



**SIKIŞTIRILMIŞ ARA ZEMİNLERİN DRENAJLI VE DRENAJSIZ
KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ**

Muhammed İrşad ÖZKAYNAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2017

Muhammed İrşad ÖZKAYNAK tarafından hazırlanan “SİKİŞTİRİLMİŞ ARA ZEMİNLERİN DRENAJLI VE DRENAJSIZ KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Yüksel YILMAZ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Tekin GÜLTOP

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Onur PEKCAN

İnşaat Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 29 / 03 / 2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed İrşad ÖZKAYNAK

29 / 03 / 2017

SIKIŞTIRILMIŞ ARA ZEMİNLERİN DRENAJLI VE DRENAJSIZ
KAYMA DAYANIMI PARAMETRELERİNİN İLİŞKİLENDİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed İrşad ÖZKAYNAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2017

ÖZET

Bu tez çalışmasında, birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre CH sınıfı olan zemin numunesi kullanılmış ve zeminin laboratuvar deneylerinden elde edilen mukavemet parametrelerinin ilişkilendirilebilirliği araştırılmıştır. Standart Proctor ve modifiye Proctor enerji düzeylerinde sıkıştırılan numunenin laboratuvar kompaksiyon eğrileri dikkate alınarak her bir eğri üzerinden optimum su muhtevasında, optimum su muhtevasının ıslak ve kuru tarafında olmak üzere 3'er adet numune belirlenmiş; çalışma aynı zeminden elde edilen farklı su içeriklerinde ve değişik kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanan 6 ayrı numune üzerinden yürütülmüştür. Zeminin kayma dayanımı parametreleri olan kohezyon ve içsel sürtünme açıları, serbest basınç ve üç eksenli basınç (UU, CD, aşamalı CD) deneyleri yapılarak elde edilmiştir. Bu parametreler, hem numunelerin optimum su muhtevasında ya da optimum su muhtevasının kuru veya ıslak tarafında yer almasına hem de uygulanan sıkıştırma enerjisine ve deney tipinin drenaj durumuna bağlı olarak farklılık arz etmektedir. Bu sebeple numuneler arası sıkıştırma enerji düzeyi farklılıkları, su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları değişimlerinin de mukavemet parametrelerine olan etkisi irdelenmiş olup drenajlı ve drenajsız durum ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Bilim Kodu : 91105

Anahtar Kelimeler : Kil, kompaksiyon, Proctor, drenajlı dayanım, drenajsız dayanım

Sayfa Adedi : 128

Danışman : Doç. Dr. Yüksel YILMAZ

INVESTIGATING THE CORRELATION BETWEEN THE DRAINED AND
UNDRAINED SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF COMPACTED SOILS

(M. Sc. Thesis)

Muhammed İrşad ÖZKAYNAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2017

ABSTRACT

In this study, a soil sample with CH class according to the unified soil classification system was used and the correlation between strength parameters obtained from the laboratory tests of the soil was investigated. Three specimens were determined on the wet and dry sides of the optimum water content, with optimum water content on each curve, taking into account the laboratory compaction curves of the sample compacted at standard Proctor and modified Proctor energy levels and the study was carried out on 6 different samples prepared in different water contents and different dry unit weights obtained from the same soil. The cohesion and internal friction angles, which are the shear strength parameters of the soil, were obtained by performing unconfined compression and triaxial compression (UU, CD, multistage CD) tests. These parameters differ not only depending on the optimum water content of the samples or on the dry or wet side of the optimum water content, but also on the compaction energy applied and on the drainage condition of the test type. For this reason, the effects of compaction energy level differences, water content and dry unit weights changes on strength parameters were examined and the condition with and without drainage was discussed in detail.

Science Code : 91105

Key Words : Clay, compaction, Proctor, drained strength, undrained strength

Page Number : 128

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yüksel YILMAZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Yüksel YILMAZ'a,

KGM-ARGE / 2013-21 numaralı araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmesine karar verilen laboratuvar çalışmalarının, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı Zemin Mekaniği ve Tüneller Şubesi Müdürlüğüne bağlı Zemin Mekaniği Laboratuvarında eksiksiz bir şekilde yürütülmesine imkan sağlayan şube müdürü Sina KİZİROĞLU'na, laboratuvar şefi Mehmet Ali ALKAN'a ve daire başkanlığının tüm personeline,

Varlıklarıyla her daim soluk almama sebep olan ve bu süreçte de desteklerini esirgemeyen canım ailemin güzel yürekli insanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Kil Mineralleri ve Zemin Yapısı	3
2.2. Kompaksiyon ve Sıkıştırılmış Killer.....	4
2.3. Coulomb Yenilme Kriteri	8
2.4. Dayanım ve Killerin Kesme Dayanımı	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	17
3.1. Çalışmada Kullanılan Zeminin Temel Fiziksel Özellikleri	17
3.2. Zeminin Laboratuvar Kompaksiyon Karakteristikleri.....	18
3.3. Dayanım Deney Numunelerinin Hazırlanması	19
3.4. Serbest Basınç ve Üç Eksenli Basınç Deney Düzeneği.....	24
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	29
4.1. Serbest Basınç Deneyleri	29
4.1.1. Enerji düzeyindeki değişimlere bağlı olarak numunelerin mukavemet parametrelerinin değişimi	32

	Sayfa
4.2. Üç Eksenli Basınç Deneyleri	40
4.2.1. Konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) tip deneyler	40
4.2.2. Konsolidasyonlu – drenajlı (CD) tip deneyler	47
4.2.3. Aşamalı konsolidasyonlu – drenajlı (aşamalı CD) tip deneyler.....	53
4.3. Dayanım Deneyleri Mukavemet Parametrelerinin Birbirleriyle İlişkilendirilmesi	59
4.3.1. Serbest basınç deneyi (UC) – üç eksenli basınç deneyi (UU)	59
4.3.2. Üç eksenli basınç deneyi (UU) – üç eksenli basınç deneyi (CD)	59
4.3.3. Üç eksenli basınç deneyi (geleneksel CD) – üç eksenli basınç deneyi (aşamalı CD)	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73
EKLER	76
EK-1. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	77
EK-2. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	78
EK-3. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	79
EK-4. SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deney sonu fotoğrafları (D, E ve F numuneleri)	80
EK-5. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	81
EK-6. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	82

EK-7. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	83
EK-8. MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deney sonu fotoğrafları (A, B ve C numuneleri)	84
EK-9. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış ilave numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	85
EK-10. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış ilave numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	86
EK-11. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılmış ilave birinci numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	87
EK-12. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılmış ilave ikinci numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	88
EK-13. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılmış ilave üçüncü numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	89
EK-14. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	90
EK-15. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	91
EK-16. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	92
EK-17. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	93
EK-18. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	94

EK-19. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	95
EK-20. SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deney sonu fotoğrafları (D, E ve F numuneleri)	96
EK-21. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	97
EK-22. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	98
EK-23. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	99
EK-24. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	100
EK-25. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	101
EK-26. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	102
EK-27. MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deney sonu fotoğrafları (A, B ve C numuneleri).....	103
EK-28. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	104
EK-29. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	105
EK-30. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	106
EK-31. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	107

Sayfa

EK-32. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	108
EK-33. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	109
EK-34. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	110
EK-35. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	111
EK-36. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	112
EK-37. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	113
EK-38. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	114
EK-39. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	115
EK-40. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	116
EK-41. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	117
EK-42. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği	118
EK-43. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	119
EK-44. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı	120

Sayfa

EK-45. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.....	121
EK-46. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	122
EK-47. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	123
EK-48. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme grafiği.....	124
EK-49. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.....	125
EK-50. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.....	126
EK-51. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı.....	127
ÖZGEÇMİŞ.....	128

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Üç eksenli basınç deney tipleri	14
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri	18
Çizelge 3.2. Serbest basınç deneyi için malzeme oranları.....	21
Çizelge 3.3. Üç eksenli basınç deneyi için malzeme oranları.....	21
Çizelge 4.1. MPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için UC deneyi (doyurmadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanımları	37
Çizelge 4.2. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılan numuneler için UC deneyi (doyurmadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanımları	38
Çizelge 4.3. SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için UC deneyi (doyurmadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanımları	38

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Maksimum kuru birim hacim ağırlık, (b) Optimum su içeriği ile logaritmik sıkıştırma enerjisi arasındaki ilişki.....	7
Şekil 2.2. Zeminde kesme gerilmesi – kesme birim deformasyonu eğrileri ve yenilmenin tanımları	10
Şekil 2.3. Efektif gerilmenin fonksiyonu olarak kesme dayanımı.....	11
Şekil 2.4. Serbest basınç deneyinde yenilme durumunda Mohr dairesi	12
Şekil 2.5. Üç eksenli düzeneğin şematik görünümü	13
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan zeminin standart Proctor ve modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri	19
Şekil 3.2. Modifiye Proctor eğrisi üzerinden seçilen noktalar (A, B ve C numuneleri).	20
Şekil 3.3. Standart Proctor eğrisi üzerinden seçilen noktalar (D, E ve F numuneleri) ...	20
Şekil 4.1. Sıkıştırılmış numunelerin UC deneyi (doyurmadan) deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukları.....	30
Şekil 4.2. Sıkıştırılmış numunelerin UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri	31
Şekil 4.3. Sıkıştırılmış numunelerin UC deneyi (doyurmadan) pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	32
Şekil 4.4. Sıkıştırılmış numunelerde UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının deney sonu su içeriği ile değişimi.....	33
Şekil 4.5. Sıkıştırılmış numunelerde UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının kuru birim hacim yoğunlukla değişimi	34
Şekil 4.6. Sıkıştırılmış ilave numunelerle birlikte tüm numunelerin UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının deney sonu su içeriği ile değişimi.....	35
Şekil 4.7. Sıkıştırılmış ilave numunelerle birlikte tüm numunelerin UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının kuru birim hacim yoğunlukla değişimi.....	36
Şekil 4.8. Sıkıştırılmış numunelerde UC deneyi (doyurmadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanım değerlerinin birbirine göre durumu	39

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doyurmadan) deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukları.....	41
Şekil 4.10. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doyurmadan) görünür kohezyon dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri	42
Şekil 4.11. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doyurmadan) içsel sürtünme açılarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri	43
Şekil 4.12. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doyurmadan) pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	44
Şekil 4.13. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doyurmadan) görünür kohezyon dayanımının deney sonu su içeriği ile değişimi	45
Şekil 4.14. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doyurmadan) görünür kohezyon dayanımının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi	45
Şekil 4.15. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doyurmadan) içsel sürtünme açısının deney sonu su içeriği ile değişimi	46
Şekil 4.16. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doyurmadan) içsel sürtünme açısının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi	46
Şekil 4.17. Sıkıştırılmış numunelerin CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	48
Şekil 4.18. Sıkıştırılmış numunelerin CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açılarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri	49
Şekil 4.19. Sıkıştırılmış numunelerin CD deneyi (doyurarak) pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	50
Şekil 4.20. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının su içeriği ile değişimi	51
Şekil 4.21. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi	51
Şekil 4.22. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının su içeriği ile değişimi.....	52
Şekil 4.23. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.24. Sıkıştırılmış numunelerin aşamalı CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	54
Şekil 4.25. Sıkıştırılmış numunelerin aşamalı CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açılarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	55
Şekil 4.26. Sıkıştırılmış numunelerin aşamalı CD deneyi (doyurarak) pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri.....	56
Şekil 4.27. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının su içeriği ile değişimi	57
Şekil 4.28. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi	57
Şekil 4.29. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının su içeriği ile değişimi	58
Şekil 4.30. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi	58
Şekil 4.31. Sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) ve UU (doyurmadan) deneylerinden elde edilen görünür kohezyon dayanımlarının değişimi	59
Şekil 4.32. Sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen görünür kohezyon dayanımlarının değişimi	60
Şekil 4.33. Sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açılarının değişimi	60
Şekil 4.34. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları.....	61
Şekil 4.35. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları.....	62
Şekil 4.36. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları.....	62
Şekil 4.37. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 4.38. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları.....	63
Şekil 4.39. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları.....	64
Şekil 4.40. Sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen görünür efektif kohezyon dayanımlarının değişimi.....	65
Şekil 4.41. Sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen efektif içsel sürtünme açılarının değişimi.....	65
Şekil 4.42. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları	66
Şekil 4.43. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları	67
Şekil 4.44. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları	67
Şekil 4.45. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları	68
Şekil 4.46. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları	68
Şekil 4.47. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları	69

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Sıkıştırma kalıbı ana gövde ve numune ringi.....	22
Resim 3.2. Sıkıştırma kalıbı üst başlık	23
Resim 3.3. Tabaka tokmakları ve sıkıştırma kalıbı	23
Resim 3.4. Her bir tabakaya girecek yaş numunenin tartımı, sıkıştırılmış birinci tabakanın görünümü ve sıkıştırılmış numunenin ringden çıkarılması	23
Resim 3.5. Bilgisayar kontrollü üç eksenli basınç deney düzeneğinin genel görünümü...	25
Resim 3.6. Sıkıştırılmış bir numunenin üç eksenli deney düzeneğine yerleştirilme adımları	27
Resim 3.7. Serbest basınç deney düzeneği ve deneye tabi tutulan bir zemin numunesi ...	28

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

c	Görünür kohezyon dayanımı (kPa)
c'	Görünür efektif kohezyon dayanımı (kPa)
ϕ	İçsel sürtünme açısı (°)
ϕ'	Efektif içsel sürtünme açısı (°)
ε	Eksenel birim şekil değiştirme (%)
ε_{pik}	Pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirme (%)
ε_{nihai}	Nihai dayanımda eksenel birim şekil değiştirme (%)
q_u	Serbest basınç dayanımı (kPa)
w	Su içeriği (%)
w_{opt}	Optimum su içeriği (%)
γ_d	Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)
γ_{dmaks}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)
ρ_d	Kuru birim hacim yoğunluk (g/cm ³)

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standards
CD	Consolidated – Drained
CH	Yüksek plastisiteli kil
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
MPE	Modifiye Proctor Enerjisi
SPE	Standart Proctor Enerjisi
UC	Unconfined Compressive
USCS	Unified Soil Classification System
UU	Unconsolidated - Undrained

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinin, zeminlerin özellikleri ve mühendislik mekaniğiyle ilgilenen dalı zemin mekaniğidir. Şöyle ki bu bilim dalı inşaat mühendisliği uygulamalarına ait temel ilkeleri zemine tatbik etmekte ve bugüne kadar alışlagelmiş olan diğer yapı malzemelerinin bir alternatifi olmaktadır. Öte yandan zemin, mühendislik özellikleri tanımlanması gereken ve üzerine başka mühendislik yapılarının da inşa edilebileceği bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981: 1).

Zeminin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde laboratuvar ve arazi deneyleri önem arz etmektedir. Şöyle ki zemine ait dayanım parametrelerinin yani içsel sürtünme açısı ile kohezyon değerlerinin elde edilmesiyle pek çok geoteknik tasarımda kullanılacak ve birçok geoteknik problemin çözümüne ışık tutacak önemli mühendislik özelliklerine sahip olunacaktır.

Dayanım parametrelerinin tayini için pek çok deney yöntemi olmasına rağmen kil numuneler üzerinde yaygın olarak kullanılan laboratuvar deneyi üç eksenli basınç düzeneği kullanılarak yapılanlardır. Birbirinden farklı tiplerde gerçekleştirilebilen bu deneyde süre sebebiyle tercih edilen metot ise drenajsız kayma dayanımı parametrelerinin elde edilebildiği konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) yöntemidir. Öte yandan drenajlı kayma dayanımı parametrelerinin elde edilebileceği tip olan konsolidasyonlu – drenajlı (CD) yöntem ise hem kesme süresinin uzun olması hem de oldukça karmaşık bir deney süreci içermesinden ötürü tercih edilmemektedir. Bu sebeple drenajsız ve drenajlı kayma dayanımı parametreleri arasında anlamlı ilişkiler kurulabilmesi oldukça mühimdir.

Diğer taraftan her bir çevre basıncı için ayrı numuneler üzerinden yürütülerek tamamlanması gereken geleneksel konsolidasyonlu – drenajlı (CD) tip deney yerine bütün çevre basınçlarının tek bir numune üzerinden yapılmasına imkan sağlayan aşamalı konsolidasyonlu – drenajlı (CD) tip deneylerin ilişkilendirilebilirliği de sonuçların daha kısa sürede elde edilebilmesi açısından önemlidir.

Bu amaç doğrultusunda deneylerde kullanılacak zemin için standart ve modifiye enerji uygulanarak laboratuvar kompaksiyon karakteristikleri elde edilmiştir. Her bir

kompaksiyon eğrisi üzerinden; birisi optimum su muhtevasında, diğer ikisi de kuru birim hacim ağırlıkları eşit olup optimum su muhtevasının kuru ve ıslak tarafında yer alan üç nokta belirlenmiştir. Böylece CH sınıfı örselenmiş kil zeminden, kompaksiyon karakteristikleri (su muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıkları) belirlenen 6 farklı numune elde edilmiş ve çalışmalar bu numuneler üzerinden yürütülmüştür.

Yukarıda tanımlanan 6 farklı numunenin her biri için serbest basınç deneyinin yanı sıra üç eksenli basınç deneylerinden UU, geleneksel CD ve aşamalı CD tip deneyleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen kayma dayanımı parametrelerinin değişimi incelenmiş ve bulgular detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

Bu çerçevede hazırlanan yüksek lisans tezi 5 bölümden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde kısaca tezin amacı ve kapsamına değinilmiştir. İkinci bölümde zemin gerilmeleri ve dayanım parametrelerinin tayinine yönelik ana hatlarıyla genel açıklamalar yapılmıştır. Üçüncü bölümde ise üç eksenli basınç deneyi ve gerçekleştirilen diğer deneyler için deney metodu ile kullanılan cihaz ve ekipmanlar hakkında detaylı bilgi verilmiş öte yandan kullanılan numunelerin tanıtılması ve deneylere hazırlık aşaması da irdelenmiştir. Dördüncü bölümde elde edilen deneysel veriler ve bu verilerin birbirleriyle ilişkileri farklı başlıklar altında ayrı ayrı değerlendirilmiş olup sonuç ve öneriler kısmında çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmıştır.

2. KONU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde sırasıyla kil mineralleri ve zemin yapısı, kompaksiyon ve sıkıştırılmış killeri, Coulomb yenilme kriteri, son olarak dayanım ve killerin kesme dayanımı konuları ana hatlarıyla ele alınmıştır.

2.1. Kil Mineralleri ve Zemin Yapısı

Killi zeminler ince taneli, kohezyonu ve plastisitesi olan çoğunluğunu kil minerallerinin oluşturduğu zeminlerdir. Ancak tüm ince taneli zeminler kohezyonlu, plastik veya kil değildirler. Hem granüle hem de ince taneli olan siltler bu durumun bir istisnasıdır (Holtz ve Kovacs, 1981: 67).

Tane boyu dağılımı ve şekli gibi karakteristik özellikler granüle zeminlerin mühendislik davranışı üzerinde etkili olurken suyun varlığı özel durumlar hariç göz ardı edilebilmektedir. İnce taneli zeminlerde ise su malzemenin mühendislik davranışlarını önemli ölçüde değiştirirken tane boyu daha pasif duruma geçmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981: 67).

Suyun kil yüzeyine çekilmesi kil yüzeyine yakın kesimde çok kuvvetli, yüzeyden uzaklaştıkça giderek azalmaktadır. Tam yüzeyde su molekülleri çok sıkıca tutulur ve kuvvetlice yönlendirilir. Kil yüzeyine yakın suyun termodinamik ve elektrik özellikleri “serbest suyunkinden” daha farklıdır (Mitchell, 1976).

Killerin küçük tanecik boyutu, levhamsı dokusu nedeniyle spesifik yüzeyi (yüzey alanının kütleye oranı) diğer zeminlere göre çok büyüktür. Su ve kil mineralleri arasındaki ilişkiyi açıklamak her ne kadar zor olsa da su muhtevastaki değişimler direkt olarak mühendislik özelliklerini etkilemektedir. Şöyle ki su içeriğinin %10’dan %50’ye çıkması durumunda kilin kesme dayanımı azalacaktır (Coduto, 1999: 126, 127).

2.2. Kompaksiyon ve Sıkıştırılmış Killer

1930'lu yıllarda Los Angeles'lı bir mühendis olan R. R. Proctor o zamandan beri hemen hemen evrensel bir standart olan sıkıştırılmış dolguların değerlendirme yöntemini geliştirmiştir (Proctor, 1933). Deney, laboratuvarında zemini sıkıştırarak maksimum kuru birim hacim ağırlığını tespit etmek için yapılmaktadır (Coduto, 1999: 178). Kuru yoğunluk, su içeriği, sıkıştırma enerjisi ve zemin türü sıkışmanın bağlı olduğu etmenler olarak Proctor tarafından ortaya konulmuştur (Holtz ve Kovacs, 1981: 97).

