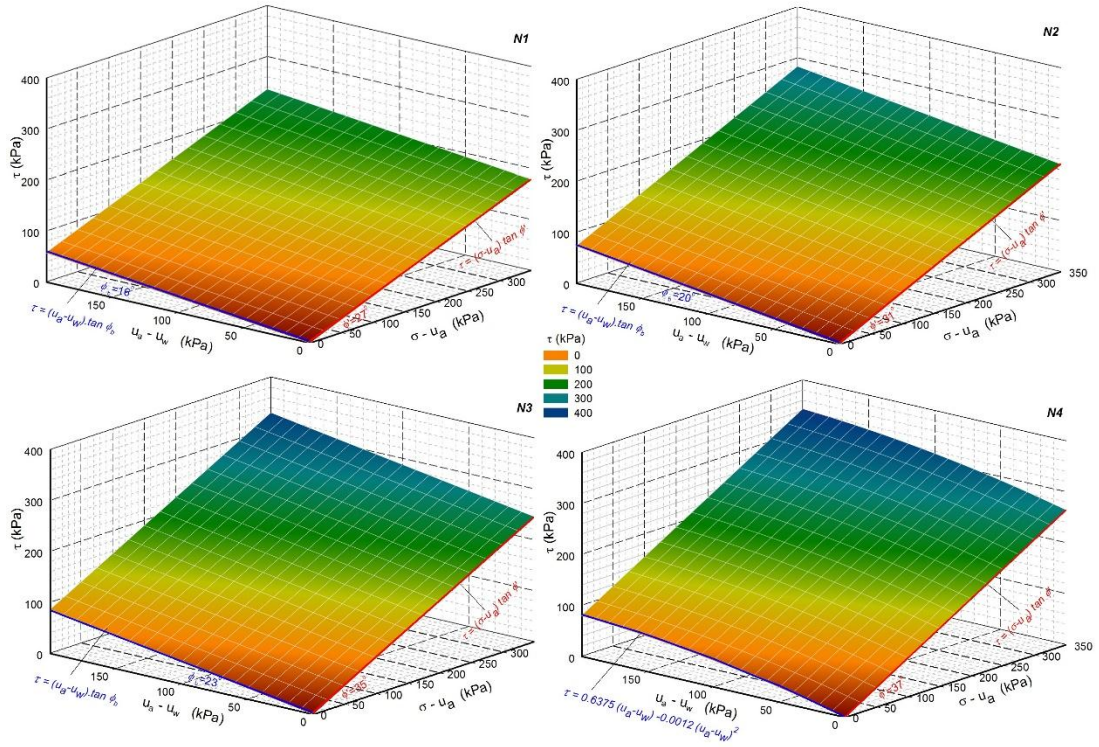
Şekil 4.44. Yöntem 2 deneylerine ait kılcal gerilmeye karşılık görünür kohezyon değerleri (Doğun durumda kohezyon değerleri 0'dır).

Fredlund ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, kayma direnci açısının ( $\Phi^b$ ), kılcal gerilmeye bağlı olmasının yanısıra büyük emme değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde numunelerin yoğunluk değerlerine de bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Numunelerin yoğunluk değerlerinin düşmesi ile  $\Phi^b$  açısının da azalabileceğini söylemişlerdir. Söz konusu emme sınırının düşük yoğunluktaki numuneler için 50 kPa, yüksek yoğunluktaki numuneler için 75 kPa olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada kullanılan numuneler içerisinde en düşük yoğunluğa sahip olan N1 numunesidir. Yapılan deneysel çalışmalar sonunda hem Yöntem 1 hem de Yöntem 2 deney sonuçlarına göre, en düşük  $\Phi^b$  açısı değeri N1'de elde edilmiştir.

Yöntem 2'nin kullanıldığı doymun olmayan numunelerin 3 boyutlu kayma yüzeyleri Şekil 4.45.'te gösterilmektedir.





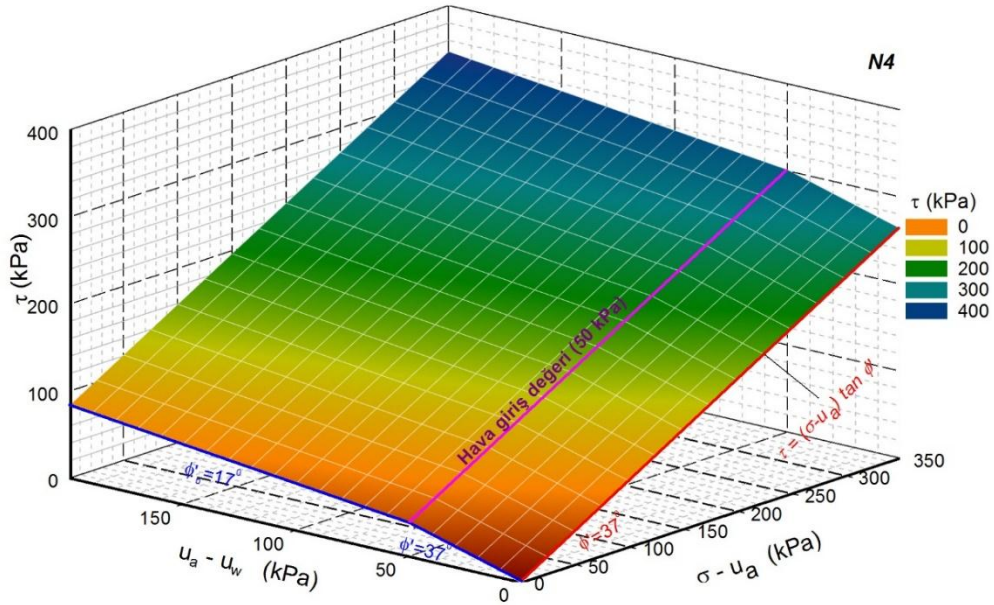
Şekil 4.45. Yöntem 2 deney sonuçlarına göre numunelere ait kırılma zarfı çizimlerinin 3 boyutta gösterimi.

Bu yöntemde de bir önceki yönteme benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu grafiklerde, numunelerin kayma dirençlerindeki kılcal gerilmeye bağlı artışlar görülmektedir. N1, N2 ve N3 için çizilen kırılma zarfları doğrusaldır, en yüksek kum içeriğine sahip N4'te ise kırılma zarfı doğrusal değildir. N4 numunesi için rezidüel su içeriği nispeten diğer numunelere göre düşüktür. Ayrıca N1, N2 ve N3 numunelerinin kayma yüzeyleri düzlemsel elde edilirken N4 numaralı numuneye ait kayma yüzeyi düzlemsel değildir. Bu grafiklerde ayrıca numunelere ait  $\phi^b$  açıları da gösterilmiştir. Numunelerdeki kum miktarı arttıkça  $\phi^b$  değerleri de artmaktadır. Yöntem 2'de kullanılan N4 numaralı zeminin görünür kohezyonu doymuş zemin ortamında sıfır olarak elde edilmiştir.

Numunelerin kesme mukavemeti davranışı 3 boyutlu olarak çizilmiştir. Doğrusal olmayan bir kırılma zarfına sahip numunenin  $\phi^b$  değeri, basit bir çift doğrusal model ile temsil edilmiştir. Bu durumda, doğrusal olmayan davranış gösteren numuneye ait kayma yüzeyinin genel eşitliği aşağıda (Denklemler 4.6) verilmiştir.

$$\tau_{ff} = (\sigma_f - u_a)_f \tan 37 + 0,6375(u_a - u_w) - 0,0012(u_a - u_w)^2 \quad (4.6)$$

Şekil 4.46.'da, doğrusal olmayan davranış gösteren doymun olmayan zeminlerin kırılma zarfı, iki farklı açığa sahip çift doğrusal zarflar kullanılarak gösterilmiştir. Bu gösterimde zemin, hava giriş değerine kadar kılcal gerilme değerlerinde doymun davranış sergilemektedir. Kılcal gerilme nedeniyle kayma direncindeki artışı temsil eden ( $\phi^b$ ) açısı, zeminin hava giriş değerine (N4 numunesi için bu örnekte 50 kPa) kadar doymun zemin kayma direnci açısına ( $\phi'=37^\circ$ ) eşittir.