Sıkıştırma yöntemi ve enerjisi, sıkıştırma sırasındaki su içeriği ve zemin türü gibi faktörler sıkıştırılmış kohezyonlu zeminlerin mühendislik özelliklerini belirlemektedir. Zeminler sıkıştırılmadan önce numunenin hedef su içeriği, standart veya modifiye enerji düzeylerinde elde edilen kompaksiyon eğrilerinden biri esas alınarak tespit edilmektedir. Numunenin mevcut su içeriğine ve dikkate alınan kompaksiyon eğrisine bakılarak zeminin optimum su içeriğinde veya optimum su içeriğinin yakınında ya da optimum su içeriğinin kuru veya ıslak tarafında olduğu tanımlanmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981: 102).

Doygun olmayan sıkıştırılmış zeminlerin kayma dayanımına ilişkin yapılmış önceki çalışmalar (Diamond, 1970; Brackley, 1973, 1975; Zein, 1985; Delage, Audiger, Cui ve Howat 1996; Kong ve Tan, 2000; Toll, 2000) optimum su içeriğinden daha kuru bir şekilde sıkıştırılmış malzemelerde kümelenmiş bir yapının gelişmiş olduğunu göstermektedir. Bu tür bir kümelenmenin, optimum su içeriğinin ıslak tarafında sıkıştırılmış malzemelerde bulunmadığı görülmüştür.

Sıkıştırılmış killer üzerinde yapılan araştırmalar bu zeminlerin optimumdan kuru su muhtevasında sıkıştırıldıklarında zemin yapısının kompaksiyon yönteminden bağımsız olduğunu göstermiştir (Seed ve Chan, 1959).

Vanapalli, Fredlund ve Pufahi (1996), statik olarak sıkıştırılmış buzul tili numunelerinin kayma dayanımını, modifiye edilmiş bir direkt kesme cihazı kullanarak ölçmüştür. Numuneler, üç farklı su içeriği ve birim hacim ağırlığında (optimumdan daha kuru, optimumda ve optimum koşullardan daha ıslak şeklinde) hazırlanmıştır. Numunelere çeşitli net normal gerilmeler ve matrik emmeler uygulanmıştır. Zemin - su karakteristik eğrileri, numuneler üzerinde bir basınç plakası aparatı kullanılarak elde edilmiştir.

Vanapalli'ye (1996) göre, değişik başlangıç su içerikleri ve birim hacim ağırlıklarında sıkıştırılan zeminlerin; mineralojisi, plastisitesi ve yapısı aynı olmasına rağmen zemin mekaniği davranışı açısından farklı zeminler olarak görülmelidir. Farklı örnekler arasındaki mühendislik davranışı değişikliği, zemin yapısına ve kümelenmeye göre değişmektedir.

Lambe ve Whitman'a göre (1979) belirlenmiş bir sıkıştırıcı güç ve kuru birim hacim ağırlık için zemin, ıslak kısımdaki sıkışmaya kıyasla kuru kısımda daha çökeltilmiş olmaya meyillidir (başka bir ifadeyle, ıslak kısımda toprak daha dağıtıcıdır). Genel olarak bir çökeltilmiş zemin, aynı boşluk oranında fakat dağılmış halde olan benzer zemin elemanından daha fazla mukavemete sahiptir.

Brackley (1973, 1975) kil taneciklerinin 'paketler' halinde içinde gruplandığı doygun olmayan bir kil yapısı modeli önermiştir. Kümelenme veya 'paketler' içerisindeki zemin, emme yoluyla birlikte tutulur ve paketler ayrı tanecikler olarak hareket eder. Daha büyük efektif tanecik boyutu daha fazla sürtünme davranışı ve dolayısıyla daha yüksek bir içsel sürtünme açısı üretir.

Toll'a (2000) göre zemin yapısı sıkıştırılmış zeminlerin mühendislik davranışlarını belirleme konusunda önemli bir rol oynar. Optimum su içeriğinden daha kuru bir şekilde sıkıştırılmış killi malzemeler, kümelenmiş veya 'paket' yapı üretir.

Fredlund ve Rahardjo (1993), kayma dayanımını (konsolidasyonlu-drenajlı deneyler) ölçmek için modifiye edilmiş bir direkt kesme cihazı kullanmış ve matrik emme basınç plakası deneyleriyle ölçülmüştür. Fredlund ve Rahardjo'ya (1993) göre emme, doygun olmayan sıkıştırılmış numunelerin kayma dayanımını etkilemektedir.

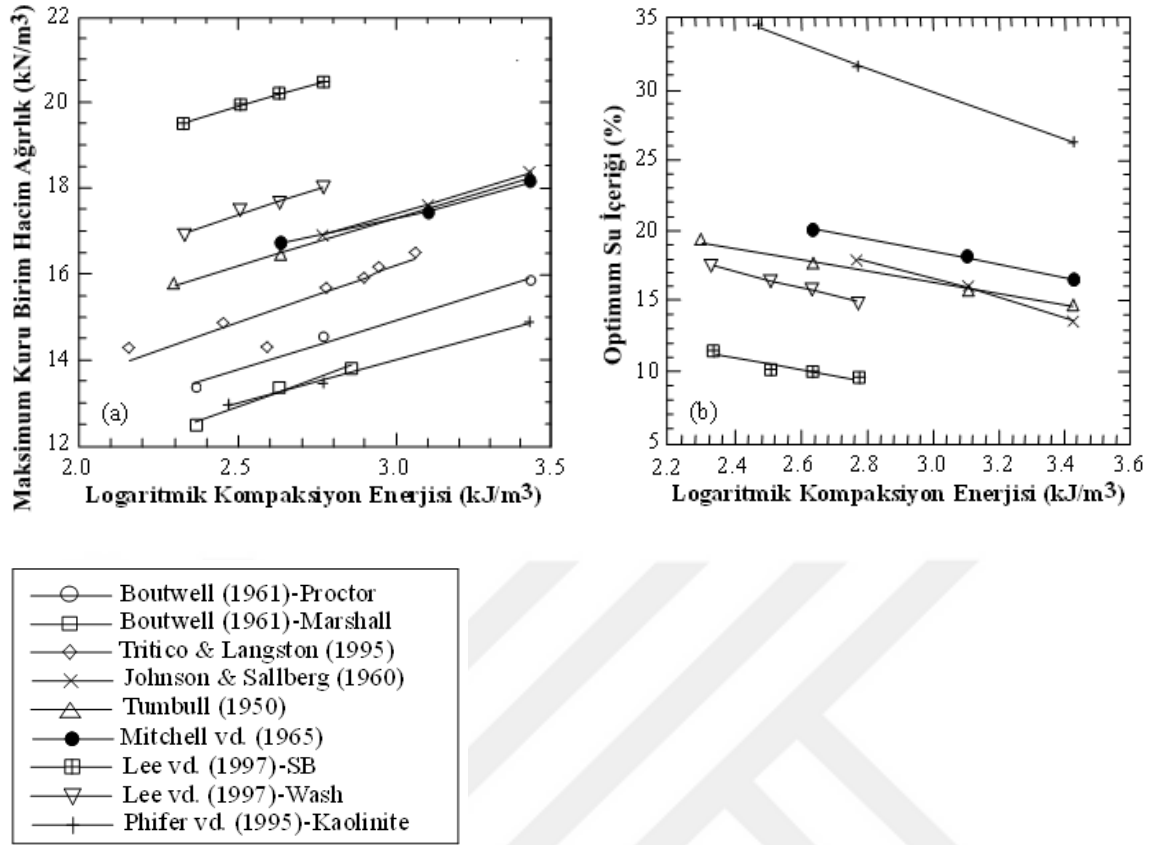
Zemin kompaksiyonunu modelleme girişimleri 1940'lı yıllardan beri yapılagelmektedir. Modelleme girişimlerinin çoğu zeminin tanımlayıcı özellikleri olan kompaksiyon karakteristiklerini (optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık) tahmin etmeye yönelik eşitlikler içermektedir (Davidson ve Gardiner, 1949).

Ramiah vd. (1970) hem optimum su içeriğini hem de maksimum kuru birim hacim ağırlığı yalnızca likit limite korele ederken Jeng ve Strohm (1976) ise standart Proctor enerjisi,

optimum su içeriği ve maksimum kuru biri hacim ağırlıklarını 85 adet zeminin indeks özellikleriyle ilişkilendirmiştir.

Joslin (1959) tarafından yapılan ilk çalışma, zemin yapılarında birbirleriyle yaklaşık benzerlik gösteren çok sayıda kompaksiyon eğrisinden elde edilmiş Ohio eğrileri olarak adlandırılan 26 özgün standart Proctor eğrisidir. Bu eğriler, verilen zeminin su içeriği ve birim hacim ağırlığını kullanarak yaklaşık bir kompaksiyon eğrisi tanımlamak için hızlı bir yöntem sunmaktadır.

Likit limit ve bir kompaksiyon eğrisi veya yalnızca likit limit kullanılarak her bir sıkıştırma enerjisinde, kil zeminlerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğini tahmin etmek için tanımlanmış basit deneysel bir yöntem bulunmaktadır. Bu yöntem maksimum kuru birim hacim ağırlık ile logaritmik sıkıştırma enerjisi ve optimum su içeriği ile logaritmik sıkıştırma enerjisi arasındaki lineer ilişki üzerine temellendirilmiştir. Ayrıca bu lineer ilişki ile likit limit arasında iyi bir korelasyon yapılabilmektedir. Blotz, Benson ve Boutwell (1998) ise bu yöntemi geliştirmek için 22 adet kil zemine ait verileri analiz etmiş ve ilave 5 zemin kullanarak metodun geçerliliğini irdelemiştir. Geliştirilen yöntemin likit limit ile bir kompaksiyon eğrisini kullandığı varyasyon, optimum su içeriğinde $\pm \%1$ maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ise $\pm \%2$ hata ile daha hassas bir sonuç verirken yalnızca likit limit kullanılarak yapılan tahminler kaba bir yaklaşım sergilemektedir. Bunlara ilaveten likit limiti 17 ile 70 arasında olan kil zeminler için bu yeni yöntemin kullanımı tavsiye edilmektedir.



Şekil 2.1. (a) Maksimum kuru birim hacim ağırlık, (b) Optimum su içeriği ile logaritmik sıkıştırma enerjisi arasındaki ilişki (Blotz vd., 1998'den düzenlenmiştir.)

Eğer likit limit ve basit bir kompaksiyon eğrisi biliniyorsa herhangi bir sıkıştırma enerjisi için maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilmektedir.

$$\gamma_{maks,E} = \gamma_{maks,k} + (2,27 LL - 0,94) \log \frac{E}{E_k} \quad (2.1)$$

$$w_{opt,E} = w_{opt,k} + (12,39 - 12,21 LL) \log \frac{E}{E_k} \quad (2.2)$$

E_k = Kullanılan kompaksiyon eğrisi için sıkıştırma enerjisi

$\gamma_{maks,k}$ = Kullanılan kompaksiyon eğrisinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık

$w_{opt,k}$ = Kullanılan kompaksiyon eğrisinden elde edilen optimum su içeriği

E = Tahmin edilecek parametreler için belirlenen sıkıştırma enerjisi

$\gamma_{maks,E}$ = Tahmin edilecek maksimum kuru birim hacim ağırlık

$w_{opt,E}$ = Tahmin edilecek optimum su içeriği

LL = Likit limit

Alternatif olarak tahmin edilecek parametreler için sadece likit limit kullanıldığında ise:

$$\gamma_{dmax,E} = (2,27 \log LL - 0,94) \log E - 0,16 LL + 17,02 \quad (2.3)$$

$$w_{opt,E} = (12,39 - 12,21 \log LL) \log E + 0,67 LL + 9,21 \quad (2.4)$$

eşitlikleri önerilmektedir.

İnce taneli zeminlerin arazi sıkışması genellikle sıkıştırma enerjisindeki çeşitlilikle birlikte farklı ekipmanlar içermektedir. Şöyle ki değişik enerji seviyelerinde kompaksiyon karakteristiklerinin (maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği) elde edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı enerji seviyelerinde ince taneli zeminlerin kompaksiyon davranışları ve karakteristiklerinin bilinmesi pratik bakış açısı bakımından büyük öneme sahiptir. Gurtug ve Sridharan (2004) çalışmalarında sıkıştırma enerjisinin, ince taneli zeminlerin davranışları ve kompaksiyon karakteristikleri üzerindeki etkisini irdelemişlerdir. Çalışılan tüm sıkıştırma enerjileri için plastik limit ile optimum su içeriğinin ve plastik limitteki kuru birim hacim ağırlıkla da maksimum kuru birim hacim ağırlıkların korele edilebilirliği görülmektedir.

Pandian vd. (1997) ve Nagaraj vd. (2006), likit limit ve özgül ağırlığa bağlı olarak ince taneli zeminlerde optimum su içeriğinin kuru ve ıslak tarafı için ayrı ayrı su içeriği ve yoğunluk ilişkilerinin tanımlanabilmesine olanak sağlayan bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmayla Joslin (1959) tarafından elde edilenlere yakın eğri setleri verilmiştir. Fakat bu model yalnızca standart Proctor enerjisiyle sıkıştırılan ince taneli zeminlere uygulanabilmektedir.

Horpibulsuk vd. (2008 ve 2009), farklı sıkıştırma enerjileri altındaki ince ve kaba taneli zeminlerin kompaksiyon eğrilerini tanımlamak için bir model önermiştir. Bu model tüm kompaksiyon eğrilerini iyi bir şekilde tahmin etmektedir. Ayrıca modifiye edilmiş diğer enerji düzeyleri için de modifiye Ohio kompaksiyon eğrilerini sunmaktadır. Bu eğriler, basit bir deneme test sonucunu kullanarak kompaksiyon eğrilerinin hızlıca belirlenebilmesi için oldukça yararlıdır.

2.3. Coulomb Yenilme Kriteri

Malzemenin güvenle taşıyabileceği gerilme, o malzemenin dayanımı olup uygulanan gerilme değerlerinin malzeme dayanımı üstüne çıktığı durumlarda ise yenilme olmaktadır

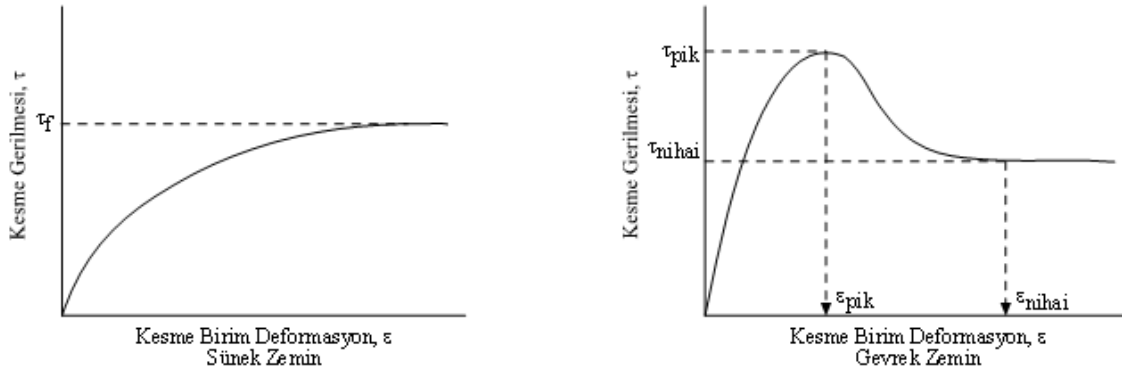
(Coduto, 1999: 465). Yükleme koşulları altındaki şev ya da temeller için de deplasmanlar, izin verilebilir limitleri aştığında yenilme ifadesi kullanılmaktadır ve bu şekliyle zemin dayanımına atıf yapılmaktadır. Sonuç olarak malzemenin taşıyabileceği nihai ya da maksimum gerilime dayanım adı verilmektedir ki zeminlerde esas olan kayma dayanımıdır. Çünkü geoteknik problemlerin çoğunun nedeni zeminin dayanım değerlerini aşan kayma gerilmeleridir (Holtz ve Kovacs, 1981: 373).

Zemin, çekme gerilmelerini çok fazla alamadığından yapı mühendisliğinin önemli analizlerinden biri olan çekme dayanımı geoteknik mühendisliğinde pek dikkate alınmamaktadır. Benzer olarak basınç yenilmeleri de yapı mühendislik hesaplarındaki kadar önem arz etmemektedir. Geoteknik tasarımlarda üzerine en çok düşünülen kısım kesme gerilmeleri ve kayma dayanımı analizleri olmaktadır (Coduto, 1999: 465).

Zeminin tanecikli yapıda olmasından dolayı zeminde kesme dayanımını kontrol eden fiziksel mekanizmalar diğer yapı malzemelerine kıyasla farklılık göstermektedir. Zeminde kesme yenilmesinin olabilmesi için taneciklerin birbirleri üzerinden kayarak ya da yuvarlanarak kayma gerilmelerini oluşturması gerekmektedir. Şöyle ki tanecikler arası etkileşim başlı başına kesme dayanımını belirlemektedir ve bu etkileşimler “sürtünme dayanımı” ve “kohezyon dayanımı” olarak adlandırılmaktadır (Coduto, 1999: 466).

Yenilmenin tanımlanma şekli de zeminler ile klasik mühendislik malzemelerine dair önemli bir farktır. Şekil 2.2’de gösterildiği üzere zeminler için kesme gerilmesi - birim deformasyon eğrileri farklılık göstermektedir. Bunlar tasarım kesme dayanımları dikkate alındığında pik gerilmeye ulaşır sabitlenen sünek eğrililer ve pik dayanıma ulaştıktan sonra artan birim deformasyon ile azalarak nihai dayanıma erişen gevrek eğrili olanlardır. Geoteknik problemin oluşumuna bakılarak hangi dayanım parametresinin kullanılacağına karar verilmektedir (Coduto, 1999: 471, 472).

Kesme gerilmesi - birim deformasyon eğrileri sünek veya biraz gevrek olan granüle zeminlerde pik ve nihai dayanım arasındaki fark küçük ve ihmal edilebilir düzeyde olmasına rağmen kil zeminlerde eğriler gevrek tiptedir ki pik ve nihai dayanım arasındaki fark çok önemlidir (Coduto, 1999: 472).



Şekil 2.2. Zeminde kesme gerilmesi - kesme birim deformasyonu eğrileri ve yenilmenin tanımları (Coduto, 1999: 472'den düzenlenmiştir.)

Hem sürtünme dayanımı hem de kohezyonlu dayanıma sahip zeminlerde bütün dayanımı ifade edebilmek için Coulomb yenilme kriteri kullanılıp bu işlem efektif gerilme analizleri veya toplam gerilme analizleri kullanarak yapılabilmektedir (Coduto, 1999: 472).

Zemini oluşturan katı, su ve hava fazları göz önüne alındığında kesme dayanımı sadece katı tanecikler tarafından sağlanmaktadır. Bu sebeple dayanım sorunlarını çözerken katı taneciklerin varlığından ileri gelen efektif gerilmenin (σ') kullanılması daha akılcı görünmektedir ki aşağıdaki eşitliklerin bu formda yazılmasının nedeni de bu esasa dayanmaktadır (Coduto, 1999: 472, 473).

$$\tau_f = \sigma_f' \tan \varphi' \quad (2.5)$$

$$\tau_f = c' + \sigma_f' \tan \varphi' \quad (2.6)$$

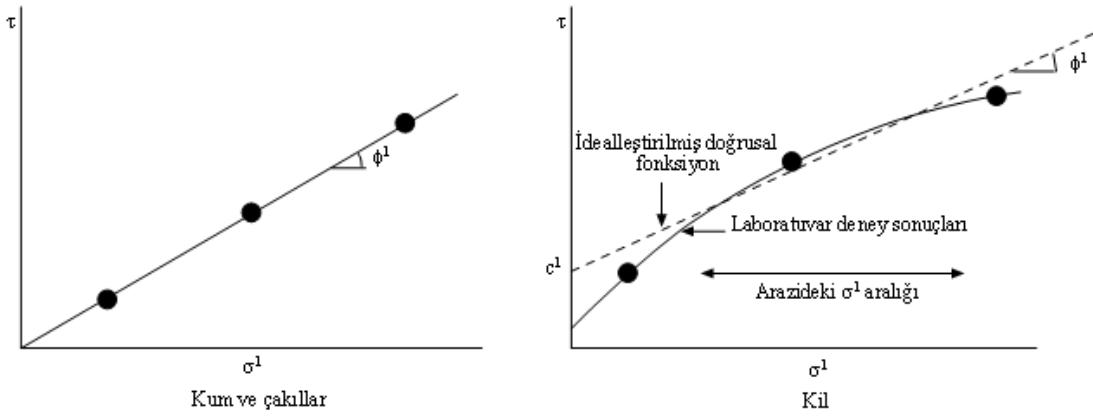
τ_f = kesme dayanımı

c' = görünür efektif kohezyon dayanımı

σ_f' = kesme düzlemi üzerine etkiyen normal efektif gerilme

φ' = efektif içsel sürtünme açısı

Farklı normal efektif gerilme değerlerinde bir dizi direkt kesme kutusu deneyi yapılırsa sonuçlar Şekil 2.3'de gösterildiği gibi olmaktadır (Coduto, 1999: 473).



Şekil 2.3. Efektif gerilmenin fonksiyonu olarak kesme dayanımı. Her bir veri noktası bir laboratuvar deney sonucunu temsil eder (Coduto, 1999: 473'den düzenlenmiştir).

Şekil 2.3'de verilen grafiklerden görülebildiği üzere granüle zeminler için elde edilen veriler yaklaşık doğrusal bir dağılım sergilerken killerde dağılım eğriseldir ve analizlerde kolaylık sağlaması açısından arazi verileri ışığında idealleştirilerek doğrusal bir fonksiyon haline getirilebilmektedir. İdeal hale getirilen bu doğrunun dikey eksen kestiği yer görünür efektif kohezyon dayanımını (c'), doğrunun eğimi ise efektif içsel sürtünme açısını (ϕ') vermektedir. Eş. 2.6 ile ifade edilen ve Şekil 2.3'de görülen bu çizgiler Coulomb yenilme kriteri olarak bilinir (Coduto, 1999: 473).

Yenilme anında oluşan kesme gerilmesi o zeminin kesme dayanımı, Coulomb çizgisi ise yenilme zarfı olarak adlandırılmaktadır. Yenilme zarfının üstünde ve yukarısında kalan noktalar kesmede yenilirken altında kalan (σ' , τ) değerlerine sahip zeminlerdeki noktalar ise teorik olarak yenilmemektedir (Coduto, 1999: 473).

Geoteknik tasarımlarda efektif gerilmelere dayalı analizlerin kullanılabilmesi hidrostatik boşluk suyu basınçları için sorun yaratmamaktadır. Fakat aşırı boşluk suyu basınçları özellikle de kesme sebebiyle oluşmaları hesaplamak zor olduğundan efektif gerilmeleri kullanarak analiz yapılamayabilir (Coduto, 1999: 478).

Efektif gerilmelerin hesaplanmadığı durumlarda, geoteknik problemlerin çözümünde efektif gerilmeler yerine toplam gerilmeler kullanılabilir. Bu durumda c_T ve ϕ_T parametreleri kullanılarak Eş. 2.6'nın aşağıdaki gibi yeniden yazılması gerekmektedir (Coduto, 1999: 478).

$$\tau_f = c_T + \sigma_f \tan \varphi_T \quad (2.7)$$

τ_f = kesme dayanımı

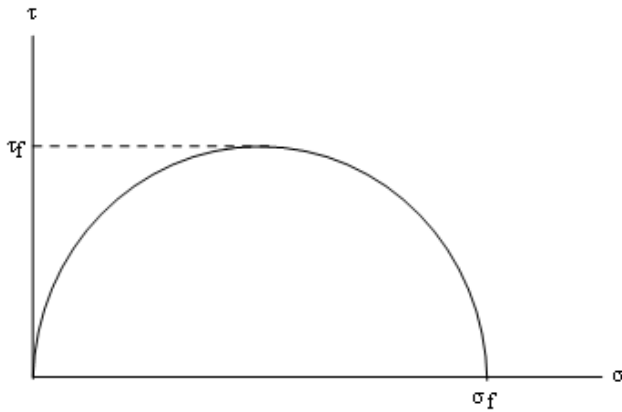
c_T = toplam görünür kohezyon dayanımı

σ_f = kesme düzlemi üzerine etkiyen normal toplam gerilme

φ_T = toplam içsel sürtünme açısı

2.4. Dayanım ve Killerin Kesme Dayanımı

Tek eksenli basınç deneyi, yanal sınırlamasız ve membransız silindirik bir zemin numunesi üzerine kırılma gerçekleşene kadar giderek artan eksenel basınç yükünün uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Yük, hızlı bir şekilde ve kısa sürede uygulanarak drenajsız durum modellenmektedir (Coduto, 1999: 504).



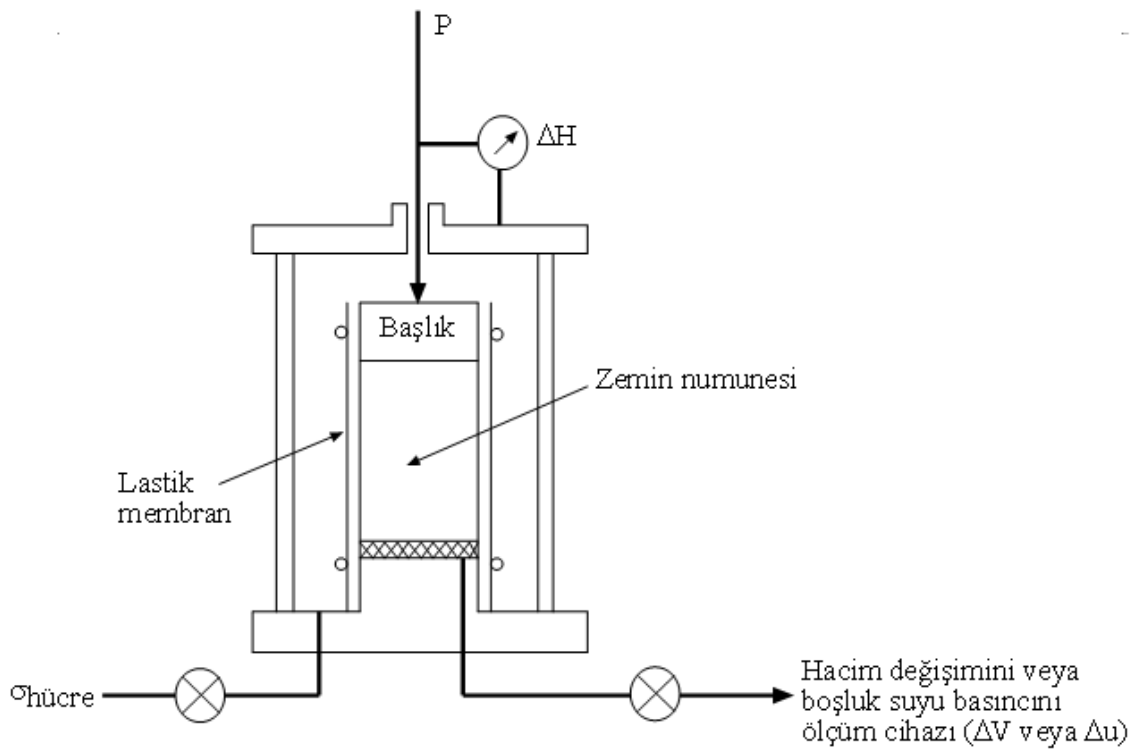
Şekil 2.4. Serbest basınç deneyinde yenilme durumunda Mohr dairesi (Coduto, 1999: 505'den düzenlenmiştir).

Yanal sınırlamasız ifadesiyle hücre basıncının olmadığı durum ($\sigma_3=0$) ifade edilmekte ve böylece elde edilen Mohr dairesinin sol tarafı yani başlangıç noktası orijin olmaktadır. Bu haliyle yenilmedeki Mohr dairesi Şekil 2.4'te gösterildiği gibi olmaktadır (Coduto, 1999: 505).

Tek eksenli basınç deneyi, basit mekanizması ve maliyet açısından gayet ekonomik olması sebebiyle diğer deneylere kıyasla tercih edilmektedir. Ancak laboratuvar modeli ile arazi şartları düşünüldüğünde çevre basıncı olarak bilinen σ_3 değeri gerçekte sıfırdan büyüktür

ve bu nedenle laboratuvar deneyiyle elde edilen kesme dayanımı gerçekte olandan farklılık arz etmektedir (Coduto, 1999: 506).

Üç eksenli basınç deneyi ise direkt kesme deneyi esas alındığında daha kompleks ve karmaşık bir yapıda olmasına rağmen zeminlerin arazideki drenaj durumlarını daha iyi modelleyebilmesi açısından kullanışlı olmaktadır. Arazideki karmaşık gerilme izi durumları da bu deney yardımıyla laboratuvar ortamında gerçekçi bir şekilde ortaya konulabilmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981: 401).



Şekil 2.5. Üç eksenli düzeneğin şematik görünümü (Holtz ve Kovacs, 1981: 402'den düzenlenmiştir).

Üç eksenli basınç deneyine tabi tutulan zemin numunesinin genel görünümü Şekil 2.5'te olduğu gibidir. Arazideki çevre basıncını modelleyebilmek için kapalı hücre içerisine yerleştirilmiş zemin numunesinin etrafına doldurulan bir hücre sıvısı (çoğunlukla da su) yardımıyla hücre basıncı oluşturulmaktadır. Hücre sıvısı veya suyun numuneye nüfuz etmemesi için zemin numunesine lastik kılıf giydirilmekte ve eksenel yük hücre içerisindeki numuneye piston yardımıyla iletilmektedir. Ayrıca deney esnasındaki hacim değişimleri ve oluşan boşluk suyu basınçları ölçülebilmektedir. Yenilme anında numune

zayıflık düzlemi üzerinde kaymakta ya da fıçılanma şeklinde deformasyona maruz kalmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981: 401).

Üç eksenli basınç deneylerinde takip edilen drenaj şartları geoteknik problemlerin çözümünde gerekli tasarım parametreleri için model oluşturmaktadır. Genellikle iki harf ile tanımlanan bu modellerde ilk harf kesmeden önce ne olduğuna yani numunenin konsolide olup olmadığına ikinci harf ise kesme sırasındaki drenaj şartlarına işaret etmektedir. Üç eksenli basınç deneylerinde izin verilebilir drenaj izleri üç çeşit olup Çizelge 2.1’de olduğu gibi adlandırılmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981: 401, 402).

Çizelge 2.1. Üç eksenli basınç deney tipleri (Holtz ve Kovacs, 1981: 402).

Kesmeden Önce	Kesme Sırasında	Simge
Konsolidasyonsuz	Drenajsız	UU
Konsolidasyonlu	Drenajsız	CU
Konsolidasyonlu	Drenajlı	CD

Geoteknik mühendisliğinin en önemli inceleme alanlarından birisi zeminin kesme dayanımıdır. Çünkü geoteknik tasarımlara ait problemlerin temelinde yine zeminin kesme dayanımı etkili olmaktadır. Bu sebeple zemin yapıları ya da zeminlerin mühendislik yapıları için temel vazifesi gördüğü durumlarda zeminin nihai veya sınır kesme direncinin (kesme dayanımının) tanımlanması gerekmektedir (Holtz ve Kovacs, 1981: 425).

Killi zeminler kesmeye maruz kaldığında temel olarak granüle zeminlerde meydana gelen değişikliklerle benzer durumlar oluşmaktadır. Sözelimi hacim değişikliği her iki zemin türünde de rölatif sıkılık ve hücre basıncına bağlı olmakla birlikte killi zeminlerde gerilme tarihçesi de etkili olmaktadır. Ayrıca killi zeminlerde boşluk suyu basınçları önemli ölçüde zeminin normal konsolide veya aşırı konsolide durumuna bağlı olmaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981: 462).

Hidrostatik basınçlar ya da boşluk suyu basınçlarının oluşması mühendislik yüklerinin zemine tatbik süresi ile suyun zemin taneleri arasındaki boşluklardan çıkış süresi arasındaki farktan ileri gelmektedir. Yüklerin tatbik hızının zeminde yenilmeye sebep olmayacağı bir durum söz konusu ise boşluk suyu basıncı oluşmamakta ve konsolidasyon

aşaması sonucunda hacim değişikliği meydana gelmektedir. Yükleme esnasında suyun zemin gözeneklerinden çıkış süresi, kumların ve killerin davranışı arasındaki ana farkı oluşturmaktadır ki bunun temelinde ise zeminlerin permeabilite karakteristikleri yatmaktadır. Kohezyonlu zemin olan killeri, kum ve çakıllara göre çok daha düşük permeabiliteye sahip olduğundan suyun zemin gözeneklerinden dışarı veya içeri akması çok daha uzun zaman almaktadır (Holtz ve Kovacs, 1981: 462).





3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada birleşik zemin sınıflandırmasına göre CH sınıfı olan zemin numunesi kullanılmış ve zeminin laboratuvar deneylerinden elde edilen mukavemet parametrelerinin ilişkilendirilebilirliği araştırılmıştır. Standart Proctor ve modifiye Proctor enerji düzeylerinde sıkıştırılan numunenin laboratuvar kompaksiyon eğrileri dikkate alınarak her bir eğri üzerinden optimum su muhtevasında, optimum su muhtevasının ıslak ve kuru tarafında olmak üzere 3'er adet numune belirlenmiş; çalışma aynı zeminden elde edilen farklı su içeriklerinde ve değişik kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanan 6 ayrı numune üzerinden yürütülmüştür.

Kompaksiyon karakteristikleri belirlenen her bir numune için 3 özdeş örnek oluşturulup serbest basınç (UC) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli basınç deneylerinde ise 50, 100, 200 ve 400 kPa'lık dört farklı çevre basıncında kullanılmak üzere her bir numuneden 4 özdeş örnek hazırlanmıştır. Ayrıca üç eksenli basınç deneyleri konsolidasyonsuz-drenajsız (UU), konsolidasyonlu-drenajlı (CD) ve aşamalı konsolidasyonlu-drenajlı (aşamalı CD) tiplerde olmak üzere üç farklı aşamada tamamlanmıştır.

Serbest basınç deneyleri ASTM D2166, üç eksenli basınç deneylerinden UU ve CD olarak gerçekleştirilenler ise sırasıyla ASTM D2850 ve ASTM D7181 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Aşamalı olarak gerçekleştirilen CD tip deneyinde de BS 1377 standardı referans alınmıştır.

3.1. Çalışmada Kullanılan Zeminin Temel Fiziksel Özellikleri

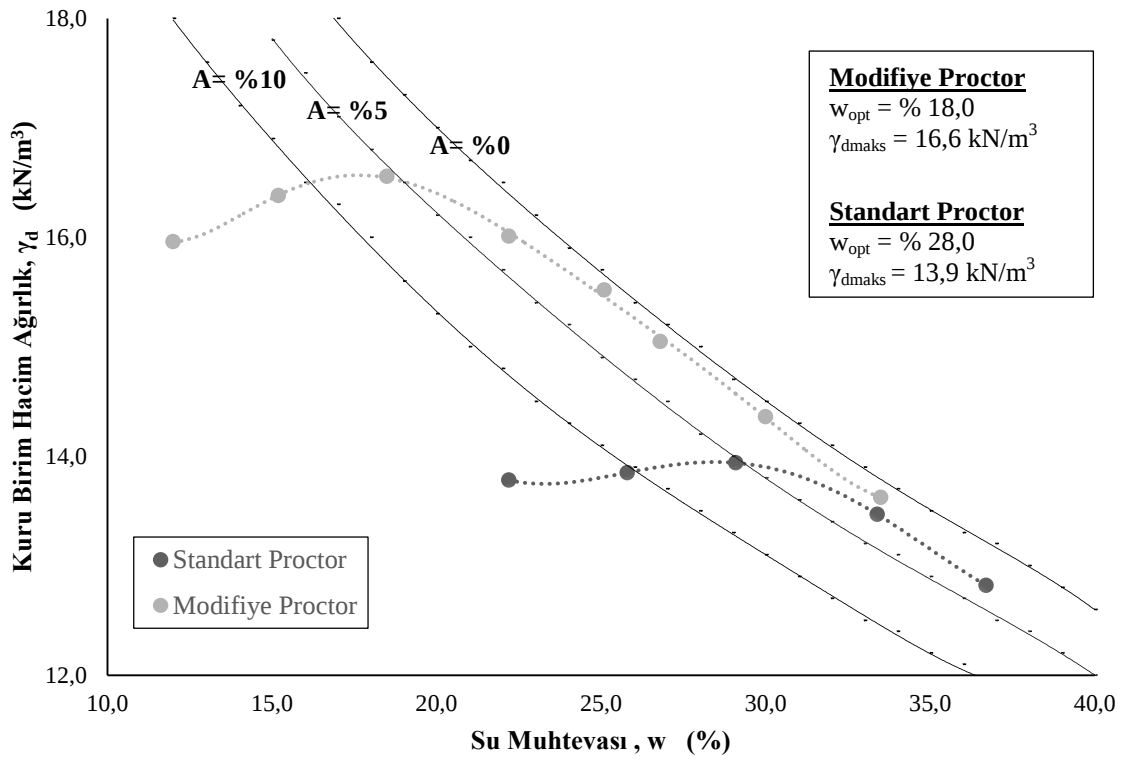
Çalışmalarda KGM-ARGE/2013-21 numaralı araştırma projesi kapsamında temin edilen ve ASTM No.4 elekten elendikten sonra laboratuvar ortamında depolanan zemin kullanılmıştır. Zeminin temel fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla birtakım deneyler yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.1'de özetlenmiştir. Su içeriğinin tayininde ASTM D2216, özgül ağırlığın belirlenmesinde ASTM D854, kıvam limitleri için ise ASTM D4318 standartları dikkate alınmıştır. Elek analizi ve hidrometre deneylerinde de ASTM C117 ve ASTM D7928 standartları referans olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
ASTM No.4 elekten geçen zemin kütlesi (%)	100,0
ASTM No.200 elekten geçen zemin kütlesi (%)	80,8
Kil yüzdesi (0,002mm den küçük zemin kütlesi) (%)	38,2
Birleştirilmiş zemin sınıfı	CH
AASHTO Zemin Sınıflama Sistemine Göre	A-7-5
Likit Limit, w_L (%)	73,4
Plastik Limit, w_P (%)	32,3
Plastisite İndeksi, PI (%)	41,1
Tek eksenli büzülme, L_s (%)	17
Aktivite, A	1,076
Özgül Ağırlık, G_s	2,66
Şişme Potansiyeli	Yüksek-Çok yüksek

3.2. Zeminin Laboratuvar Kompaksiyon Karakteristikleri

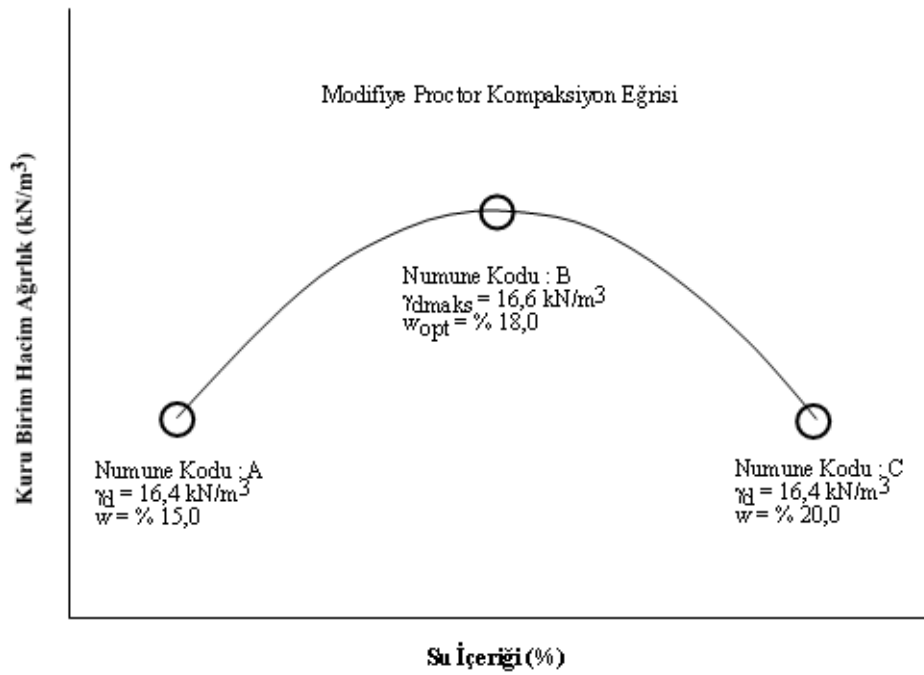
Çalışmada kullanılacak zeminin standart ve modifiye Proctor eğrilerini oluşturabilmek için sırasıyla ASTM D698 ve ASTM D1557 standartları uyarınca laboratuvar kompaksiyon deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.1 üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca hava muhtevasının %0 , %5 ve %10 olması durumunda kuru birim hacim ağırlığının su içeriği ile değişim eğrilerine de yer verilmiştir. Standart Proctor enerjisi ile elde edilen kompaksiyon eğrisine göre optimum su içeriği %28 maksimum kuru birim hacim ağırlık $13,9 \text{ kN/m}^3$ tür. Sıkıştırma enerjisinin standart Proctor enerji (SPE) düzeyinden (600 kN-m/m^3) modifiye Proctor enerji (MPE) düzeyine (2700 kN-m/m^3) çıkması durumunda; optimum su içeriği yaklaşık 1/3 oranında azalarak %18, maksimum kuru birim hacim ağırlık ise yaklaşık %20 artarak $16,6 \text{ kN/m}^3$ olarak elde edilmiştir. Her iki sıkıştırma enerjisinin optimumlarından geçen hava içeriği oranı (A) ~%5 civarında elde edilmiştir.