Şekil 4.46. Yöntem 2 numunelerine ait çift düzlem ile kayma yüzeyi çizimi.

Hava giriş değerinden sonra ortaya çıkacak ikinci bir düzlemde, yenilme yüzeyi daha düşük ve sabit bir  $\phi^b$  açısı (bu örnekte  $17^\circ$ ) ile devam etmektedir. İkinci düzleme ait çizilen  $\phi^b$  açısı ise Şekil 4.46.'da görüldüğü üzere  $\phi'$  açısından daha düşük bir değere sahiptir.

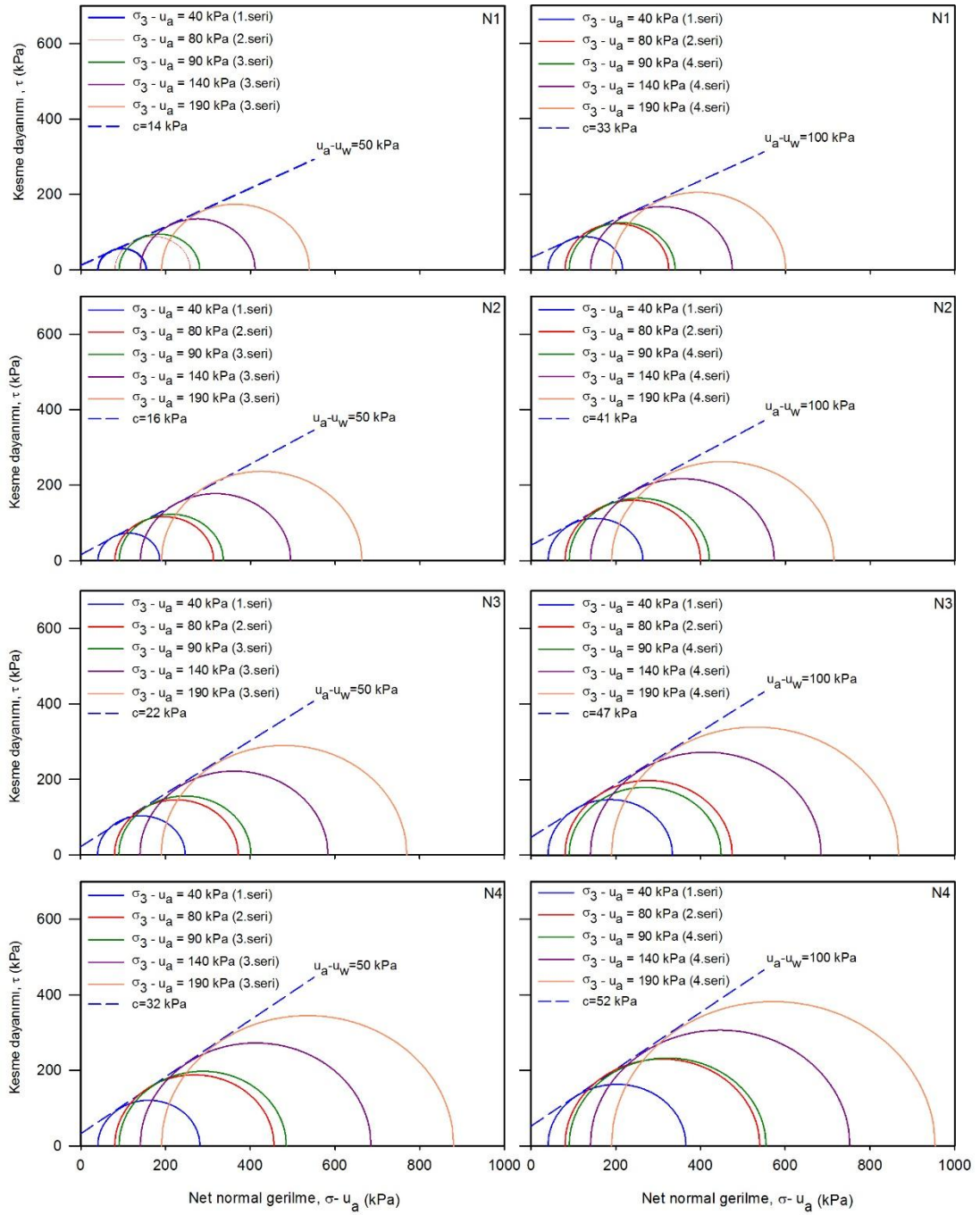
Yapılan 3 seri deney sonucuna bağlı olarak elde edilen maksimum deviyör gerilme değerleri ve görünür kohezyon değerleri toplu halde Tablo 4.22.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.22. 3 seri sonunda DOZ deneylerinden elde edilen 4 numuneye deney sonuçları

	En Üst (50 kPa)					Doğal (50 kPa)				
	$\sigma_3-u_d$ (kPa)	40	80	90	140	190	40	80	90	140
c (kPa)	14	13	13	13	13	17	16	16	16	16
$\sigma_d$ (kPa)	114	178	190	271	349	146	233	246	355	473
	En Üst (100 kPa)					Doğal (100 kPa)				
	$\sigma_3-u_d$ (kPa)	40	80	90	140	190	40	80	90	140
c (kPa)	33	34	31	31	31	40	42	40	40	40
$\sigma_d$ (kPa)	176	245	250	335	411	224	320	331	434	525
	Ak Özgün (50 kPa)					Yenikent (50 kPa)				
	$\sigma_3-u_d$ (kPa)	40	80	90	140	190	40	80	90	140
c (kPa)	25	20	20	20	20	30	32	32	32	32
$\sigma_d$ (kPa)	207	292	312	444	580	241	376	395	545	690
	Ak Özgün (100 kPa)					Yenikent (100 kPa)				
	$\sigma_3-u_d$ (kPa)	40	80	90	140	190	40	80	90	140
c (kPa)	48	47	47	47	47	52	53	51	51	51
$\sigma_d$ (kPa)	294	395	359	545	678	326	460	465	613	764

Tablo 4.22.'de verilen sonuçlar 4 numune için 50 kPa ve 100 kPa kılcal gerilmeler için 40, 80, 90, 140, ve 190 kPa net normal gerilmelerdeki deney sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlardan 40 kPa ve 80 kPa, Yöntem 1 deneylerine aittir. 90, 140 ve 190 kPa deney sonuçları ise Yöntem 2 deneylerinden elde edilmiştir. Bu sonuçlardan her numuneye ait 5 ayrı Mohr dairesi çizilmiştir. Mohr dairelerine teğet çizilen kırılma zarflarından numunelerin görünür kohezyon değerleri elde edilmiştir. Tablodaki sonuçlardan da anlaşıldığı üzere numunelere uygulanan gerilme değişkenlerinin farklı olması veya deneylerin farklı zamanlarda yapılmış olması numunelere ait kohezyon değerlerini değiştirmemektedir.

Şekil 4.47.'de dört numune için farklı gerilme durum değişkenleri ile gerçekleştirilen üç eksenli hücre kesme deney sonuçları gösterilmiştir. Kırılma zarflarının Mohr dairelerine teğet olarak çizilebilmesi için, bu numunelerin doygun durumda yapılan üç eksenli hücre kesme deneyleri sonucunda elde edilen kayma direnci açılarından ( $\phi'$ ) yararlanılmıştır. Tablo 4.22. ve Şekil 4.47. sonuçları incelendiğinde doygun olmayan dört farklı numunede drenajlı durumda yapılan deneylerin doğru analiz edildiği görülmektedir.