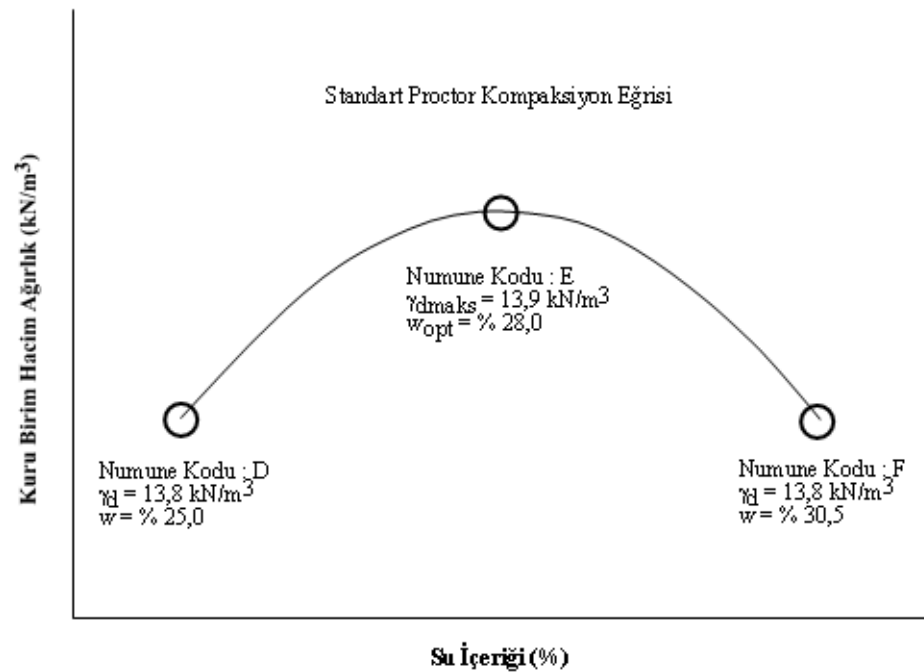
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan zeminin standart Proctor ve modifiye Proctor kompaksiyon eğrileri

3.3. Dayanım Deney Numunelerinin Hazırlanması

Zeminin standart ve modifiye Proctor enerji düzeylerine ait kompaksiyon eğrileri kullanılarak her bir eğri üzerinde 3 farklı nokta tanımlanmıştır. Optimum su içeriğinin ıslak ve kuru tarafında yer alan numuneler seçilirken kuru birim hacim ağırlıklarının birbirine eşit olduğu değerler dikkate alınmıştır. Böylece Şekil 3.2 ve Şekil.3.3'te gösterildiği üzere 6 farklı numune oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. Modifiye Proctor eğrisi üzerinden seçilen noktalar (A, B ve C numuneleri)



Şekil 3.3. Standart Proctor eğrisi üzerinden seçilen noktalar (D, E ve F numuneleri)

Dayanım deneylerinde kullanılacak 6 farklı numunenin belirlenmesiyle birlikte ASTM No.4 elekten elenmiş zemin numunesi 24 saat süreyle etüvde kurutulmuş ve hava almayacak şekilde paketlenerek depolanmıştır. Numunelerin belirlenen hedef su

muhtevaları ve kuru birim hacim ağırlıklarında hazırlanabilmeleri için her bir deneyde kullanılacak özdeş örnek adedi de dikkate alınarak Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te belirtilen malzeme miktarları hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2. Serbest basınç deneyi için malzeme oranları

Sıkıştırma Enerjisi Düzeyi	Numune kodu	Su Muhtevası, w (%)	Kuru Birim Hacim Yoğunluk, ρ_d (g/cm^3)	Kuru kil miktarı (g)	Su miktarı (g)	Her tabakaya girecek yaş malzeme miktarı (g)
MPE	A	15,0	1,67	457,95	68,69	56,63
	B	18,0	1,69	463,43	83,42	58,80
	C	20,0	1,67	457,95	91,59	59,09
SPE	D	25,0	1,41	386,65	96,66	51,97
	E	28,0	1,42	389,39	109,03	53,59
	F	30,5	1,41	386,65	117,93	54,26

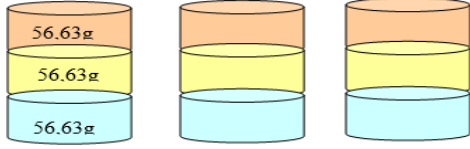
Çizelge 3.3. Üç eksenli basınç deneyi için malzeme oranları

Sıkıştırma Enerjisi Düzeyi	Numune kodu	Su Muhtevası, w (%)	Kuru Birim Hacim Yoğunluk, ρ_d (g/cm^3)	Kuru kil miktarı (g)	Su miktarı (g)	Her tabakaya girecek yaş malzeme miktarı (g)
MPE	A	15,0	1,67	605,67	90,85	56,63
	B	18,0	1,69	612,93	110,33	58,80
	C	20,0	1,67	605,67	121,13	59,09
SPE	D	25,0	1,41	511,38	127,84	51,97
	E	28,0	1,42	515,00	144,20	53,59
	F	30,5	1,41	511,38	155,97	54,26

Çizelgede belirtilen miktarlardaki kuru kil ve su küçük bir kap içerisinde homojen hale gelinceye kadar karıştırılmış ve hazırlanan bu karışım içerisindeki suyun numuneye tam anlamıyla nüfuz edebilmesi için deney öncesi 24 saat süreyle nemli ortamda bekletilmiştir. Sıkıştırma öncesi numune yeniden karıştırılıp her bir tabakaya girecek malzeme miktarı kadar tartım yapılarak kaplara ayrılmıştır.

Çizelgede belirtilen miktarlar dikkate alındığında her bir numune için serbest basınç deneylerinde 3 adet, üç eksenli basınç deneylerinde ise 4 adet özdeş örnek elde edilmiştir.

Örneğin A numunesinin serbest basınç deneyinde 457,95 gram kuru kil ve 68,69 gram saf su kullanılarak elde edilen karışımdan 3 adet örnek elde edilmiştir ki:

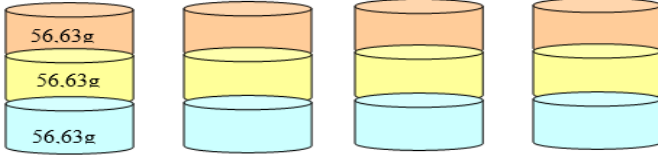


$$457,95 + 68,69 = 526,64 \text{ g}$$

$$(3 \text{ numune}) \times (3 \text{ tabaka}) \times (56,63) = 509,67 \text{ g}$$

$$\text{Hazırlanan} = 526,64 \text{ g} > \text{Kullanılan} = 509,67 \text{ g}$$

Yine benzer şekilde A numunesinin üç eksenli basınç deneyinde 605,67 gram kuru kil ve 90,85 gram saf su kullanılarak elde edilen karışımdan 4 adet örnek elde edilmiştir.



$$605,67 + 90,85 = 696,52 \text{ g}$$

$$4 \times 3 \times 56,63 = 679,56 \text{ g}$$

$$696,52 \text{ g} > 679,56 \text{ g}$$

Her bir tabakaya girecek malzeme miktarı kadar tartım yapılarak kaplara ayrılan numuneyi sıkıştırmak için özel olarak tasarlanan sıkıştırma kalıbı kullanılmıştır. Resim 3.1, Resim 3.2, Resim 3.3 ve Resim 3.4'te detaylıca görülen sıkıştırma kalıbı; ana gövde, her bir tabakayı sıkıştırmak için kullanılacak farklı uzunluklardaki tokmaklar, deney numunesinin içerisinde çıkarılacağı ring ve kalıp üst başlıktan oluşmaktadır.



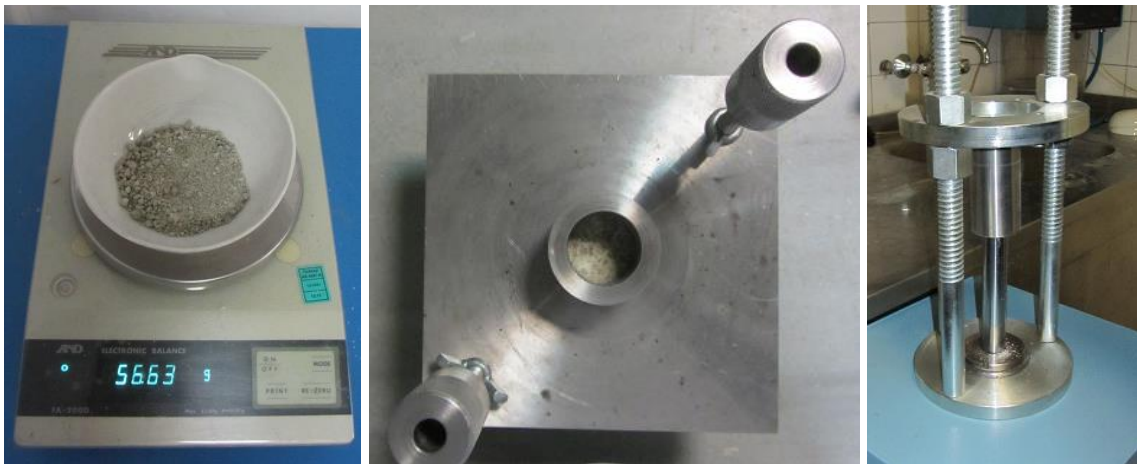
Resim 3.1. Sıkıştırma kalıbı ana gövde ve numune ringi



Resim 3.2. Sıkıştırma kalıbı üst başlık



Resim 3.3. Tabaka tokmakları ve sıkıştırma kalıbı

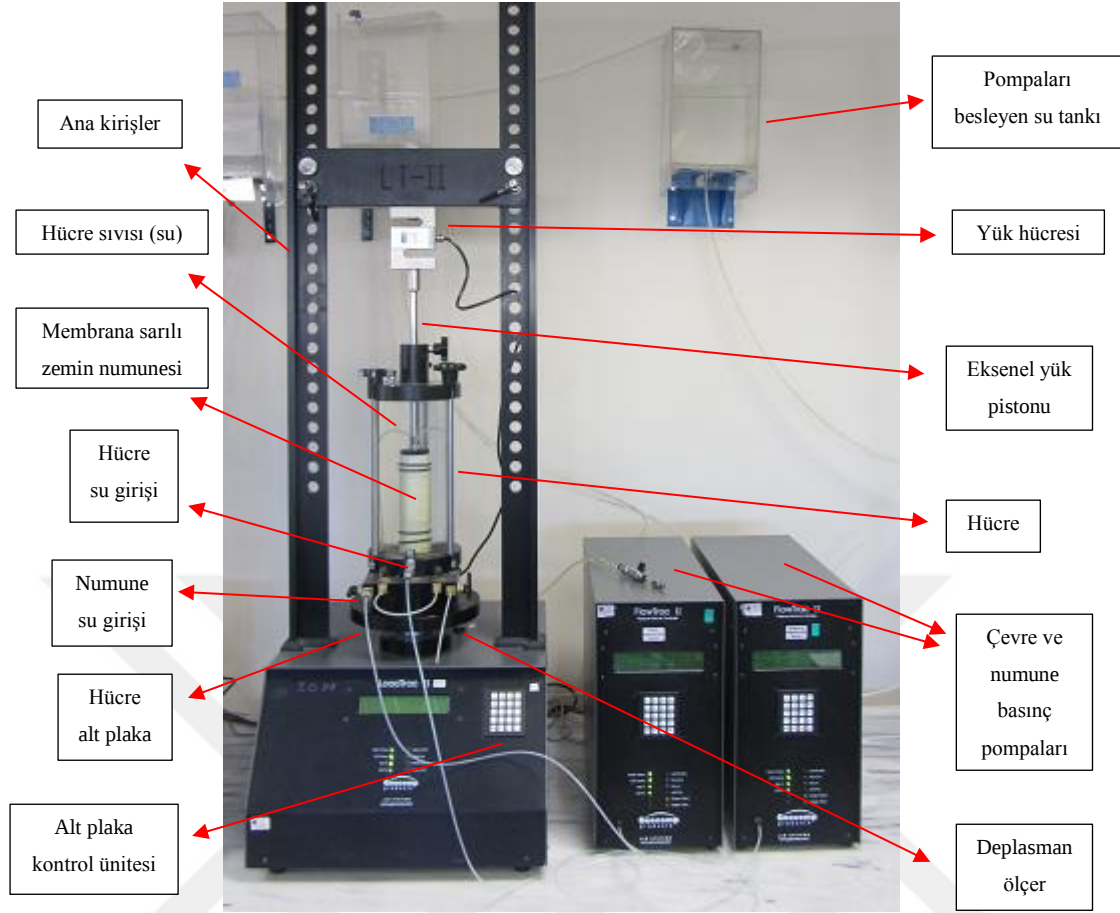


Resim 3.4. Her bir tabakaya girecek yağ numunenin tartımı, sıkıştırılmış birinci tabakanın görünümü ve sıkıştırılmış numunenin ringden çıkarılması

Deney numuneleri, içerisindeki boşlukları minimuma indirip homojen bir yapıda hazırlanabilmeleri için tabakalandırılarak sıkıştırılmış ve sıkıştırılan her bir tabakanın üst yüzeyi uygun bir aparatla pürüzlendirilerek üstteki tabakaya kaynaşması sağlanmıştır. Sıkıştırma kalıbı vasıtasıyla 38 mm çapında 78 mm yüksekliğinde numuneler hazırlanmış ve tokmak uzunlukları arasındaki farkın 26 mm olması sebebiyle her bir tabaka sıkıştırılırken tabaka hacimleri kontrol altına alınmıştır.

3.4. Serbest Basınç ve Üç Eksenli Basınç Deney Düzeneği

Üç eksenli basınç deneyleri, Resim 3.5'te ayrıntılı olarak gösterilen bilgisayar kontrollü cihaz kullanılarak yapılmıştır. Cihaz; numunenin rahatlıkla yerleştirilebildiği, içine doldurulan akışkana uygulanacak çevre basınçlarına dayanıklı, piston yardımıyla numuneye eksenel yük uygulanabilmesine imkan veren hücreden; hücreye doldurulan akışkana ve numuneye uygulanacak basınçları sağlayabilen, bunu belirli bir düzeyde tutabilen iki adet pompadan; deney numunesine uygulanacak eksenel yükü verecek yük hücresinden; numunede meydana gelen deformasyonları ölçebilen deplasman ölçerden ve hücrenin üzerine oturtulduğu alt plakanın aşağı yukarı hareket edebilmesine imkan veren ana kontrol panelinden oluşmaktadır.

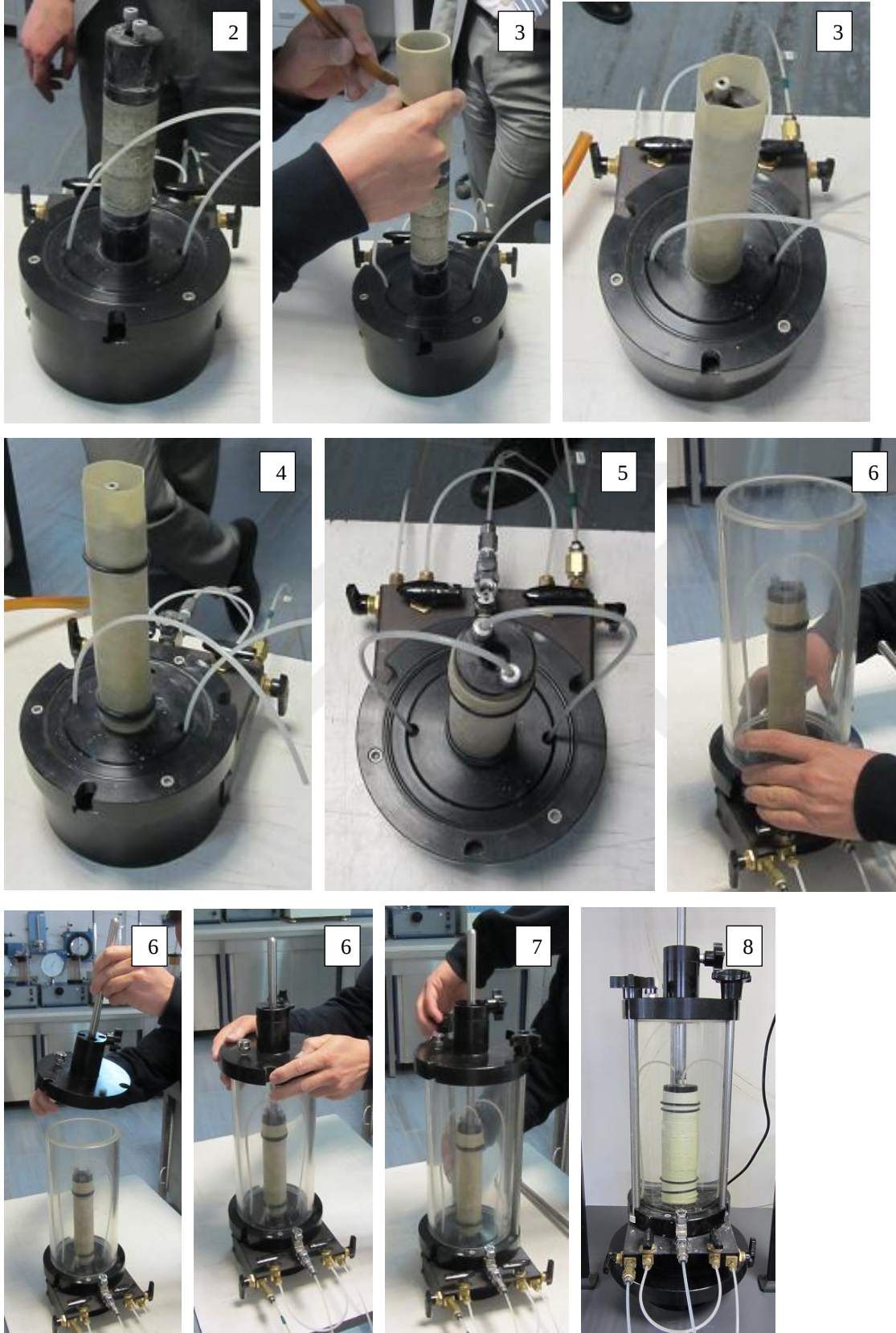


Resim 3.5. Bilgisayar kontrollü üç eksenli basınç deney düzeneğinin genel görünümü

Sıkıştırılmış numune hidrolik sistem yardımıyla ringden çıkartıldıktan sonra ağırlık tartımı yapılmış ve boy-çap ölçümlerinin ardından deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Düzeneğe yerleştirilme adımlarını sıralayacak olursak:

1. Deney düzeneğini yerleştirmeye başlamadan önce yük hücresi, deplasman ölçer ve basınç pompaları için kalibrasyon dosyalarının güncelliği irdelenir ve çeşitli kontrol araçlarıyla ekipmanların doğru bir şekilde ölçüm yapıp yapmadığı teyit edilir.
2. Hücre alt tabanın merkezine sabit halde bulunan dairesel başlık üzerine sırasıyla poroz taş (drenajsız-konsolidasyonsuz tip deneylerde genellikle su geçirmez dairesel plastik aparat kullanılır), zemin numunesi ve numunenin de üzerine yeniden poroz taş yerleştirildikten sonra dairesel üst başlık konulur.
3. Numuneye suyun girişini engellemek için hem numuneyi hem de başlık ve poroz taşları saracak şekilde lastik kılıf (membran) numuneye giydirilir.
4. Membranın alt ve üst başlıkları örten kısımlarında bulunan küçük kanallara da o-ring'ler yerleştirilir ve böylelikle suyun numuneye girişi önlenmiş olur.

5. Drenajlı deneylerde suyun, numune içerisindeki dolaşımını sağlayacak olan hortumlar üst başlık üstünde bulunan kanallara vidalanarak tutturulur.
6. Alt tabana merkezlenen numunenin etrafı basınca dayanıklı bir cam bölme ile üst kısmı ise ortasında eksenel yük pistonunun olduğu bir aparatla kapatılır. Eksenel yük pistonu numune üzerindeki üst başlığın orta noktasına yerleştirilir ve üst kısımdaki aparatla kilitlenir.
7. Hücrenin bütünü çevresindeki üç ayrı tutturma mekanizması ile sabitlenir.
8. Aşağı yukarı hareket edebilir plaka üzerine hücrenin alt tabanı ortalanarak yerleştirilir.
9. Kontrol ünitesi yardımıyla alt plaka yukarı doğru hareket ettirilerek yük hücresi ile eksenel yük pistonu yaklaşık olarak birbirine temas edecek hale getirilir.
10. Pompaları besleyen su tankından basınç paneli yardımıyla hücre su girişini kullanarak zeminin etrafı, çevre basıncını modellememize yardımcı olacak su ile doldurulur ve böylelikle numune deneye hazır hale getirilir.
11. Yapılacak tip deneye ve numuneye ait özellikler bilgisayar yazılımı aracılığıyla sisteme yüklenir ve deney öncesi şablon oluşturulur.
12. Hazır hale gelen şablon üzerinden deney başlatılır ve ilk olarak basınç pompalarının kontrolü otomatik şekilde yapılarak pompalar sınır limitlerine kadar doldurulur.
13. Ardından manuel olarak yapılmış yük hücresi-eksenel yük pistonu arasındaki temas durumu daha hassas bir şekilde alt plakanın hareketiyle cihaz tarafından otomatik olarak sıfırlanır.
14. Eksenel yük pistonunu tutan kilit açıldıktan sonra da numune etrafına doldurulan suyun etkisiyle birlikte yük hücresi-eksenel yük pistonu arasındaki temas için ikinci bir hassas ayar yine cihaz tarafından yapılmaktadır.
15. Cihaz üzerindeki gösterge paneli yardımıyla bu hassas ayarın sonlanmış olduğuna karar verilir ve şablon üzerinden bir sonraki aşamaya geçilerek deneye başlanmış olunur.

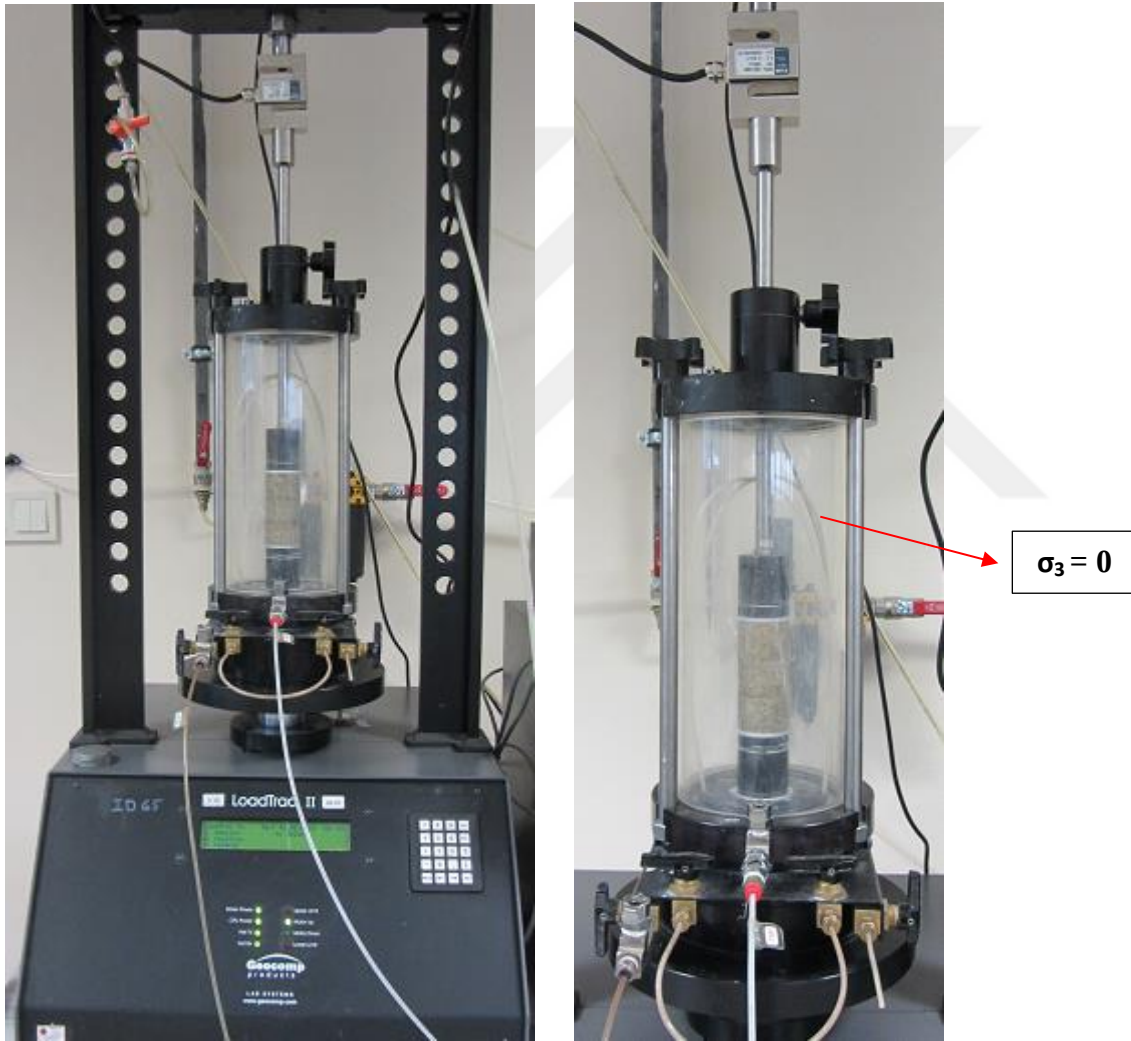


Resim 3.6. Sıkıştırılmış bir numunenin üç eksenli deney düzeneğine yerleştirilme adımları

Serbest basınç deneyleri de aynı cihazda yapılmış olmasına rağmen üç eksenli basınç deneylerinden temel farkları şunlardır:

- Numunenin alt ve üst yüzeylerine poroz taş yerine plastik diskler konulması,
- Hücre içine yerleştirilen numunenin etrafına hücre sıvısı veya su doldurulmamış olması,
- Basınç pompalarının deneyde kullanılmamasıdır.

Resim 3.7’de aynı düzeneğe yerleştirilmiş serbest basınç deney numunesi görülmektedir.



Resim 3.7. Serbest basınç deney düzeneği ve deneye tabi tutulan bir zemin numunesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

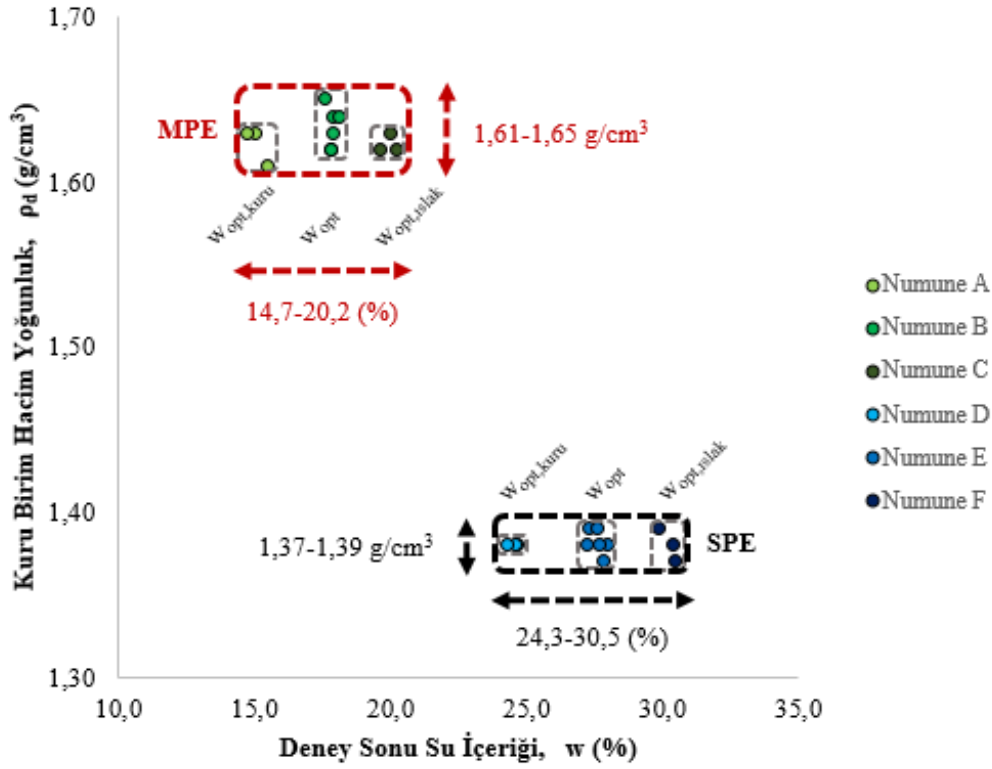
4.1. Serbest Basınç Deneyleri

Serbest basınç deneyleri her bir numune için hazırlanan 3 adet özdeş örnek üzerinden yürütülmüş ve numunenin serbest basınç dayanımı bu örneklerden elde edilen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.

SPE düzeyinde sıkıştırılan D, E ve F numunelerine ait eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri EK-1, EK-2 ve EK-3'te, deney sonu fotoğrafları ise EK-4'te verilmiş olup MPE düzeyinde sıkıştırılan A, B ve C numunelerine ait eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkilerine ise EK-5, EK-6 ve EK-7'de, deney sonu fotoğraflarına da EK-8'de yer verilmiştir.

Serbest basınç dayanımının su muhtevası ile değişimini daha net görebilmek adına her iki enerji düzeyinin optimum su içeriğinde yapılması planlanan E ve B numuneleri için ilave örnekler oluşturulmuştur. Hazırlanacak ilave numunelerde su içerikleri değiştirilmeksizin kuru birim hacim yoğunlukları, optimumun kuru ve ıslak tarafındaki numunelerin yoğunluklarıyla eşit olacak şekilde belirlenmiştir. İlave numunelere ait eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri EK-9 ve EK-10'da verilmiştir.

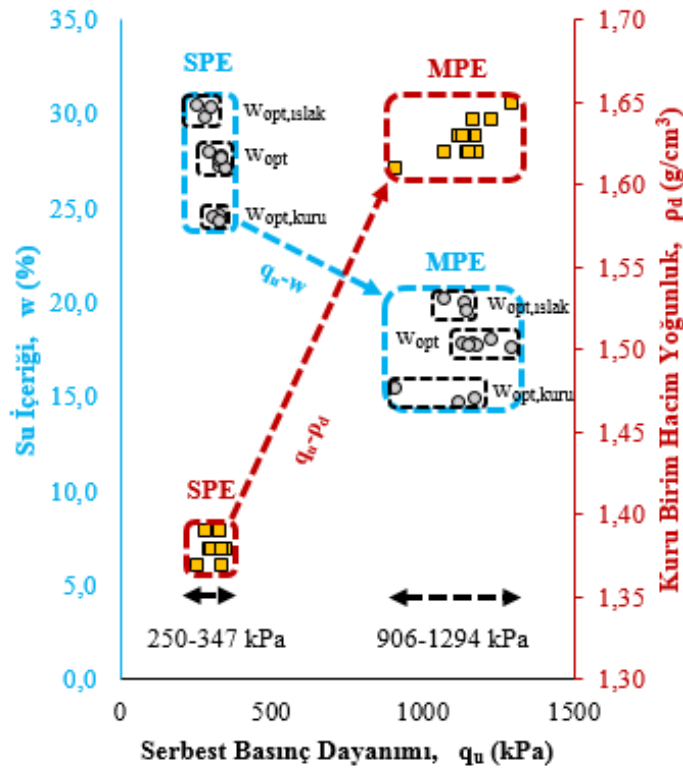
Numunelerin deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunluklarının değişimi Şekil 4.1'de; deney sonu serbest basınç dayanımı ve eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği - kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri ise Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.1. Sıkıştırılmış numunelerin UC deneyi (doyurmadan) deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukları

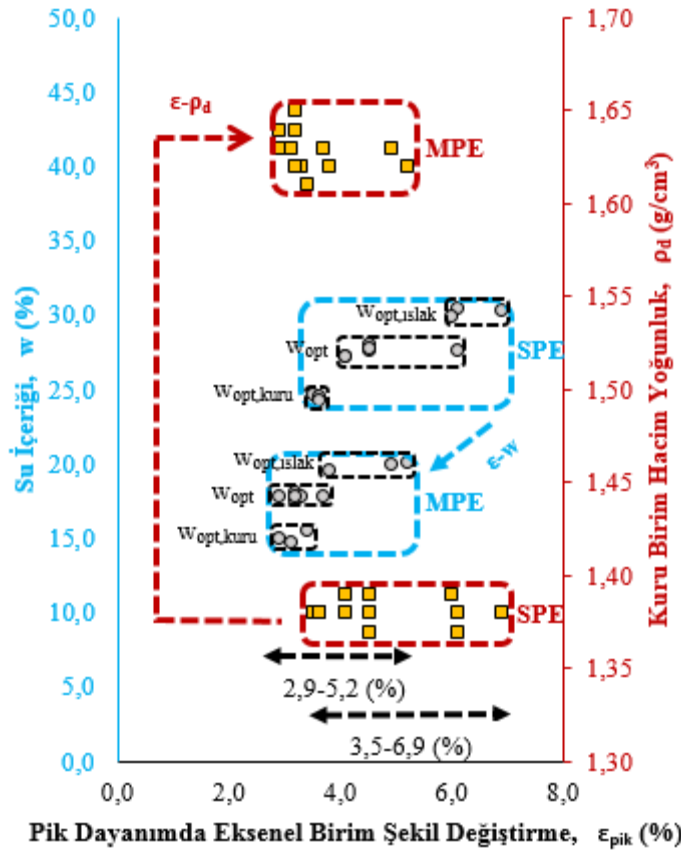
MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerin kuru birim hacim yoğunlukları 1,61-1,65 g/cm³ seviyelerinde iken SPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 1,37-1,39 g/cm³ civarındadır. Su içeriklerinin değişimleri de MPE düzeyindeki numunelerde %14,7-20,2 aralığında iken SPE düzeyinde ise %24,3-30,5 bandındadır.

Bu değerler dikkate alındığında deney sonu kuru birim hacim yoğunlukları, hedef kuru birim hacim yoğunluklarından %2,5 civarında; deney sonu su içerikleri ise hedef su içeriklerinden %1 oranında bir sapma göstermektedir.



Şekil 4.2. Sıkıştırılmış numunelerin UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.2’de görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için serbest basınç dayanımları 250-350 kPa arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 900-1300 kPa bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte serbest basınç dayanımları da ortalama 300 kPa seviyelerinden 1100 kPa düzeyine çıkmaktadır.



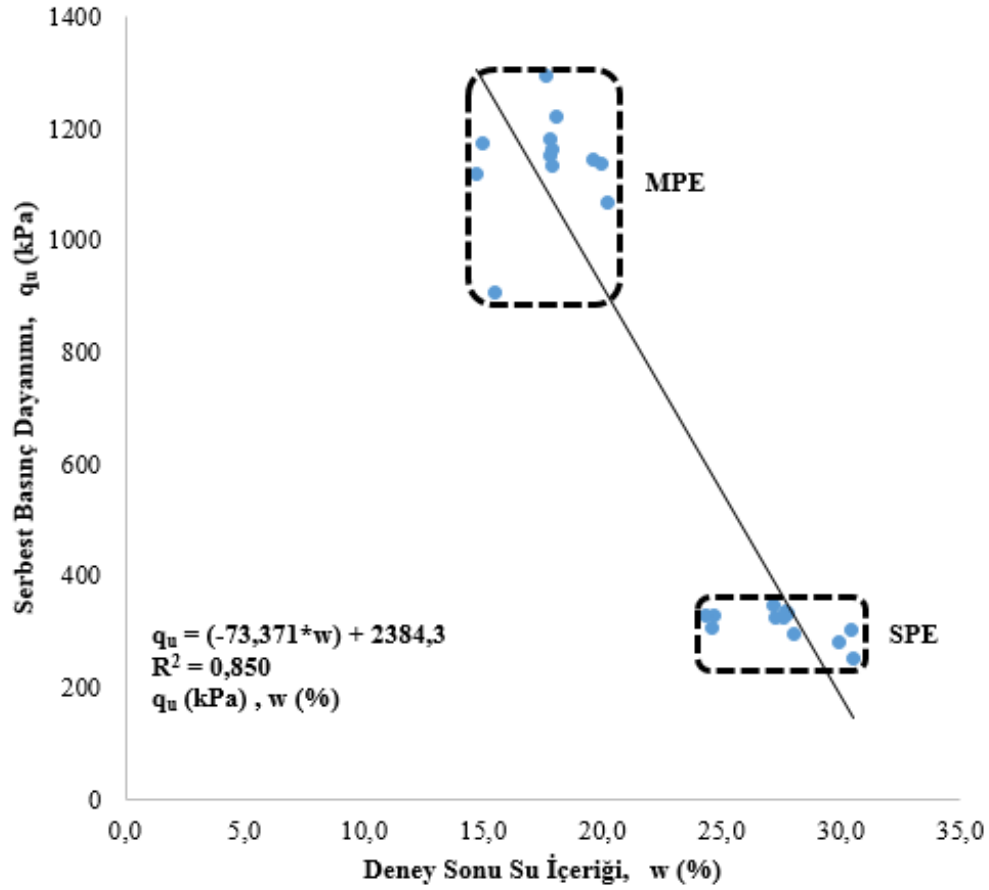
Şekil 4.3. Sıkıştırılmış numunelerin UC deneyi (doyurmadan) pik dayanımında eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.3’de görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için pik dayanımında eksenel birim şekil değiştirmeler %3-7 arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise %3-5 bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte pik dayanımında eksenel birim şekil değiştirmeler ortalama %4,8 seviyelerinden %3,6 düzeyine düşmektedir.

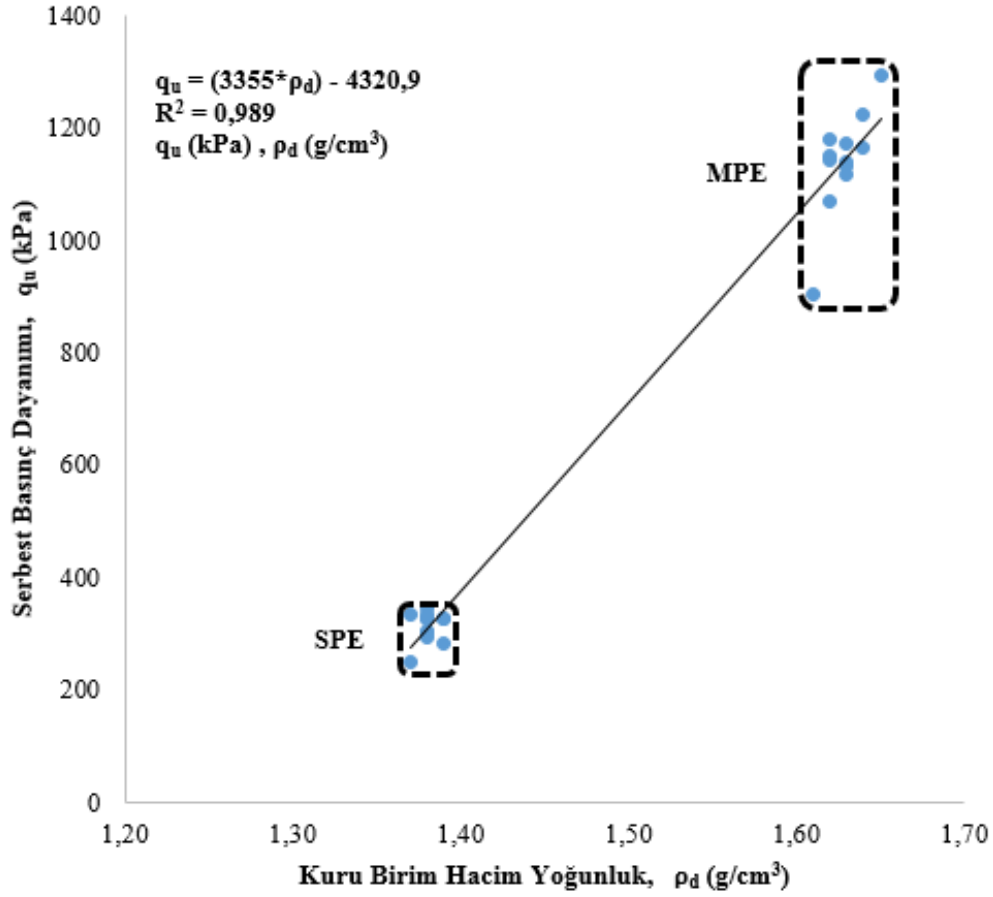
4.1.1. Enerji düzeyindeki değişimlere bağlı olarak numunelerin mukavemet parametrelerinin değişimi

Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte ortalama serbest basınç dayanımları da yaklaşık 4 kat artmaktadır. Enerji düzeyinin değişimiyle birlikte numunelerin su içerikleri yaklaşık %35 azalmakta ve kuru birim hacim yoğunlukları ise %15 civarında artmaktadır.