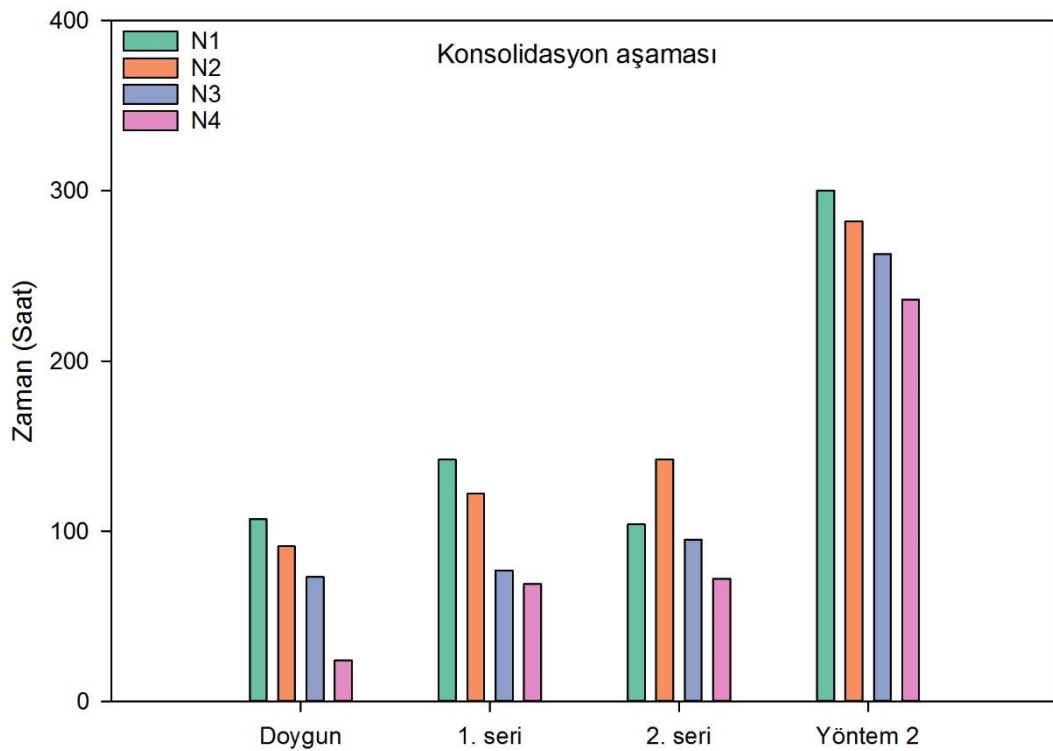
Şekil 4.47. 3 farklı seri deney sonucunda elde edilen Mohr daireleri ve kohezyon değerleri.

Konsolidasyon aşamalarında numuneden su çıkışının tamamlanması için geçen zamanlar saat türünden Tablo 4.23.'te verilmiştir.

Tablo 4.23. Konsolidasyon aşamasının saat türünden deney süreleri

	Doygun	1. seri	2. seri	Yöntem 2
N-1	107	142	104	300
N-2	91	122	142	282
N-3	73	77	95	263
N-4	24	69	72	236

Konsolidasyon aşaması deney süreleri Tablo 4.23.'te verilen bilgilerle ve Şekil 4.48.'de gösterilen grafikte daha rahat analiz edilebilmektedir.



Şekil 4.48. Konsolidasyon aşaması deney süreleri grafiği.

Şekil 4.48.'de gösterilen 1. seri ve 2. seri deneyler Yöntem 1 ile gerçekleştirilen deneylerdir. Yöntem 1 serisinde net normal gerilme değişkeni sabit tutulmuş, deney aşamalarındaki kılcal gerilme değişkeni sırası ile 50, 100 ve 150 kPa olarak uygulanmıştır. Yöntem 2' de ise kılcal gerilme sabit tutulmuş net normal gerilme değişkeni deney aşamalarında sırası ile 90, 140 ve 190 kPa olarak uygulanmış ve deneyler sonlandırılmıştır. Bu gerilme değişkenleri altında sadece konsolidasyon aşaması için geçen süreler kıyaslandığı zaman bile Yöntem 1 ile yürütülecek olan bir deney için gerekli zamanın, Yöntem 2 ile gerçekleştirilen deney süresinden yaklaşık

2,5 kat (%59) daha az olduğu görülmektedir. Kılcal gerilme aşamaları için gerekli olan zaman da hesaba katıldığında Yöntem 1 ile yapılan deneyler için harcanan sürenin Yöntem 2 ile yapılan deneyler için harcanan sürenin ortalama 1/3'ü oranında olduğu görülmektedir.

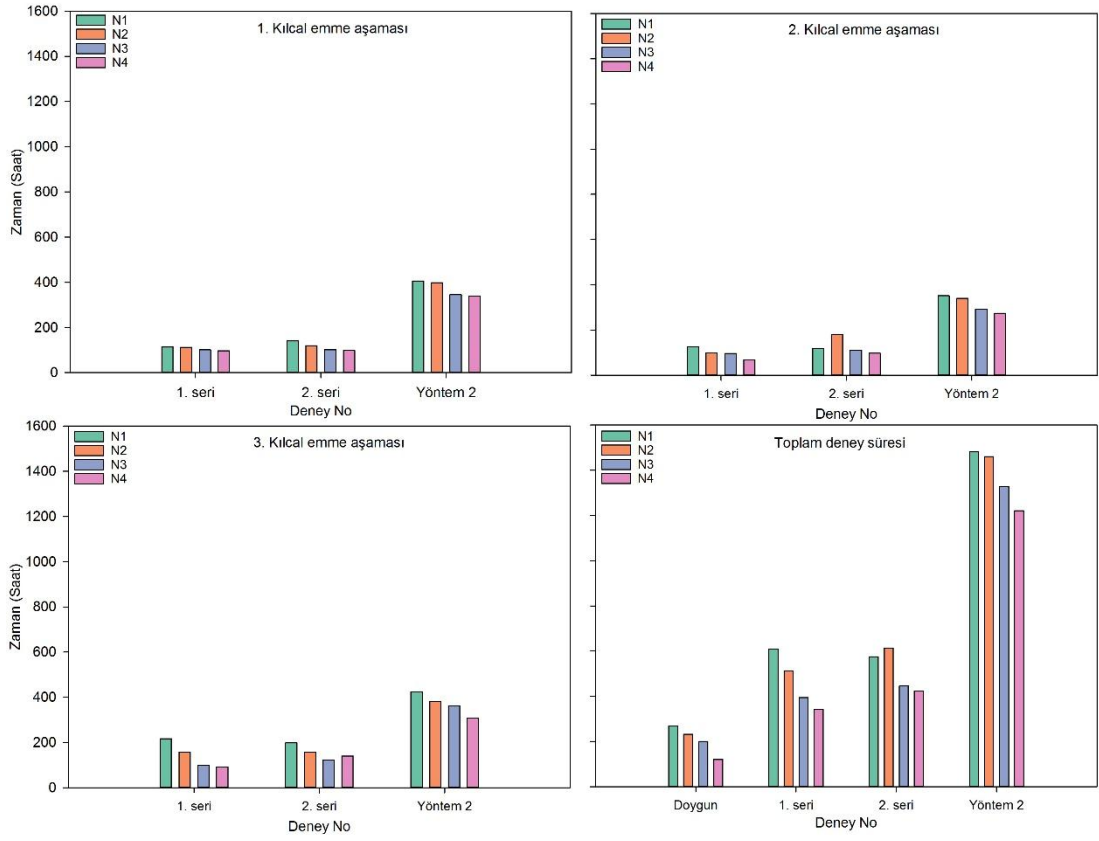
Yapılan tüm deneylere ait kılcal gerilme aşamalarının dengelenme süreleri Tablo 4.24.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.24. Kılcal gerilme aşamalarının saat cinsinden süreleri

		N1	N2	N3	N4
1. Kılcal emme	1. seri	114	112	102	97
	2. seri	141	120	101	98
	Yöntem 2	406	399	345	340
2. Kılcal emme	1. seri	126	99	96	67
	2. seri	119	180	111	97
	Yöntem 2	351	340	292	273
3. Kılcal emme	1. seri	216	158	99	91
	2. seri	199	157	122	140
	Yöntem 2	424	381	362	309

Tablo 4.24.'te verilen kılcal gerilme dengelenme aşama sürelerine dikkat edildiği zaman, numune içerisinde bulunan kum miktarının artmasının deney süresini kısalttığı görülmektedir. Kum danecikleri arasında bulunan boşlukların büyük olması sebebi ile su daha çabuk drene olabilmekte ve denge haline gelebilmektedir.