Numunelerin serbest basınç dayanımlarının, deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunluk ile değişimleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülmektedir.

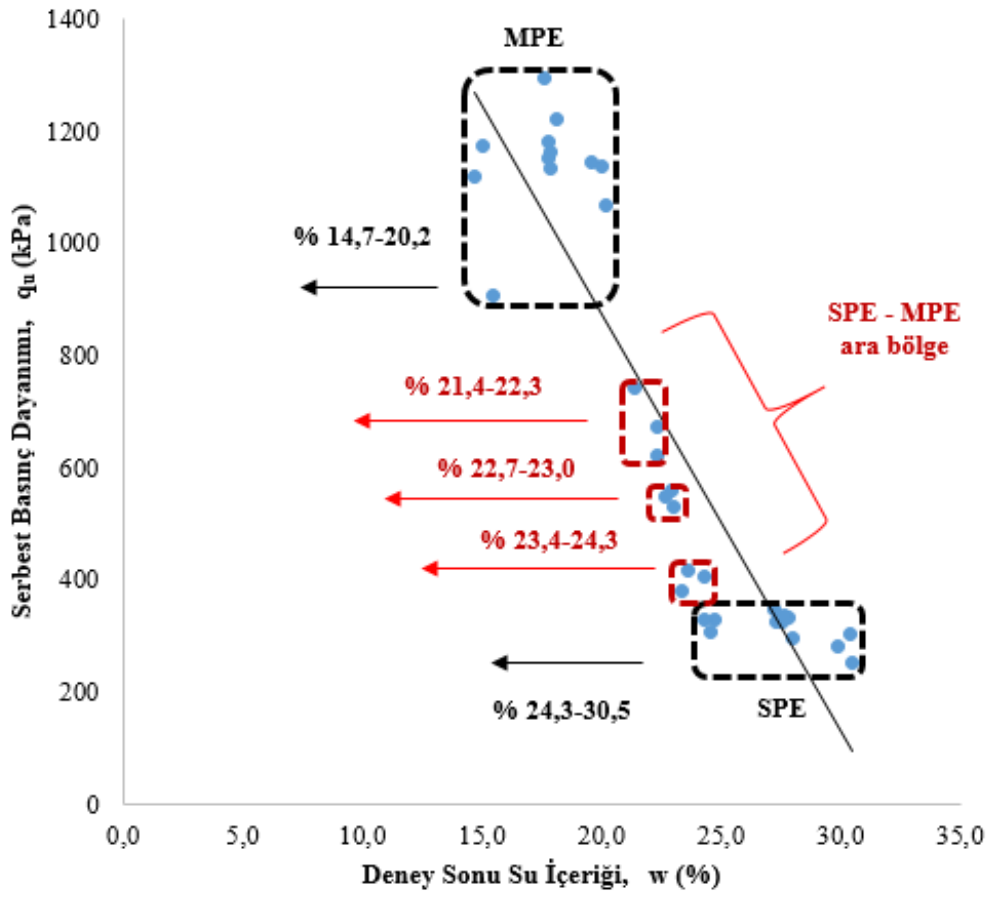


Şekil 4.4. Sıkıştırılmış numunelerde UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının deney sonu su içeriği ile değişimi

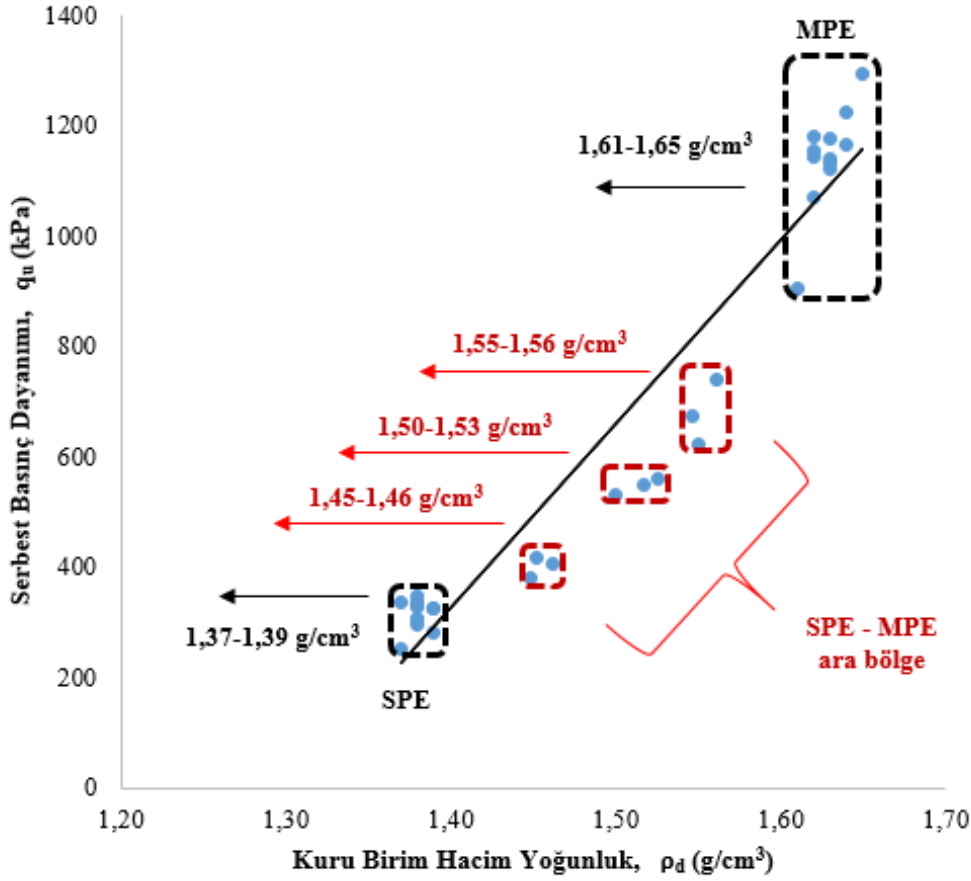


Şekil 4.5. Sıkıştırılmış numunelerde UC deneyi (doymadan) serbest basınç dayanımlarının kuru birim hacim yoğunlukla değişimi

SPE - MPE düzeylerinin ara bölgelerinde rastgele seçilen su içeriği – kuru birim hacim yoğunluk değerlerinde ilave serbest basınç deneyleri yapılmış ve böylece serbest basınç dayanımlarının enerji düzeyleriyle uyumluluğu araştırılmıştır. İlave numunelere ait değişim grafikleri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de sunulmuş olup üç farklı numuneye ait eksenel gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkilerine ise EK-11, EK-12 ve EK-13’te yer verilmiştir.



Şekil 4.6. Sıkıştırılmış ilave numunelerle birlikte tüm numunelerin UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının deney sonu su içeriği ile değişimi



Şekil 4.7. Sıkıştırılmış ilave numunelerle birlikte tüm numunelerin UC deneyi (doyurmadan) serbest basınç dayanımlarının kuru birim hacim yoğunlukla değişimi

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’den görüleceği üzere ilave serbest basınç deneylerinden elde edilen verilerin de grafiğe eklenmesiyle birlikte enerji düzeyleri arasında bir ilişkinin olduğu açıkça görülmektedir. Bu ilişkiyi açıklayabilmek amacıyla SPSS paket programı kullanılarak çok değişkenli regresyon analizi yapılmış ve aşağıda verildiği üzere serbest basınç dayanımı için iki değişkenli (su içeriği, kuru birim hacim yoğunluk) bir denklem elde edilmiştir. Böylelikle SPE ve MPE düzeylerinde deneyler yapılarak ara enerji düzeyleri için yaklaşık değerlerin bulunabileceği eşitliklerin kullanılması mümkün gözükmemektedir.

$$q_u = (3041,293 \times \rho_d) - (7,138 \times w) - 3740,242 \quad R^2 = 0,929 \quad (3.1)$$

q_u = Serbest Basınç Dayanımı (kPa)

ρ_d = Kuru Birim Hacim Yoğunluk (g/cm^3)

w = Su İçeriği (%)

Elde edilen eşitlik yardımıyla her bir numune için deneylerden elde edilen verilerin yanı sıra tahmin edilen serbest basınç dayanımları da hesaplanmış olup Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te ayrı ayrı sunulmuştur.

Çizelge 4.1. MPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için UC deneyi (doyurmadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanımları

Deney Sonucu Elde Edilen Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Kuru Birim Hacim Yoğunluk (g/cm ³)	Su İçeriği (%)	Eşitlik Yardımıyla Tahmin Edilen Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Tahmin Edilen Dayanım Değerinin Ölçülen Deney Dayanımından Sapma Yüzdesi (%)
1174	1,63	15,0	1110	5
906	1,61	15,5	1046	-15
1119	1,63	14,7	1112	1
1294	1,65	17,6	1152	11
1164	1,64	17,9	1120	4
1223	1,64	18,1	1118	9
1180	1,62	17,8	1060	10
1132	1,63	17,9	1089	4
1152	1,62	17,8	1060	8
1068	1,62	20,2	1042	2
1139	1,63	20,0	1074	6
1143	1,62	19,6	1047	8

Çizelge 4.2. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılan numuneler için UC deneyi (doymadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanımları

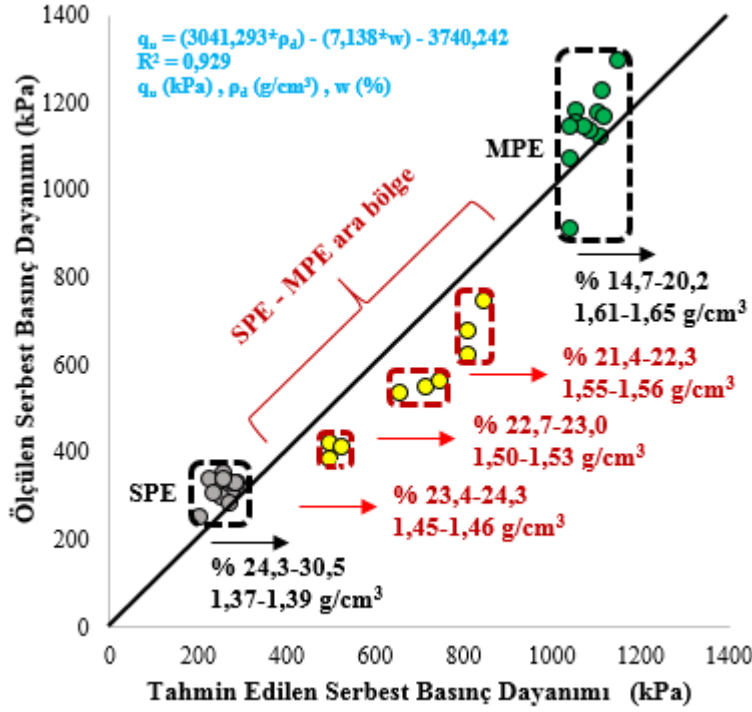
Deney Sonucu Elde Edilen Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Kuru Birim Hacim Yoğunluk (g/cm ³)	Su İçeriği (%)	Denklemler Yardımıyla Tahmin Edilen Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Tahmin Edilen Dayanım Değerinin Ölçülen Deney Dayanımından Sapma Yüzdesi (%)
621	1,55	22,3	815	-31
741	1,56	21,4	851	-15
673	1,55	22,3	815	-21
547	1,52	22,7	720	-32
558	1,53	22,9	749	-34
531	1,50	23,0	657	-24
380	1,45	23,4	503	-32
416	1,45	23,6	501	-20
407	1,46	24,3	527	-29

Çizelge 4.3. SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için UC deneyi (doymadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanımları

Deney Sonucu Elde Edilen Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Kuru Birim Hacim Yoğunluk (g/cm ³)	Su İçeriği (%)	Denklemler Yardımıyla Tahmin Edilen Serbest Basınç Dayanımı (kPa)	Tahmin Edilen Dayanım Değerinin Ölçülen Deney Dayanımından Sapma Yüzdesi (%)
327	1,38	24,7	280	14
306	1,38	24,6	281	8
327	1,38	24,3	283	13
325	1,39	27,3	292	10
326	1,39	27,6	290	11
294	1,38	28,0	257	13
347	1,38	27,2	263	24
334	1,37	27,8	228	32
335	1,38	27,7	259	23
250	1,37	30,5	209	17
282	1,39	29,9	274	3
302	1,38	30,4	240	21

Çizelgelerde özetlenen değerlerden hareketle tahmin edilen dayanımlar; deney verilerine kıyasla SPE ve MPE düzeylerinde sıkıştırılan numunelerde daha düşük, ara enerji

düzeyinde kalan numunelerde ise daha yüksek çıkmaktadır. Sıkıştırılmış numuneler için ölçülen ve tahmin edilen değerlerin bir arada bulunduğu grafik Şekil 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.8. Sıkıştırılmış numunelerde UC deneyi (doymadan) sonucu ölçülen ve tahmin edilen serbest basınç dayanım değerlerinin birbirine göre durumu

4.2. Üç Eksenli Basınç Deneyleri

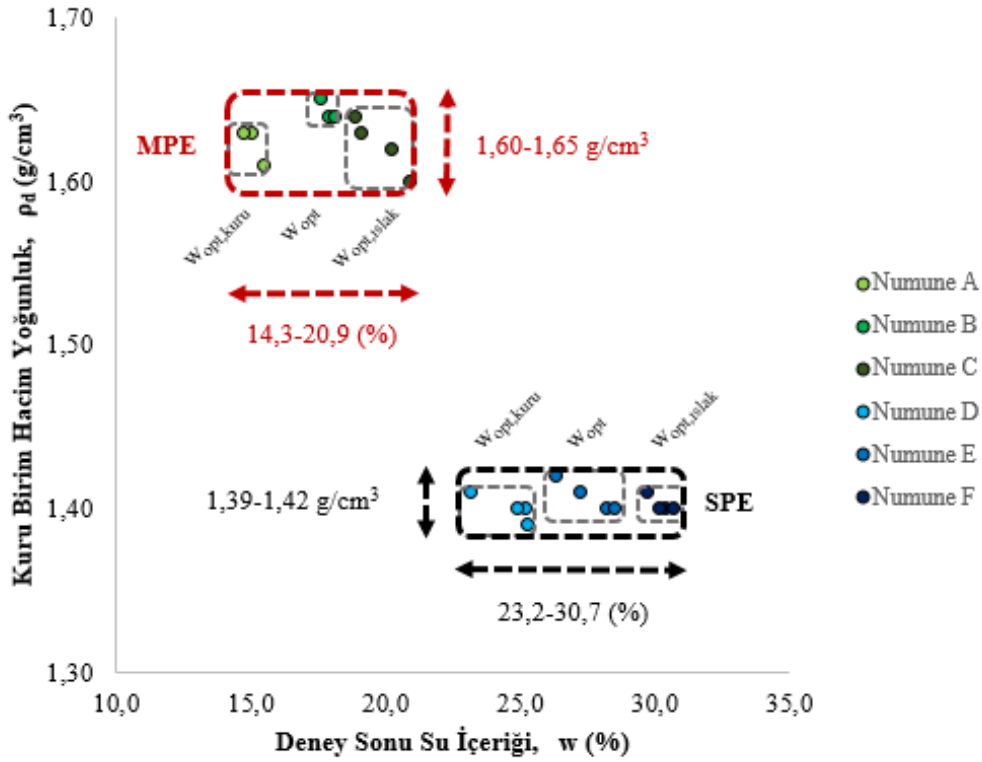
4.2.1. Konsolidasyonsuz – drenajsız (UU) tip deneyler

Konsolidasyonsuz - drenajsız (UU) olarak gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneylerinde numunelerin dakikada %1 birim deformasyon yapacağı standart kesme hızı uygulanmıştır.

SPE düzeyinde sıkıştırılan D, E ve F numunelerine ait deviyatör gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri EK-14, EK-15 ve EK-16’da, Mohr daireleri ve yenilme zarfları EK-17, EK-18 ve EK-19’da, deney sonu resimleri ise EK-20’de verilmiştir.

MPE düzeyinde sıkıştırılan A, B ve C numunelerine ait deviyatör gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri EK-21, EK-22 ve EK-23’te, Mohr daireleri ve yenilme zarfları EK-24, EK-25 ve EK-26’da, deney sonu resimleri ise EK-27’de sunulmuştur.

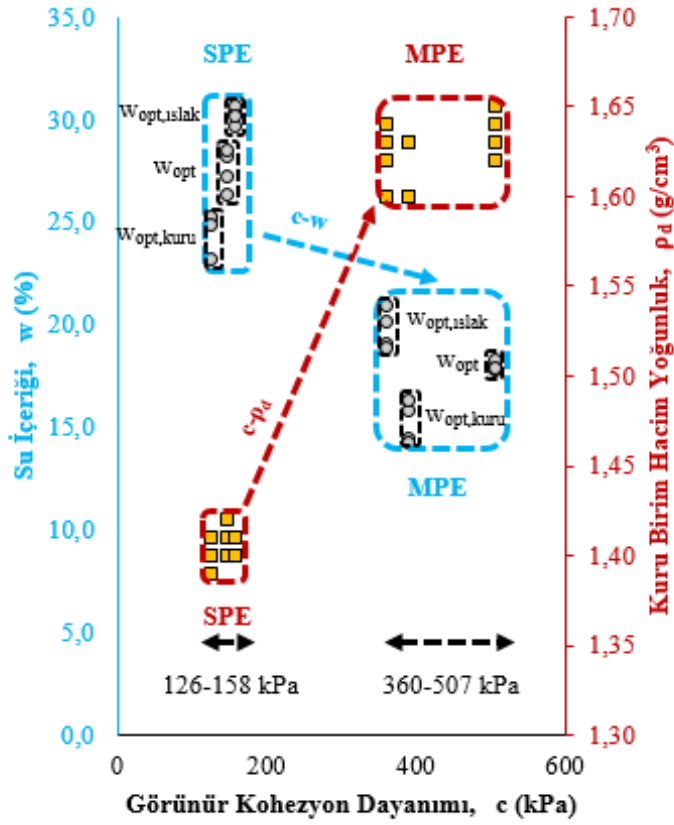
Numunelerin deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunluklarının değişimi Şekil 4.9’da; deney sonu görünür kohezyon dayanımı, içsel sürtünme açısı ve pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği - kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri ise Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doyurmadan) deney sonu su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukları

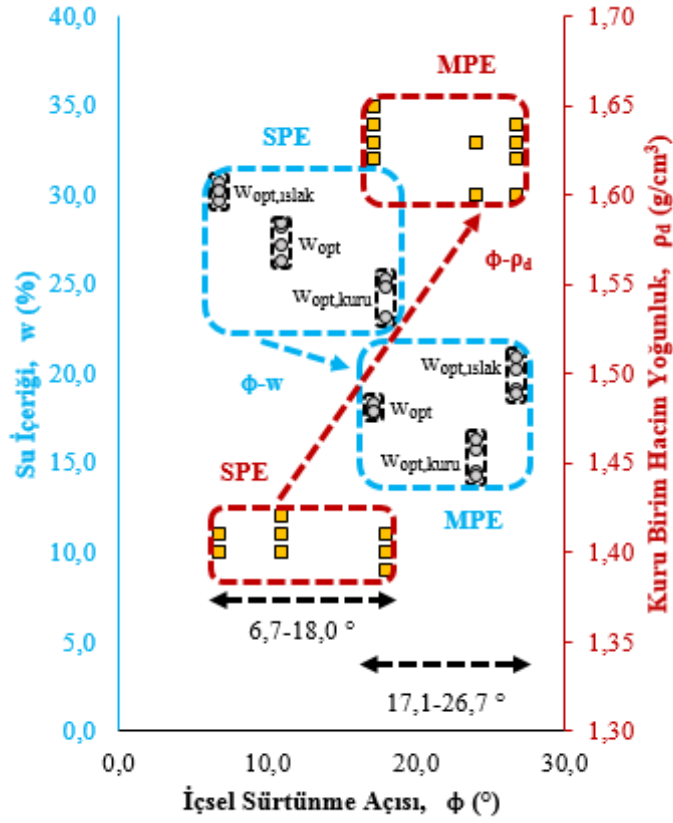
MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerin kuru birim hacim yoğunlukları 1,60-1,65 g/cm³ seviyelerinde iken SPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 1,39-1,42 g/cm³ civarındadır. Su içeriklerinin değişimleri de MPE düzeyindeki numunelerde %14,3-20,9 aralığında iken SPE düzeyinde ise %23,2-30,7 bandındadır.

Bu değerler dikkate alındığında deney sonu kuru birim hacim yoğunlukları, hedef kuru birim hacim yoğunluklarından %2 civarında; deney sonu su içerikleri ise hedef su içeriklerinden %1 oranında bir sapma göstermektedir.



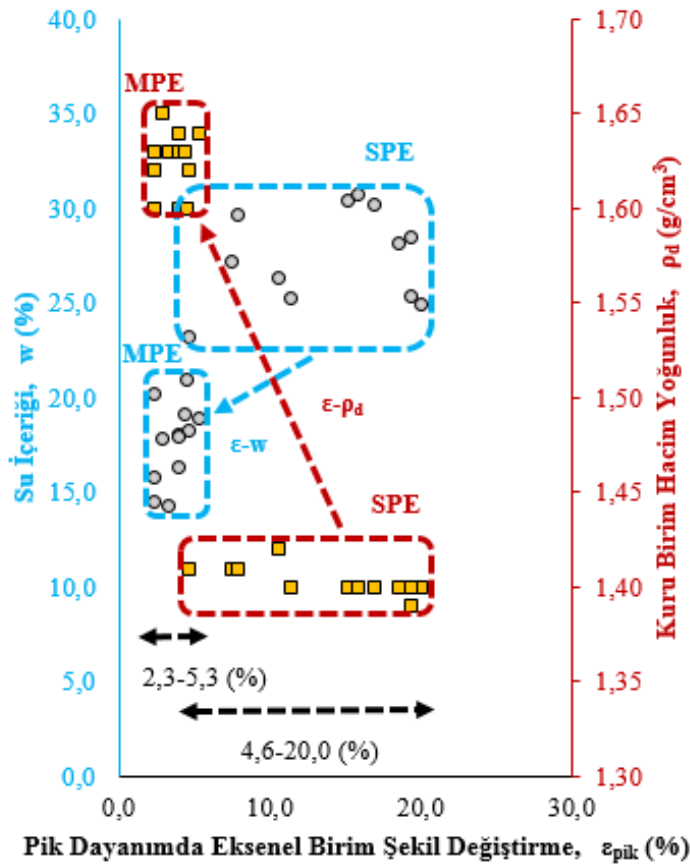
Şekil 4.10. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doymadan) görünür kohezyon dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.10'da görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için görünür kohezyon dayanımları 120-160 kPa arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 360-500 kPa bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte görünür kohezyon dayanımları da ortalama 140 kPa seviyelerinden yaklaşık 3 kat artarak 420 kPa düzeyine çıkmaktadır.



Şekil 4.11. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doyurmadan) içsel sürtünme açılarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.11’de görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için içsel sürtünme açıları 6-18° arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 17-27° bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte içsel sürtünme açıları da ortalama 12° seviyelerinden 23° düzeyine çıkmaktadır. Yüksek sıkıştırma enerjisi ile zemin yapısı değiştiğinden dolayı içsel sürtünme açısında belirgin bir artış oluşmaktadır.



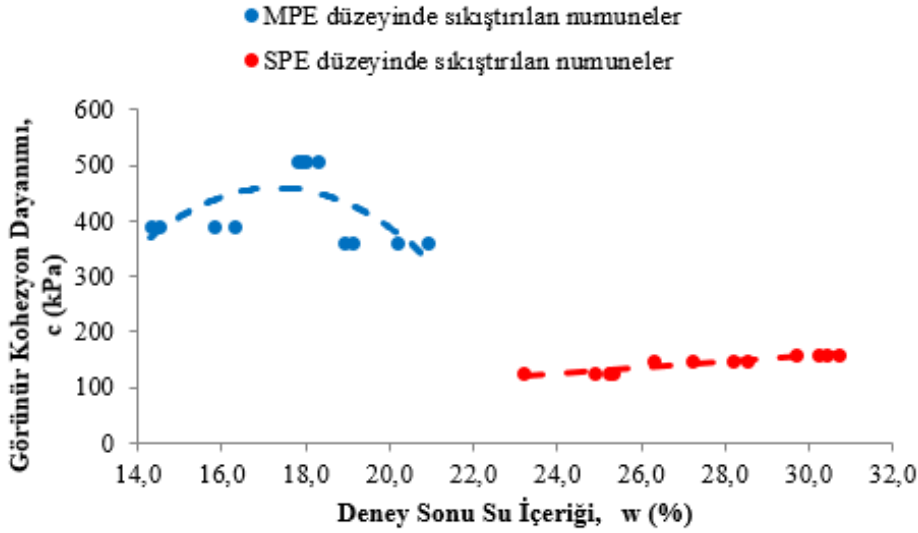
Şekil 4.12. Sıkıştırılmış numunelerin UU deneyi (doymadan) pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.12’de görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmeler %4-20 arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise %2-5 bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmeler ortalama %14 seviyelerinden %4 düzeyine düşmektedir.

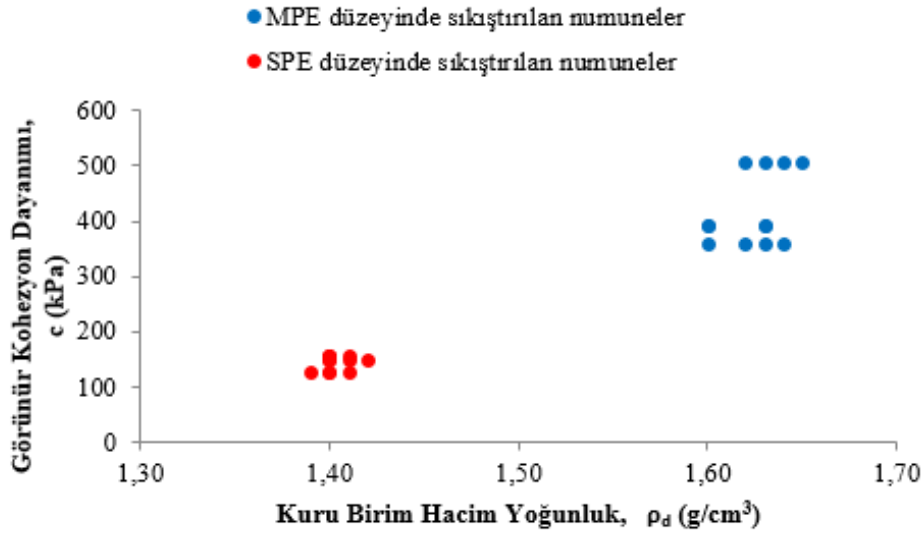
Enerji düzeyindeki değişimlere bağlı olarak numunelerin mukavemet parametrelerinin değişimi

Konsolidasyonsuz - drenajsız (UU) tip deneylerde numuneye uygulanan her bir çevre basıncına ait maksimum ve minimum asal gerilmeler, kayma gerilmesi – normal gerilme grafiğine işlenerek oluşturulan Mohr dairelerinden yenilme zarfları elde edilmiştir.

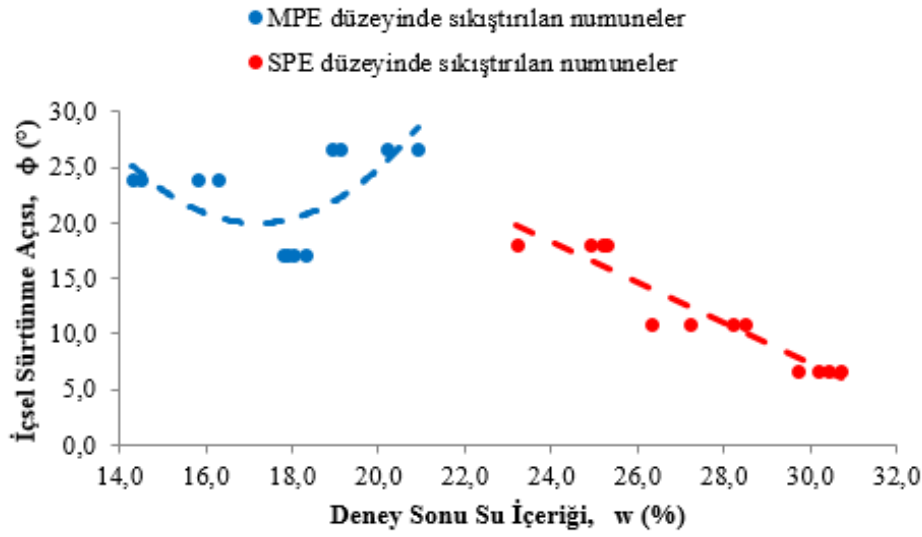
Enerji düzeylerindeki değişime bağlı olarak görünür kohezyon dayanımındaki değişimler Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te içsel sürtünme açılarındaki değişimler ise Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da sunulmuştur.



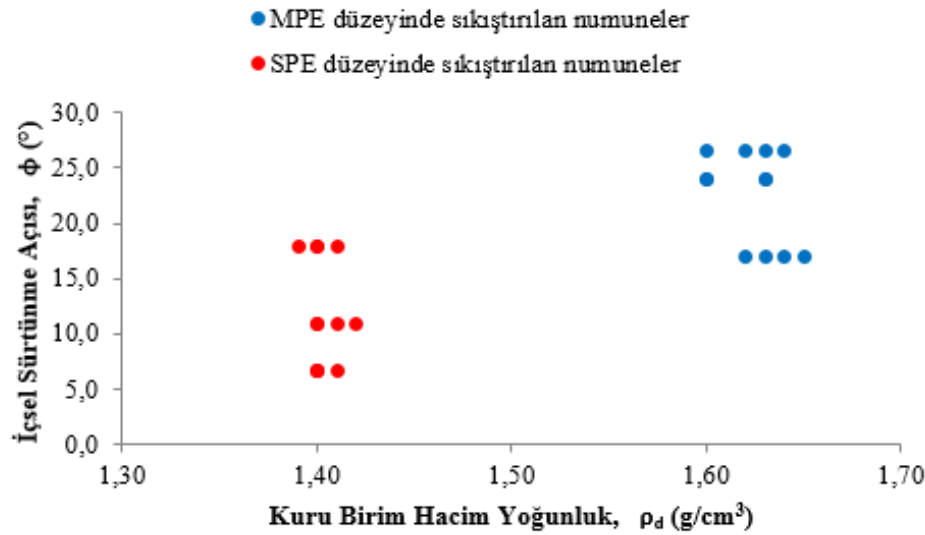
Şekil 4.13. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doymadan) görünür kohezyon dayanımının deney sonu su içeriği ile değişimi



Şekil 4.14. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doymadan) görünür kohezyon dayanımının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi



Şekil 4.15. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doyurmadan) içsel sürtünme açısının deney sonu su içeriği ile değişimi



Şekil 4.16. Enerji düzeyi değişimleriyle UU deneyi (doyurmadan) içsel sürtünme açısının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi

Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte görünür kohezyon dayanımları yaklaşık 3 kat içsel sürtünme açıları ise 2 kat civarında bir artış göstermektedir. Enerji düzeyinin değişimiyle birlikte numunelerin su içerikleri yaklaşık %35 azalmakta ve kuru birim hacim yoğunlukları ise %15 civarında artmaktadır.

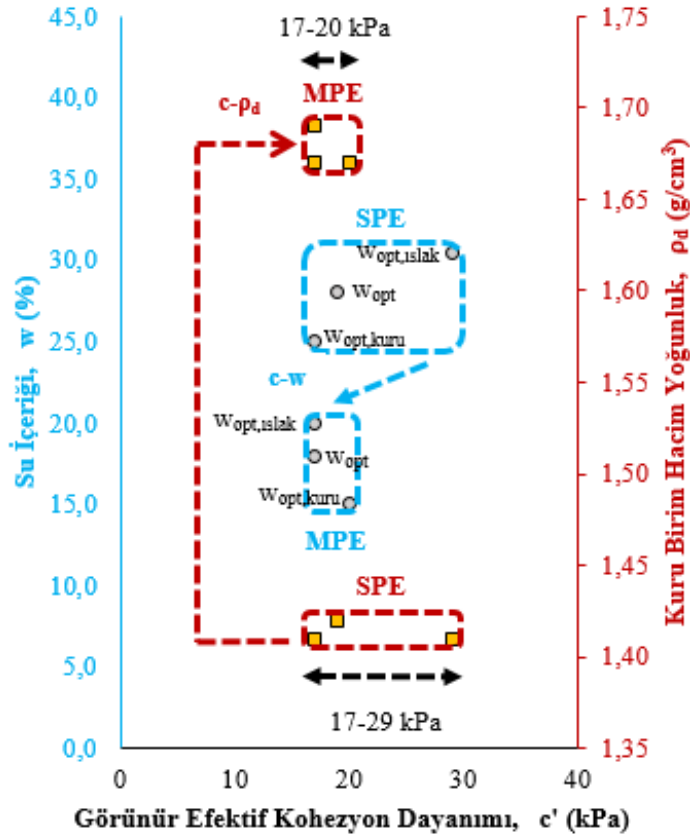
4.2.2. Konsolidasyonlu – drenajlı (CD) tip deneyler

Konsolidasyonlu - drenajlı (CD) tip deneylerde numuneler, doyurma aşamasını takiben istenilen çevre basıncında konsolide edilip %90 konsolidasyon zamanı (t_{90}) göz önünde bulundurularak grafiklerinden elde edilen hızlarla kesmeye bırakılmıştır.

SPE düzeyinde sıkıştırılan D, E ve F numunelerine ait deviyatör gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri EK-28, EK-29 ve EK-30’da, Mohr daireleri ve yenilme zarfları EK-31, EK-32 ve EK-33’te verilmiştir.

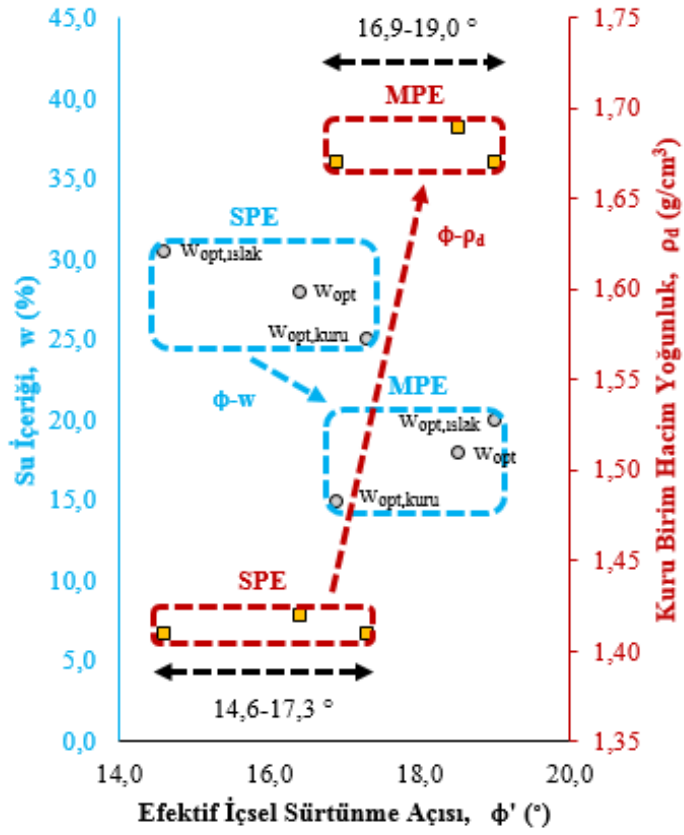
MPE düzeyinde sıkıştırılan A, B ve C numunelerine ait deviyatör gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri ise EK-34, EK-35 ve EK-36’da, Mohr daireleri ve yenilme zarfları EK-37, EK-38 ve EK-39’da sunulmuştur.

Numunelerin deney sonu görünür efektif kohezyon dayanımı, efektif içsel sürtünme açısı ve pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği - kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri ise Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir.



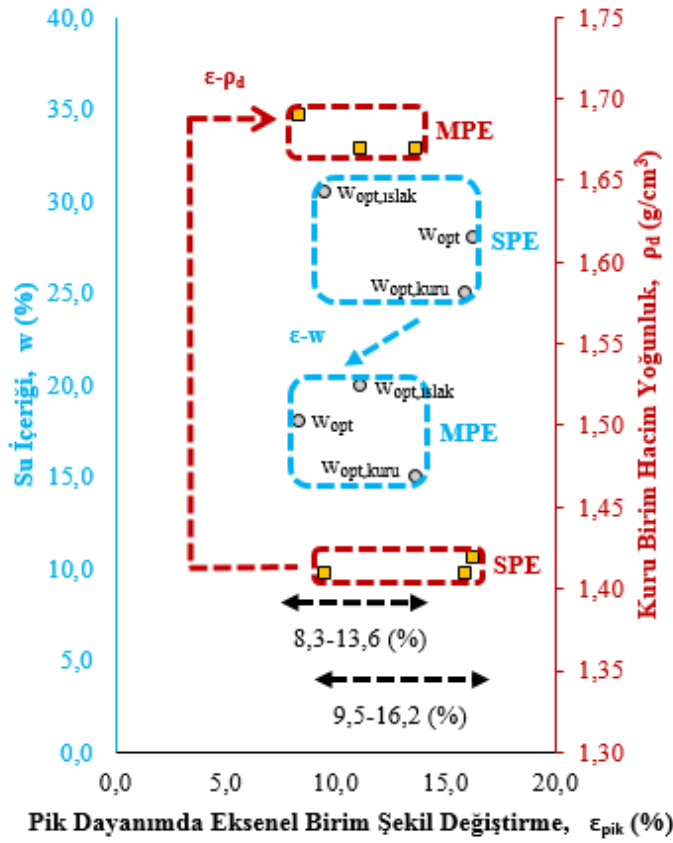
Şekil 4.17. Sıkıştırılmış numunelerin CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.17’de görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için görünür efektif kohezyon dayanımları 15-30 kPa arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 15-20 kPa bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte görünür efektif kohezyon dayanımları ortalama 22 kPa seviyelerinden 18 kPa düzeyine düşmektedir.



Şekil 4.18. Sıkıştırılmış numunelerin CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açılarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.18'de görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için efektif içsel sürtünme açıları 14-17° arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 17-19° bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte efektif içsel sürtünme açıları da ortalama 16° seviyelerinden 18° düzeyine çıkmaktadır.



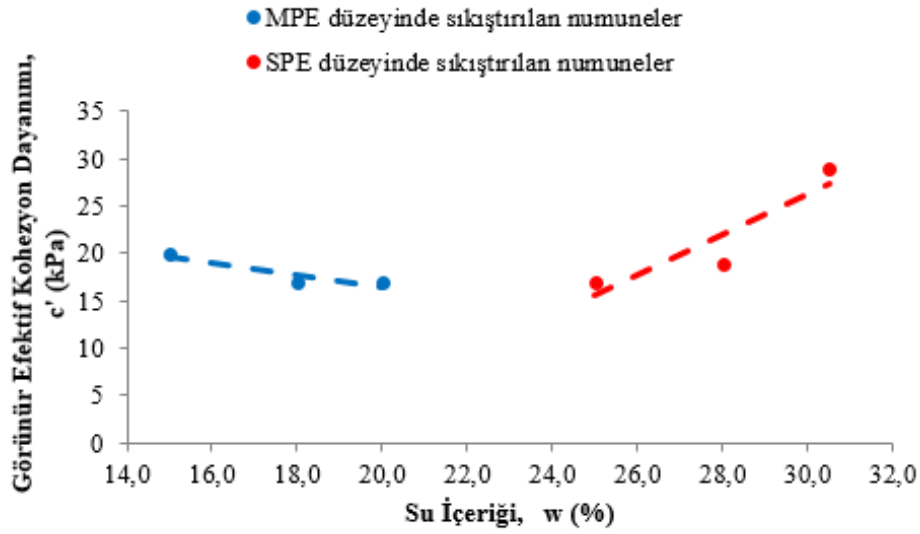
Şekil 4.19. Sıkıştırılmış numunelerin CD deneyi (doğurarak) pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.19’da görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmeler %10-17 arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise %8-14 bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte pik dayanımda eksenel birim şekil değiştirmeler ortalama %14 seviyelerinden %11 düzeyine düşmektedir.