Şekil 4.49. incelendiğinde 1. seri ve 2. seri (Yöntem 1) için gerekli sürenin Yöntem 2 için gerekli süreden çok daha kısa olduğu anlaşılmaktadır. Numune içerisinde bulunan iri dane miktarı (kum oranı) arttıkça numunenin emme aşamasındaki dengelenme süresi de kısalmaktadır. Bu durumda emme aşamalarında en uzun sürede dengeye ulaşan numuneler kil içeriği en fazla olan N1'dir. Yöntem 1 ile deney yapmanın Yöntem 2 ile deney yapmaktan çok daha kısa sürdüğü anlaşılmaktadır. Söz konusu bu bilginin doğruluğu Şekil 4.49.'da verilen deney sürelerine bakıldığı zaman daha rahat ortaya konulabilmektedir.



Şekil 4.49. 4 numuneye ait toplam ve kılcal gerilme aşamaları süreleri.

## **BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu tez çalışmasında doymun olmayan zeminlerin ince dane içeriğinin kayma direnci üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bu inceleme, Adapazarı alüvyal zeminlerinin farklı bölgelerinden alınan zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında silindirik numuneler yapay olarak bulamaç (slurry) yöntemi ile hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında kil ve silt danelerini ayırmak için “Çöktürme tekniği” adı verilen yeni bir uygulama sayesinde ince daneli zemin numuneleri birbirinden ayrılmıştır. Çalışmadaki ilk amaç, numune içerisinde bulunan ince dane içeriğinin kayma direnci üzerine olan etkisinin incelenmesidir. Bunun yanında doymun olmayan zeminlerde kullanılan parametrelerin (net normal gerilme ve kılcal gerilme) uygulanma yöntemleri de değiştirilerek, sonuçlara ve deney süresine olan etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için geleneksel üç eksenli hücre kesme deney cihazı modifiye edilmiş ve doymun olmayan zeminlerde deney yapılabilecek yapıya getirilmiştir. Doymun ve doymun olmayan tüm deneyler için ASTM standartları esas alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 4 adet doymun zemin ve 20 adet doymun olmayan zemin deneyi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmaların sonuçları bilgisayar ortamına işlenerek sonuçları SigmaPlot programı ile grafiksel olarak sunulmuştur. Bu bölümde tez kapsamında yapılan tüm fiziksel ve mekanik çalışmalardan elde edilen veri ve gözlemlere dayanan sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.



## 5.1. Sonuçlar

TS 1500/2000'e göre N1 ve N2 isimli numunelerin CI (Orta plastisiteli kil), N3 ve N4 isimli numunelerin ise ML (Düşük plastisiteli silt) zemin sınıfında buldukları belirlenmiştir. N1, N2, N3 ve N4 sırasıyla %22, %18, %14 ve %10 oranında kil, %1, %4, %18 ve %23 oranında ise kum içeriğine sahiptir.

Numune hazırlama aşamasına geçmeden önce bütün numunelerin likit limit değerleri belirlenmiştir. Üç eksenli hücre kesme deneyinde kullanılacak numuneler likit limit değerinin 1,5 katı su muhtevasında bulamaç yöntemi ile hazırlanmıştır.

Doğun olmayan zeminler için önemli bir göstergeolan SWC eğrilerinin belirlenmesi için filtre kağıdı ve basınç plakası yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SWC eğrilerinden en düşük hava giriş değeri 50 kPa olarak N4'te (kil içeriği en az, kum içeriği en fazla) elde edilmiştir. En yüksek hava giriş değeri ise 110 kPa olarak N1'de (kil içeriği en fazla, kum içeriği en az) belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre doğun olmayan zeminler için üç eksenli hücre kesme deneylerinde kullanılacak olan kılcal gerilme değeri minimum 50 kPa olarak seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan dört farklı numune için doğun ortamda konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleri (CD) yapılmış ve tüm numunelerin efektif kohezyon ( $c'$ ) değerleri 0 (sıfır) bulunurken, kayma direnci açısı ( $\phi'$ ) ise N1, N2, N3 ve N4 numaralı numuneler için sırası ile  $27^{\circ}$ ,  $31^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$  ve  $37^{\circ}$  olarak elde edilmiştir.

Üç eksenli hücre kesme deney sonuçlarına göre çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden, numune içerisinde bulunan kum miktarının artması ile numunenin rijitliğinin, gerilme için gerekli birim deformasyon miktarının ve deviatör gerilme değerlerinin arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Çok aşamalı olarak çizilen gerilme-şekil değiştirme grafik sonuçlarına göre 2. ve 3. aşamalarda elde edilen deviatör gerilme artışı değerlerinin 1. aşamaya oranla daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çok aşamalı olarak numunelere ait çizilen Mohr daireleri sonuçlarına göre uygulanan kılcal gerilme değeri numunelerden elde edilen görünür kohezyon (c) değerini artırmaktadır. Artan kılcal gerilme değeri ile görünür kohezyon değerleri artmaktadır.

Uygulanan kılcal gerilme değeri numunelerin direncini artırmaktadır. Kılcal gerilme değerinin artmasının zemin numunelerinin rijitliğini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yöntem 1 ile yapılan 1. seri ve 2. seri deneyler sonucunda N1, N2 ve N3 isimli numunelerin kırılma zarfları doğrusal olarak elde edilmiştir. N4 isimli numunenin kırılma zarfı ise nonlinear olarak elde edilmiştir. N4 numaralı numunenin kırılma zarfının kavisli olmaya başladığı emme değeri sınırı ise 50 kPa olarak tespit edilmiştir. Bu 50 kPa değeri ise SWC eğrilerinden N4 isimli numuneye ait hava giriş değeridir.

3 boyutlu olarak tüm zeminlerin kayma direnci düzlemleri çizilmiştir. N1, N2 ve N3 isimli numuneler için 3 boyutlu olarak çizilen kayma yüzeyleri düzlemsel olarak elde edilmiştir. N4 isimli numunenin 3 boyutlu kayma yüzeyi ise düzlemsel elde edilememiştir. N4 isimli numuneler için ayrı bir grafikte kayma yüzeyleri 2 düzlemsel açı ile oluşturulmuş ve bu modellemeye çift doğrusal (doubleplanar) ismi verilmiştir. Bu grafikte çizilen birinci doğrusal grafik numunenin hava giriş değerine kadar doygun zemin durumundaki içsel sürtünme açısı ile çizilirken, 2. düzlemin eğimi daha düşük bir açıda elde edilmiştir.

Kırılma zarflarının doğrusal olmadığı N4 numaralı numuneler için ayrıca matematiksel bir model önerilmiştir. Elde edilen bu matematiksel model sayesinde numuneye uygulanacak herhangi bir kılcal gerilme değeri için kayma direnci değeri dane dağılımı benzer olan numunelerde doğrudan hesaplanabilecektir.

Doygun olmayan zeminlere ait kılcal gerilmenin etkisi ile numunelerde meydana gelen  $\phi^b$  açısı değeri, numunede bulunan kum içeriğinin artması ile artış göstermektedir. En küçük  $\phi^b$  açısı en fazla kil miktarı bulunan N1 numunelerinde, kırılma zarfı doğrusal olarak çizilebilen numune için en yüksek  $\phi^b$  açısı ise en az kil bulunan N3 isimli numuneden elde edilmiştir.

Yöntem 2 ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda oluşturulan gerilme-şekil değiştirme grafikleri, kayma yüzeyleri ve çizilen kırılma zarfları Yöntem 1 ile aynı davranışları sergilemektedir. Yöntem 2'nin Yöntem 1'den en büyük farkı ise deney sürelerinin çok daha uzun sürmesidir. Yöntem 1 ile yapılan deneylerden de aynı sonuçlar elde edilebilirken Yöntem 2 ile yapılan deneyler için Yöntem 1'e göre yaklaşık 3 kat daha fazla deney süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Doygun olmayan zeminler için kayma direnci değerinin bulunması istenildiği takdirde Yöntem 1 daha kısa sürede aynı sonuçları vermektedir.

Aynı zamanda geçirgenliği yüksek olan zeminler (N4) üzerinde yapılan doygun olmayan zemin deneyleri, geçirgenliği düşük olan zeminlere (N1) göre zaman açısından daha kısa sürmektedir.

## 5.2. Öneriler

Silt oranı fazla olan numuneler için dondurma işleminin hızlıca yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Aksi takdirde numune içeriğindeki su numunenin altına doğru inerek buz halini almakta ve numunenin üst tarafı kuruyarak homojenliğini koruyamamaktadır.

Kendini ayakta tutamayan numuneler için dondurucudan çıkarıldıktan sonra deney hücrelerine yerleştirme aşamasına kadar olan hazırlığın kısa sürede bitirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde numune çözülmeye başladığı için bozulmakta ve yeni numune hazırlama gereksinimi doğmaktadır.

Doygun olmayan zeminler için deneyler yapılırken ortam şartlarının (hava sıcaklığı) sabitlenmesi gerekmektedir.

Doygun olmayan zeminlerde özellikle kılcal gerilme aşamalarının dengelenme süreleri numune içeriğine bakılmaksızın değişkenlik gösterebilmektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için numunelerin homojen hazırlanması ve numune hazırlama aşamalarında tek bir standart kullanılması gerekmektedir. Tüm deneyler için

bulamaç kıvamda numune bir defada hazırlanmalıdır. Aksi halde numuneler arasındaki homojenlik sağlanamamaktadır.

Filtre kağıdı yöntemi ile numunelere ait emme değerinin belirlenebilmesi için numuneye ait su akışının dengelenmesi gerekmektedir. Farklı dane içeriğine sahip numuneler için su akışının dengelenme zamanının belirlenebilmesi için daha fazla sayıda numune üzerinde deneyler yapılması gerekmektedir.

Doygun olmayan zeminlerde çok aşamalı üç eksenli deneylerin kesme aşamalarının nerede sonlandırılacağı konusunda literatürde kesin bir yargı bulunmamaktadır. Bu karar için kesme deneyinden elde edilen sonuçlar anlık olarak grafiğe aktarılmalı ve grafik eğiminin azalmaya başladığı noktada ilgili deney aşaması sonlandırılmalıdır.

Kum içeriği fazla ve kil içeriği az olan silt numuneler için deneysel çalışmalar yapılarak matematiksel modeller oluşturulabilir ve numunelerin kayma direnci değerleri kolaylıkla bulunabilir.

## KAYNAKLAR

- Abd. I. A., Fattah M. Y., Mekkiyah H. Relationship between the matric suction and the shear strength in unsaturated soil. *Case Studies in Construction Materials*, e00441, Volume 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020>.
- Agus, S. S., Schanz, T., 2007. Errors in Total Suction Measurements. *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Volume 112, pp.59-70.
- Aitchison, G.D., 1965. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas. In: Aitchison GD (ed) *A symposium in Print*, Australia, Butterworth.
- Alim, M. A., Nishigaki, M., Chegbeleh, L. P., Akudago, J. A., Komatsu, M., 2009. Determination of Soil-Water Characteristic Curves of Unsaturated Sandy Soils Using Membrane Filter with Stainless Wire Mesh. *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*. Vol.14 No1, pp.13-1.
- Arroyo, H., Rojas, E., Perez-Rea, M. L., Horta, J., Arroyo, J., 2013. Simulation of the shear strength for unsaturated soils, *Comptes Rendus Mecanique*, 341, 727–742.
- ASTM D4767-02. 2003. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5298-94. 2000. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5298-10. 2016. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D6836-16. 2016. Standard Test Methods For Determination Of The Soil Water Characteristic Curve For Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Barahona, C., Sandi, L., Rojas, J. C., Gemmina, D. E., Bezuijen, A., Cornellis, W., 2021. Loading Rate Effect on Mechanical Properties of An Unsaturated Silty Sand, *MATEC Web of Conferences* 337, 01018 (2021) PanAm-UNSAT, <https://doi.org/10.1051/matecconf/202133701018>.
- Barbour, S. L. 1998. Nineteenth canadian geotechnical colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(5): 873-894.
- Bicalho, K. V., Correia, A. G., Ferreira, S. R., Fleureau, J. M., & Marinho, F. A. 2007. Filter paper method of soil suction measurement. In *XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.

- Bishop, A. W., Eldin, A. K. G. 1950. Undrained triaxial tests on saturated sands and their significance in the general theory of shear strength, *Geotechnique*, Vol. 2, pp. 13–32.
- Bishop, A. W., 1959. The principle of effective stress. Lecture delivered in Oslo, Norway, in 1955. *Tek. Ukeblad*, 106(39), 859–863.
- Bishop, A.W. & Blight, G.E. 1963. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Géotechnique* 13(3): 177–197.
- Bittelli, M., Flury, M. 2009. Errors in water retention curves determined with pressure plates. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5): 1453-1460.
- Bouwer, H. 1978. *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Bulut, R., Lytton, R. L., Wray, W. K. 2001. Soil suction measurements by filter paper. In *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*, 243-261.
- Bulut, R., Wray, W. 2005. Free energy of water-suction in filter papers. *Geotechnical Testing Journal*, 28(4): 355-264.
- Carraro, J. A. H., Prezzi, M. (2007), “A new slurry-based method of preparation of specimens of sand containing fines”, *Geotechnical Testing Journal*, 31(1). 1-11. doi: 10.1520/gtj100207.
- Catana, M. C., Vanapalli, S. K., Garga, V. K. 2006. The water retention characteristics of compacted clays. In *Unsaturated Soils*, 1348-1359.
- Chandler, R. J., Gutierrez, C. I., 1986. The filter paper method of suction measurement. *Geotechnique* 36, No. 2, 265-268.
- Chandler, R. J., Crilley, M. S., Montgomery- Smith, G., 1992. A low-cost method of assessing clay desiccation for lowrise buildings. *Proc. Instn. Civ. Engrs Civ. Engng.* 92, Mayis, 82-89.
- Charles, W. W. Ng., Cui, Y., Chen, R., Delage, P., 2007. The axis-translation and osmotic techniques in shear testing of unsaturated soils: A comparison. *Soil and Foundations*, Japanese Geotechnical Society. Vol.47, No.4, 675-684.
- Charles, W. W. Ng., Menzies, B., 2007. *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. Taylor&Francis.
- Chen J., Hai, Y., 2012. A  $\Phi$ b Model for Predicting Shear Strength of Unsaturated Soils. *Advanced Materials Research*, Vols. 594-597, pp 425-429.
- Chen, P., Wei, C., Liu, J., Ma, T., 2013. Strength Theory Model of Unsaturated Soils with Suction Stress Concept. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Applied Mathematics*, Volume 2013, Article ID 756854.
- Coleman, J. D., 1962. Correspondence: Stress/Strain relations for partly satuated soils. *Geotechnique*. 12(4), 348-350.
- Cresswell, H. P., Green, T. W., McKenzie, N. J. 2008. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1): 41-49.

- Croney, D., Coleman, J.D., and Black, W.P.M. 1958. Movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance, In *Water and Its Conduction in Soils*, Highway Research Board, Special Report, Washington, DC, No. 40, pp. 226-252.
- Donald, I. B. 1956. Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures, *Proceedings of the Second Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Christchurch, New Zealand, pp. 200–205.
- Deng, J. L., Kameya, H., Tsutsumi, Y., & Koseki, J., Kuwano, J., 2010. Simple Shear Tests on Unsaturated Undisturbed Specimens Containing a Weak Layer. In: Alonso, E., Gens, A. (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference Unsaturated Soils*, Barcelona, Spain, pp. 235–240.
- Dregne, H. E., 1976. *Soils in Arid Regions*, Elsevier, New York.
- Elkady, T. Y., Al-Mahbashi, A., Dafalla, M., Al-Shamrani, M. 2015. Effect of compaction state on the soil water characteristic curves of sand–natural expansive clay mixtures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(3): 289-302.
- Er, H., Demir, A., D., Demir, Y., Meral, R., 2020. Toprak su tutma eğrisi elde edilmiş yöntemleri ve kullanım alanları, *Tarımda yenilikçi yaklaşımlar, Sürdürülebilir tarım ve biyoçeşitlilik*.
- Farouk, A., Lamboj, L., Kos, J., 2004. Influence of Matric Suction on the Shear Strength Behaviour of Unsaturated Sand. *Acta Polytechnica* Vol. 44 No. 4.
- Farulla, A. A., Rosone, M., 2012. Shear strength of a compacted scaly clay from suction-controlled triaxial tests. *Unsaturated Soils: Research and Applications*, Springer Volume 1, 257-264.
- Fattah, M. Y., Yahya, A. S., Al-Hadidi, M. T., Ahmed, B. A. 2013. Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils. *European Scientific Journal* March 2013 edition vol.9, No.9.
- Fondjo, a. A., Theron, E., Ray, R. P., 2020. Assessment of various methods to measure the soil suction, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, Volume-9 Issue-12, DOI: 10.35940/ijitee.L7958.1091220.
- Fredlund, D. G. 1973. Volume change behaviour of unsaturated soils. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton.
- Fredlund, D. G. Morgenstem, N. R. 1977. Stress State Variables for Unsaturated Soils. *ASCE J. Geotech. Eng.* 103, 447-466.
- Fredlund, D. G., Bergan, A. T., and Wong, P. K. 1977. Relationship between modulus and stress conditions for cohesive subgrade soils, *Transportation Research Record*, Vol. 642, pp. 73–81.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. 1978. Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.

- Fredlund, D. G., 1987. Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction, in M. G. Anderson and K. S. Richards (Eds.), *Slope Stability*, Wiley, New York, pp. 113–144.
- Fredlund, D. G., Rahardjo H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley, NY.
- Fredlund, D. G., 2000. The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering, The R.M. Hardy Address, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 5, pp. 963–986.
- Fredlund, D. G., Vanapalli, S. K., 2002. Shear strength of unsaturated soils. *Agronomy Soil Testing Manual*, Agronomy Society of America, pp. 329-361.
- Fredlund, D. G., 2005. *Unsaturated soil mechanics in engineering*. Geo-Institute, ASCE.
- Fredlund, D.G. 2006. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Terzaghi Lecture, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 286-321.
- Fredlund, D. G., Sheng, D., Zhao, J., 2011. Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. *Canadian geotechnical journal*, 48(2): 186-198.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., Fredlund, M.D., 2012. *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc.
- Fredlund, D. G. 2019. Determination of unsaturated soil property functions for engineering practice, Of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cape Town South Africa, pp. 3-19.
- Fung, Y. C., 1965. *Foundations of Solid Mechanics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gan, J. K. M., Fredlund, D. G., Rahardjo, H. 1988. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 3, <https://doi.org/10.1139/t88-055>.
- Gan, J. K.-M., Fredlund, D. G. 1996. Shear strength characteristics of two saprolitic soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 595–609.
- Gebre, H. 2010. *Unsaturated shear strength characteristic and stress strain behaviour of expansive soils of addis ababa*. School of Graduate Studies of Addis Ababa University, Ethiopia.
- Georgetti, G. B., Vilar, O. M., 2010. Constant Water Content Triaxial Compression Tests With a Compacted Soil. In: Alonso, E., Gens, A. (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference Unsaturated Soils*, Barcelona, Spain, pp. 247–252.
- Gülşen, F., 2013. Doygun ve doygün olmayan zemin mekaniği kavramları ile sığ temellerin taşıma gücü. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Haines, W.B. 1923. The volume changes associated with variations of water content in soil, *Journal of Agricultural Science*, vol. 13, pp. 296-310.



- Hamid, T. B. 2005. Testing and modelling of unsaturated interfaces. University of Oklahoma. School of Civil Engineering and Environmental Science. Graduate College.
- Handoko, L., Yasufuku, N., Oomine, K., Hazarika, H., 2013. Suction Controlled Triaxial Apparatus for Saturated-Unsaturated Soil Test. *Int. J. of GEOMATE*. 4(1), 466-470.
- Hernandez, G. T., 2011. Estimating the Soil–Water Characteristic Curve Using Grain Size Analysis and Plasticity Index. Degree Master of Science. Arizona State University.
- Hilf, J. W., 1956. An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils. Technical Rep. No. 654, Bureau of Reclamation, Denver.
- Ho, D. Y. F., Fredlund, D. G., 1982. A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soils *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 5, No. 1/2, pp. 18-25.
- Hong, W. T., Jung, Y. S., Kang, S., Lee, J. B., 2016. Estimation of soil-water characteristic curves in multiple-cycles using membrane and TDR system. *Materials*, 9, 1019.
- Hosseini, S. M. R., Jesmani, M., 201. Effect of normal stress and relative compaction on secant friction angle of sands. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 38: 382 – 391.
- Houston, S., Houston, W., Wagner, A. 1994. Laboratory filter paper suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 17(2): 185-194.
- Houston, S. L., ASCE, M., Garcia, N. P., Houston, W. N, ASCE, M. 2008. Shear Strength and Shear-Induced Volume Change Behavior of Unsaturated Soils from a Triaxial Test Program. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 134(11): 1619-1632.
- Hoyos, L. R., Yepes, J. E., Velosa, C. L., Puppala, A. J. Unsaturated Shear Strength of Compacted Clayey Soil via Suction-controlled Ring Shear Testing. 4th European Conference on Unsaturated Soils (E-UNSAT 2020), Volume 195, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019503024>.
- Hyde, A. F. L., Ward, S. J., (1985), “A pore pressure and stability model for a silty clay under repeated loading”, *Geotechnique*, 35(2): 113-125. doi: 10.1680/geot.1985.35.2.113.
- Karlinasari, R., Rahardjo, P. P., 2010. Unsaturated Shear Strength Parameters of Tropical Volcanic Residual Soils: In: Alonso, E., Gens, A. (Eds.), *Proceedings of the Fifth International Conference Unsaturated Soils*, Barcelona, Spain, pp. 259–264.
- Kassab, A. E. R., Ismail, K. M. H., Elkamash, W. H., Moubark, A. H., 2021. Shear Strength Behavior of Unsaturated Clay. *Life Science Journal*, 18(5).
- Kayadelen, C., 2005. Doygun olmayan ince daneli zeminlerin K<sub>0</sub> koşullarındaki yanıl basınçlarının incelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.

- Khanzode, R. M., Fredlund, D. G., Vanapalli, S. K., 1989. An Alternative Method for the Measurement of Soil-Water Characteristic Curves for Fine Grained Soils. Proceedings of the 52nd Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan. pp. 623-63.
- Kuerbis, R., Vaid, Y. P., (1988), "Sand sample preparation-the slurry deposition method", *Soils and Foundations*, 28(4), 107-118. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.4\\_107](https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.4_107).
- Krahn, J., Fredlund, D. G. 1972. On total, matric and osmotic suction. *Journal of Soil Science Journal*, 114(5): 339–348.
- Klute, A., 1986. Water retention: Laboratory methods, In A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, p. 635–662.
- Labuz, J. F., Zang, A., 2012. Mohr–Coulomb Failure Criterion. *Rock Mech Rock Eng* 45:975–979, DOI 10.1007/s00603-012-0281-7.
- Leong, E. C., Rahardjo, H., 1997. Permeability functions for unsaturated soils. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 123: 1118-1126.
- Leong, E. C., Rahardjo, H., Fredlund, D. G., 2001. Application of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. In *Proc. of the 8th East Asian Pacific Conf. on Structural Eng. And Construction*, Singapore.
- Leong, E., He, L., Rahardjo, H. 2002. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. *Geotechnical Testing Journal*, 25(3): 322-333.
- Leong, E. C., Nyunt, T. T., Rahardjo, H., 2013. Triaxial Testing of Unsaturated Soils. L. Laloui and A. Ferrari (Eds.): *Multiphysical Testing of Soils and Shales*, pp. 33-44.
- Lepakshi, R., Reddy, B. V. V., 2020. Shear strength parameters and Mohr-Coulomb failure envelopes for cement stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, Volume 249, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118708>.
- Li, A. G., Tham, L. G., Yue, Z. Q., Lee, C. F., Law, K. T. 2005. Comparison of field and laboratory soil–water characteristic curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(9): 1176-1180.
- Li, X., Zhang, L., 2007. Prediction of SWCC for Coarse Soils Considering Pore Size Changes, *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, DOI: 10.1007/3-540-69873-6\_40.
- Liu, W., Tang, X., Yang, Q., 2016. A Slurry Consolidation Method for Reconstitution of Triaxial Specimens. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(1):150-159. doi:10.1007/s12205-016-0199-9.
- Lu, N., Likos, W. J., 2004. *Unsaturated soil mechanics*. John Wiley and Sons, Inc.
- Maaitah, O. N., 2012. Soil-Water Characteristic Curve Model-Silty Sand Soil. *Jordan Journal of Civil Engineering*, Volume 6, No. 1.
- Marinho, F. A., Stuermer, M. M., 2000. The influence of the compaction energy on the swcc of a residual soil. In *Advances in Unsaturated Geotechnics*, 125-141.

- Marinho, F. A. M. 1994. Shrinkage behavior of some plastic clays. PhD Thesis, Imperial College, University of London.
- Matyas, E. L., Radhakrishna, H. S., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol. 18, No. 4, pp. 432–448.
- Meigs, P., 1953. World distribution of arid and semi-arid homoclimates, UNESCO, *Reviews of Research on Arid Zone Hydrology, Arid Zone Research*, pp. 203–210.
- Mekkiyah, H. M., Fattah, M. Y., Abd, İ. A., 2021. Suction Effect on Shear Strength of An Overconsolidated Unsaturated Soil, *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 16, No. 4, 3562–3575.
- Melbouci, B., Ghanem, F., 2013. Influence of suction on the permeability of unsaturated soils. *Advances in Unsaturated Soils*, pp:221-224.
- Mendes, J., Toll, D. G., Evans, F., 2012. A Double Cell Triaxial System for Unsaturated Soils Testing. *Unsaturated Soils: Research and Applications, Springer Volume 1*, 5-10.
- Mengling, H., Hailin, Y., Jianxi, R., 2016. Effects of dry density on soil water characteristic curve of clay. 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016).
- Mohr, O. 1914. *Abhandlungen aus dem gebiete der technischen mechanic*, 3rd ed., Welhelm Ernst and Sohn, Berlin.
- Muñoz-Castelblanco, J. A., Pereira, J. M., Delage, P., Cui, Y. J., 2011. Suction Measurements on A Natural Unsaturated Soil: A Reappraisal of the Filter Paper Method, *Unsaturated Soils – Alonso & Gens (eds)*, Taylor & Francis Group, 707-712.
- Muraleetharan, K.K., Granger, K. K., 1999. The use of miniature pore pressure transducers in measuring matric suction in unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 22, No. 3, pp. 226–234.
- Murray, E. J., Sivakumar, V., 2010. *Unsaturated soils a fundamental interpretation of soil behaviour*, John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- Nam, S., Gutierrez, M., Diplas, P., Petrie, J., 2011. Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test, *Engineering Geology*, 122, 272–280.
- Nishimura, T., and Fredlund, D. G. 2001. Failure envelope of a desiccated, unsaturated silty soil, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul*, pp. 615–618.
- Nuntasarn, R., Wannakul, W., 2017. Drained shear strength of compacted khon kaen loess. *International Journal of GEOMATE*, Vol.13, Issue 35, pp.28- 33.
- Oloo, S. Y., Fredlund, D. G., Gan, J. 1997. Bearing capacity of unpaved roads. *Canadian Geotechnical Journal*. 34(3):398-407, DOI:10.1139/cgj-34-3-398.
- Önalp, A. 2002. *Zeminler ve Mekaniği*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 408.
- Özocak, A., 2003. Doygun olmayan siltli zeminlerin sıkışabilirliği. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü*.

- Pan, H., Qing, Y., Pei-yong, L., 2010. Direct and Indirect Measurement of Soil Suction in the Laboratory. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 15.
- Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., Fredlund, D. G., 1995. Shear-strength characteristics of a residual soil. *Can. Geotech. J.* 32: pp. 60-77.
- Rahardjo, H., Heng, O. B., Choon, L. E., 2004. Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, pp. 363–368.
- Rasool, A. M. 2014. Mechanical behaviour of unsaturated soils in isotropic loading-unloading, monotonic and cyclic load sequence. Saitama University, Graduate School of Science and Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Degree of Master of Engineering.
- Rassam, D. W., Williams, D. J., 1999. A relationship describing the shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, pp. 421-436.
- Rassam, D. W., Cook F., 2002. Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 25, No. 2, pp. 215–220.
- Richards, B., G., 1965. Measurement of free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors, in moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, A Symposium in Printed Australia: Butterworths, Sf. 39-46.
- Ridley, A. M., 2015. Soil suction — what it is and how to successfully measure it. *Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Australian Centre for Geomechanics. pp. 27-46.
- Salour, F., Erlingsson, S., Zapata, C. E., 2014. Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control, *Canadian Geotechnical Journal*, 51: 1413-1422, dx.doi.org/10.1139/cgj-2013-0484.
- Sheng, D., Zhou, A., Fredlund, D. G., 2011. Shear Strength Criteria for Unsaturated Soils, *Geotech Geol Eng*, 29:145–159.
- Sillers, W. S., Fredlund, D. G., Zakerzadeh, N., 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol 19(3-4), 243-283.
- Sivakumar Babu, G., Peter, J., Mukesh, M., Gartung, E., 2005. Significance of soil suction and soil water characteristic curve parameters. *Geotechnical Testing Journal*, 28(1): 102-107.
- Sreedeeep, S., Singh, D. N. 2005. A study to investigate the influence of soil properties on suction. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(1): 61-66.
- Tang, C. T., Borden, R. H., Gabr, M. A., 2018. A Simplified direct shear testing procedure to evaluate unsaturated shear strength. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 41, No.2, doi:10.1520/GTJ20150161.
- Tarantino A., Mongioni, L., 2001. Experimental procedures and cavitation mechanisms in tensiometer measurements. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19: 189-210.

- Tekinsoy, M. A., Kayadelen, C., Taşkıran T., 2005. Suya Doygun Olmayan Zeminlerin Üç Eksenli Parametrelerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 20(1).
- Tekinsoy, M. 2005. Doymamış Zeminlerin Özellikleri. V. Oturum Temel Mühendisliği.
- Terzaghi, K., 1936. The Shear Strength of Saturated Soils, Proceedings of The First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, MA, Vol. 1, pp. 54-56.
- Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics, Wiley, New York.
- Thieu, N. T. M., Fredlund, D. G., and Vu, H. Q. 2000. General partial differential equation solvers for saturated-unsaturated seepage, Proceedings of Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT ASIA 2000 , Singapore, pp. 201–206.
- Thu, T. M., Rahardjo, H., Leong, E. C., 2007. Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted silt. Can. Geotech. J. 44: 266–275.
- Tian, Y., 2014. Predicting unsaturated soil moisture diffusivity coefficient using slope of SWCC and saturated permeability coefficient. Bachelor of Science in Environmental Engineering Hunan Agriculture University Changsha, Hunan. Master of science.
- Topp, G.C. and Miller, E.E. 1966. Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities of glass-bead media, Proceedings of the Soil Science Society of America, Vol. 30, pp. 156-162.
- Tripathy, S., Elgabu, H., Thomas, H. R., 2011. Matric suction measurement of unsaturated soils with null-type axis-translation technique. Geotechnical Testing Journal. 35(1).
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal, 44(5): 892-898.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., Clifton, A. W., 1996a. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotechnical Journal, 33 (3): 379-392.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., and Pufahl, D. E., 1996b. The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till, Geotechnical Testing Journal, ASTM , Vol. 19 No. 2, pp. 259–268.
- Vanapalli, S. K., Fredlund D. G., Pufahl D. E., 1999. Influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. Geotechnique. 49(2), 143–159.
- Vanapalli, S. K., Salinas, L. M., Avila, D., Karube, D. 2002. Suction and storage characteristics of unsaturated soils. In Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, Vol. 3.

- Vanapalli, S. K., Nicotera M. V., Sharma R. S. 2008. Axis Translation and Negative Water Column Techniques for Suction Control. *Geotechnical and Geological Engineering*. 26(6), 645-660.
- Van, Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.
- Wang, X., Benson, C., 2004. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve. *Geotechnical Testing Journal*, 27(2): 163-172.
- Wang, M., Liu, Q., Zhang, L., Li, Yafeng., Xu, X., 2021. Experimental investigation on strength behavior and microstructure of unsaturated net-like red soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 2722, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09117-5>.
- Yang, S. R., Lin, H. D., Kung, J. H. S., Liao, J. Y., 2008. Shear wave velocity and suction of unsaturated soil using bender element and filter paper method. *Journal of GeoEngineering*, Vol. 3, No. 2.
- Ye, W., Zhang, Y., Chen, B., Zhou, X., Xie, Q., 2010. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2 (2): 155–161.
- Wu, D., Wang, Y., Qiu, Y., Zhang, J., Wan, Y. 2019. Determination of Mohr–Coulomb Parameters from Nonlinear Strength Criteria for 3D Slopes. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2019, Article ID 6927654, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/6927654>.
- Yusof, M. F., Setapa, A. S., Tajudin, S. A. A., Madun, A., Abidin, M. H. Z., Marto, A., 2015. The Soil-Water Characteristic Curve of Unsaturated Tropical Residual Soil. *Soft Soil Engineering International Conference 2015 (SEIC2015)*, 136, doi:10.1088/1757-899X/136/1/012013
- Zapata, C.E., 1999. Uncertainty in Soil Water Characteristic Curve and Impacts on Unsaturated Shear Strength Predictions, Ph.D. Thesis, Arizona State University.
- Zhai, Q., Rahardjo, H., 2013. Quantification of uncertainties in soil–water characteristic curve associated with fitting parameters. *Engineering Geology* 163, 144-152.
- Zhao, H. F., Zhang, I. M., 2014. Effect of coarse content on shear behavior of unsaturated coarse granular soils. *Can. Geotech. J.* 51: 1371–1383.
- Zheng, X. C., Zhao, F., Sun, S. Z., 2013. Study on the tests of soil-water characteristic curves of unsaturated soil. In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 353: 16-19.
- Zhou, W. H., ve Xu, X., 2015. Shear strength of unsaturated completely decomposed granite soil under different stress state conditions. *Japanese Geotechnical Society Special Publication. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Pp. 230-235.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Kurban ÖNTÜRK

### ÖĞRENİM DURUMU

<b>Derece</b>	<b>Eğitim Birimi</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Doktora	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği / Geoteknik	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Yapı Eğitimi Bölümü	2011
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Teknoloji Fakültesi / İnşaat Mühendisliği	2016
Lise	İzmir Çınarlı Anadolu Teknik Lisesi	2003

### İŞ DENEYİMİ

<b>Yıl</b>	<b>Yer</b>	<b>Görev</b>
2018-Halen	Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2012-2018	Sakarya Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

### YABANCI DİL

İngilizce

**ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)**

- 1- 1. “Çelik Cürufunun Zemin İyileştirmeye Etkileri” Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı, *Araştırmacı*, Proje no: 2013-05-08-009, Adapazarı, 2013
- 2- Öntürk K., “Zemin iyileştirmesinde polisaj, kireç ve uçucu külün kullanımı”, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı, Yüksek Lisans Tez Projesi, Proje No: 2011-50-01-042, 2011 Sakarya Üniversitesi, Sakarya(Araştırmacı)
- 3- K. Öntürk, S. Firat, I. Vural and J. M. Khatib, “Uçucu kül ve mermer tozu kullanılarak yol altyapısının iyileştirilmesi”, Application off efficient & renewable energy technologies in low cost buildings and constuction, Gazi Üniversitesi, Ankara / 16–18 Eylül 2013
- 4- K.Öntürk ve İ. Vural, “Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması”, II. International symposium on innovative technologies in engineering and science, Karabük Üniversitesi, Karabük / Mayıs 2014
- 5- E. Bol, K.Öntürk ve M. Özsağır “Katı Atıkların Kontrolü ve Çevresel Etkileri”, dnd International Symposium on Enviroment and Morality”,Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman / Ekim 2014
- 6- K.Öntürk ve E. Bol, A. Özocak, M. Özsağır, “Doygun Olmayan İnce Daneli Zeminlerin Kayma Direnci”, 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Valencia Politeknik Üniversitesi, İspanya / Haziran 2015
- 7- M. Özsağır ve E. Bol, S. Sert ve K.Öntürk, “İnce Daneli Zeminlerin Dinamik Özellikleri”, 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Valencia Politeknik Üniversitesi, İspanya / Haziran 2015
- 8- K.Öntürk, İ.Vural, “Zemin Taşıma Gücünün Tekil Temel ve Grup Kazık Temel ile İyileştirilmesi (Adapazarı Örneği)”, 1st International Conference on Engeneering Technology and Applied Science, Afyon Kocatepe University, Türkiye / Nisan 2016
- 9- Onturk, K., Firat, S., Yilmaz, G., Khatib, J., 2021. Waste utilization to enhance performance of road subbase fill, Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 20 No. 2, pp. 455-474. <https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2021-0080>.



- 10-** Onturk, K., Bol, E., Ozocak, A., Edil, T. B., 2020, Effect of grain size on the shear strength of unsaturated silty soils, *Geomechanics and Engineering*, Vol. 23, No. 4, 301-311, DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2020.23.4.301>

## **HOBİLER**

Futbol oynamak ve izlemek, Kitap okumak, Sinemeye gitmek.