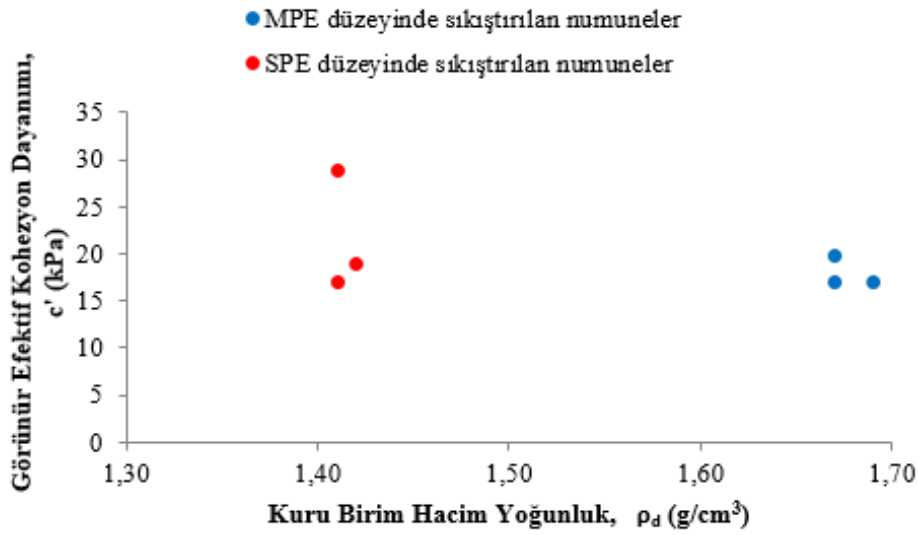
Enerji düzeyindeki değişimlere bağlı olarak numunelerin mukavemet parametrelerinin değişimi

Konsolidasyonlu - drenajlı (CD) tip deneylerde numuneye uygulanan her bir çevre basıncına ait maksimum ve minimum asal gerilmeler, kayma gerilmesi – normal gerilme grafiğine işlenerek oluşturulan Mohr dairelerinden yenilme zarfları elde edilmiştir.

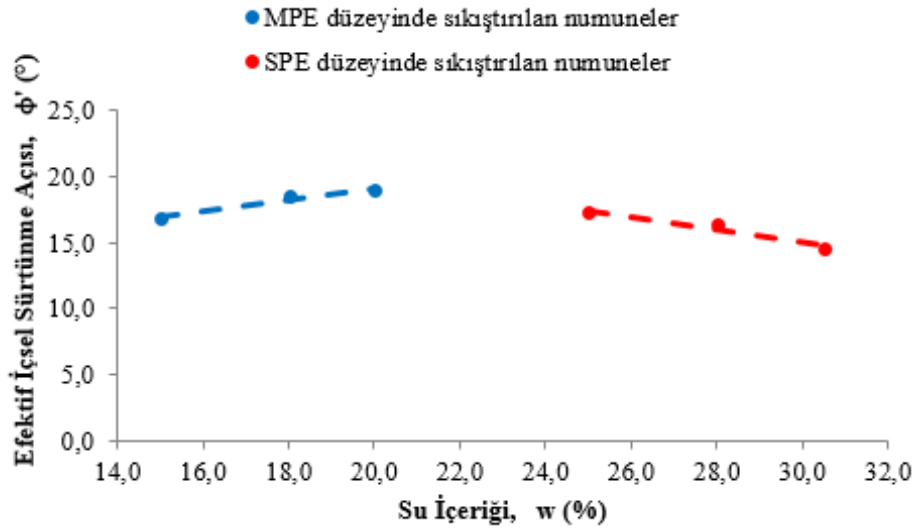
Enerji düzeylerindeki değişime bağlı olarak görünür efektif kohezyon dayanımlarındaki değişimler Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de efektif içsel sürtünme açılarındaki değişimler ise Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te sunulmuştur.



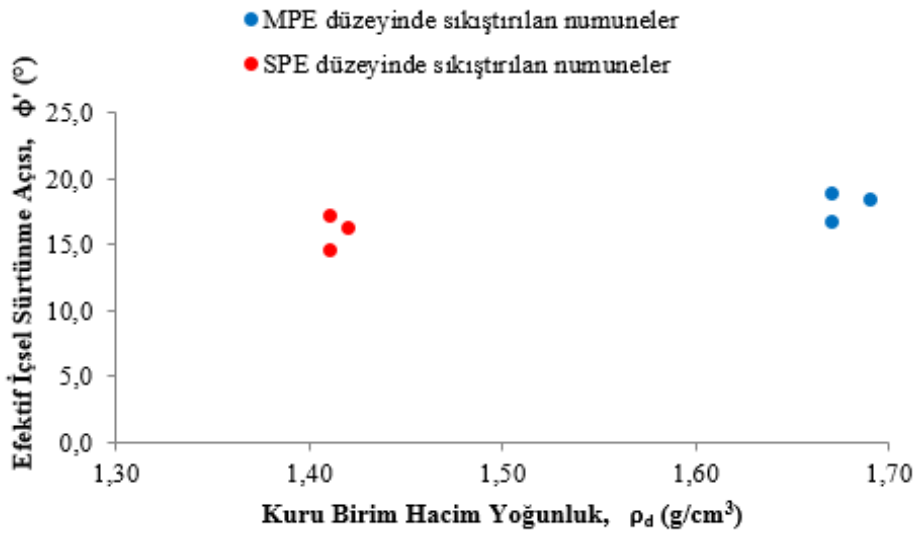
Şekil 4.20. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının su içeriği ile değişimi



Şekil 4.21. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi



Şekil 4.22. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının su içeriği ile değişimi



Şekil 4.23. Enerji düzeyi değişimleriyle CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi

Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte ortalama görünür efektif kohezyon dayanımı yaklaşık 1,2 kat azalırken, ortalama efektif içsel sürtünme açısı ise 1,1 kat civarında artış göstermektedir. Enerji düzeyinin değişimiyle birlikte numunelerin su içerikleri yaklaşık %35 azalmakta ve kuru birim hacim yoğunlukları ise %15 civarında artmaktadır.

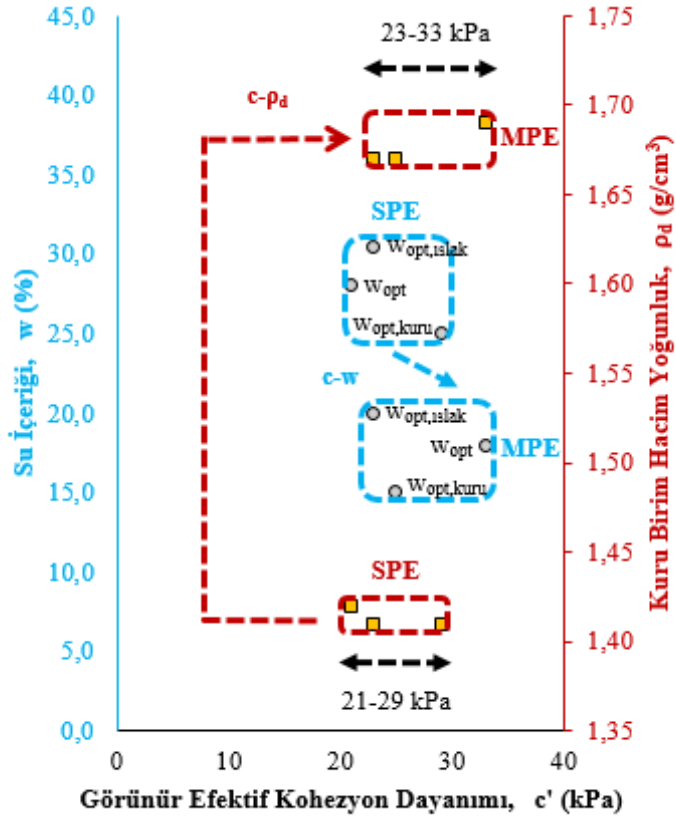
4.2.3. Aşamalı konsolidasyonlu – drenajlı (aşamalı CD) tip deneyler

BS 1377 standardı uyarınca aşamalı olarak gerçekleştirilen konsolidasyonlu – drenajlı (CD) tip deneylerinde de ilk çevre basıncı için geleneksel CD tip deneylere benzer şekilde doyurma, konsolidasyon ve kesme aşamaları takip edilmiştir. Ayrıca deneylerde kesme aşaması dikkatle izlenilmiş ve numunede kırılma gözlemlendiği tespit edilince ilgili deney sonlandırılmıştır. Kesme aşamasıyla sonlandırılan ilk deneyin verileri (her bir aşama sonunda kaydedilen deplasmanlar, numunenin hacimsel değişimi vb.) kullanılarak numunenin nihai boy ve çap değerlerinin hesaplanmasıyla diğer basınç kademesi için deneye başlanılmıştır. Aşamalı deneylerdeki tek fark, kalan çevre basınçlarının da ilk çevre basıncında kullanılan numune üzerinden yürütülmesi ve ikinci çevre basıncından itibaren deneylere konsolidasyon aşamasıyla başlanıyor olmasıdır.

SPE düzeyinde sıkıştırılan D, E ve F numunelerine ait deviyatör gerilme – aksenal birim şekil değiştirme ilişkileri EK-40, EK-41 ve EK-42’de, Mohr daireleri ve yenilme zarfları EK-43, EK-44 ve EK-45’te verilmiştir.

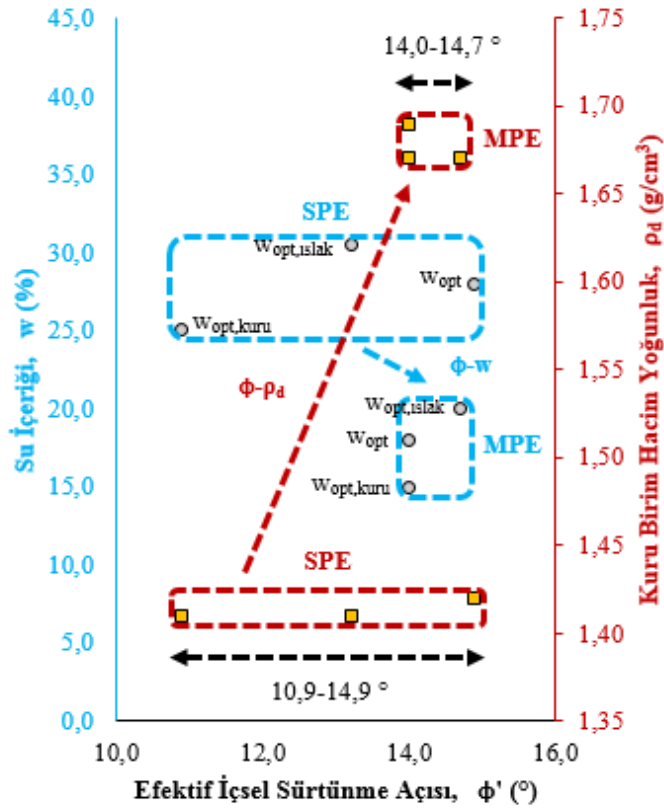
MPE düzeyinde sıkıştırılan A, B ve C numunelerine ait deviyatör gerilme – aksenal birim şekil değiştirme ilişkileri ise EK-46, EK-47 ve EK-48’de, Mohr daireleri ve yenilme zarfları EK-49, EK-50 ve EK-51’de sunulmuştur.

Numunelerin deney sonu görünür efektif kohezyon dayanımı, efektif içsel sürtünme açısı ve pik dayanımda aksenal birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği - kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri ise Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.



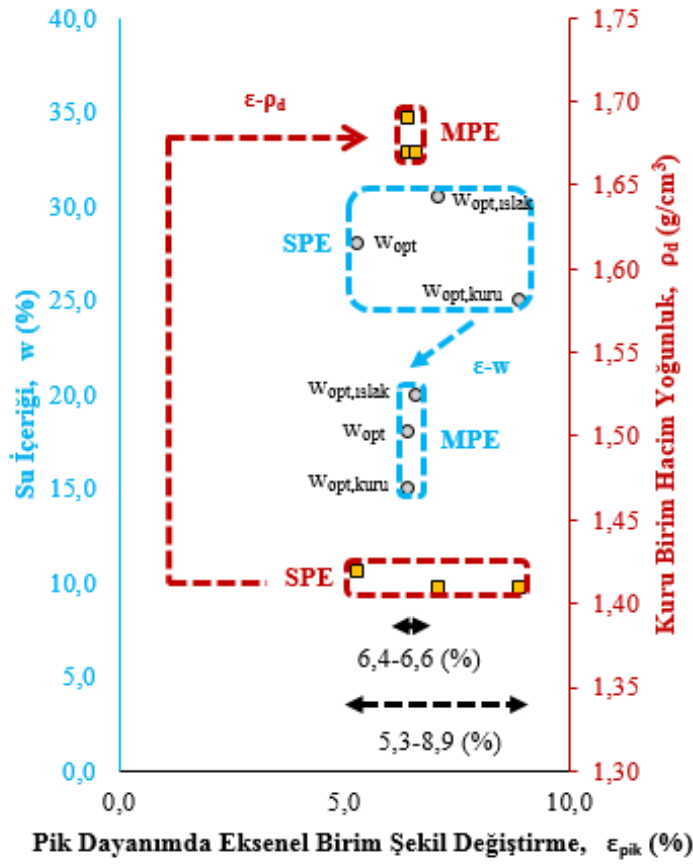
Şekil 4.24. Sıkıştırılmış numunelerin aşamalı CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımlarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.24'te görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için görünür efektif kohezyon dayanımları 20-30 kPa arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 25-35 kPa bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte görünür efektif kohezyon dayanımları da ortalama 24 kPa seviyelerinden 27 kPa düzeyine çıkmaktadır.



Şekil 4.25. Sıkıştırılmış numunelerin aşamalı CD deneyi (doğurarak) efektif içsel sürtünme açılarının, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.25'te görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için efektif içsel sürtünme açıları 11-15° arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise 14-15° bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte efektif içsel sürtünme açıları da ortalama 13° seviyelerinden 14° düzeyine çıkmaktadır.



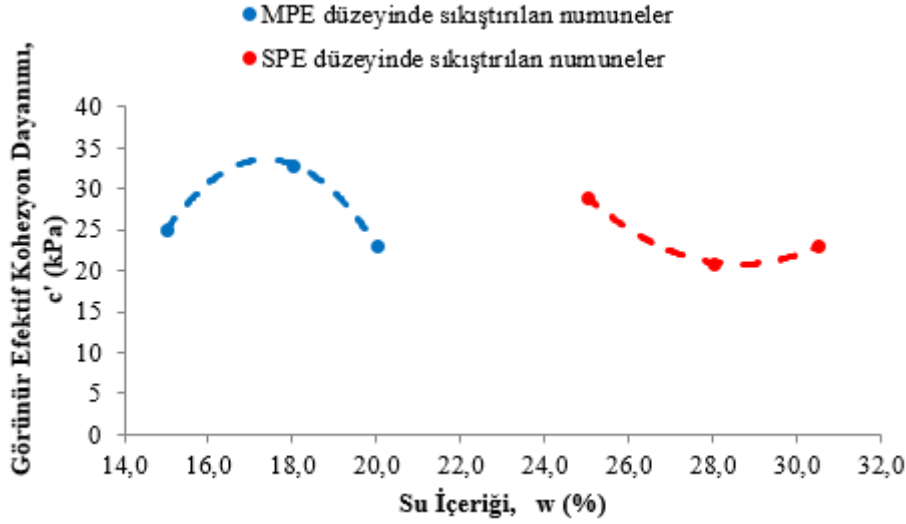
Şekil 4.26. Sıkıştırılmış numunelerin aşamalı CD deneyi (doyurarak) pik dayanımında eksenel birim şekil değiştirmelerinin, su içeriği ve kuru birim hacim yoğunlukla değişimleri

Şekil 4.26'da görüleceği üzere SPE düzeyinde sıkıştırılan numuneler için pik dayanımında eksenel birim şekil değiştirmeler %5-9 arasında değişim gösterirken MPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde ise %6-7 bandında yer almaktadır. Yani sıkıştırma enerjisindeki artışla birlikte pik dayanımında eksenel birim şekil değiştirmeler ortalama %7 seviyelerinden %6 düzeyine düşmektedir.

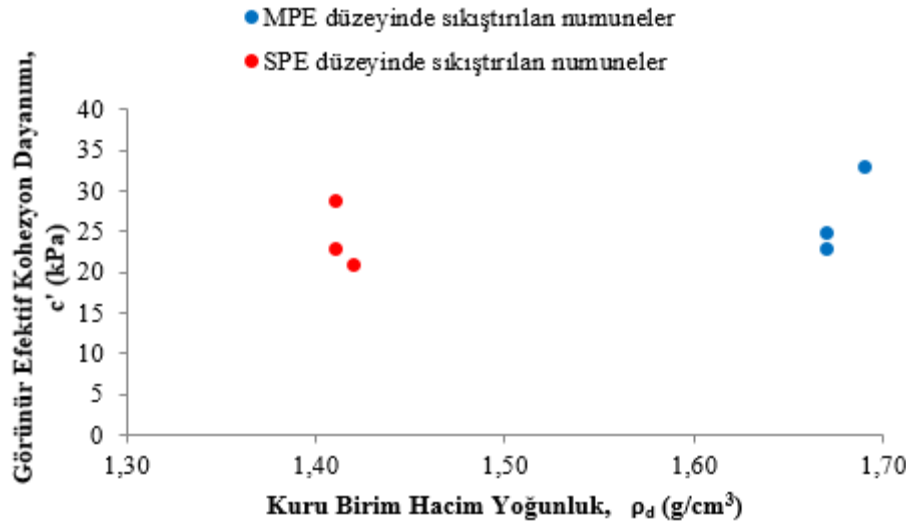
Enerji düzeyindeki değişimlere bağlı olarak numunelerin mukavemet parametrelerinin değişimi

Aşamalı konsolidasyonlu - drenajlı (aşamalı CD) tip deneylerde numuneye uygulanan her bir çevre basıncına ait maksimum ve minimum asal gerilmeler, kayma gerilmesi – normal gerilme grafiğine işlenerek oluşturulan Mohr dairelerinden yenilme zarfları elde edilmiştir.

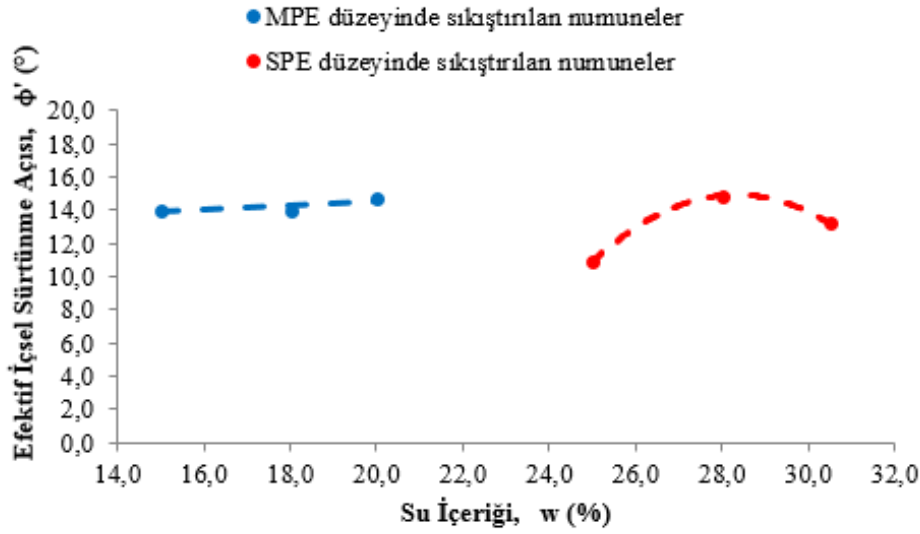
Enerji düzeylerindeki değişime bağlı olarak görünür efektif kohezyon dayanımlarındaki değişimler Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de efektif içsel sürtünme açılarındaki değişimler ise Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da sunulmuştur.



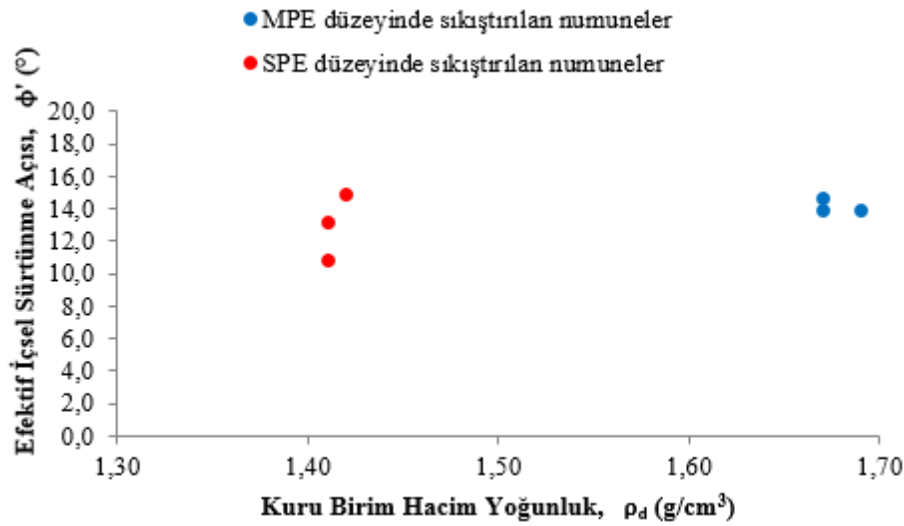
Şekil 4.27. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının su içeriği ile değişimi



Şekil 4.28. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) görünür efektif kohezyon dayanımının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi



Şekil 4.29. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının deney sonu su içeriği ile değişimi



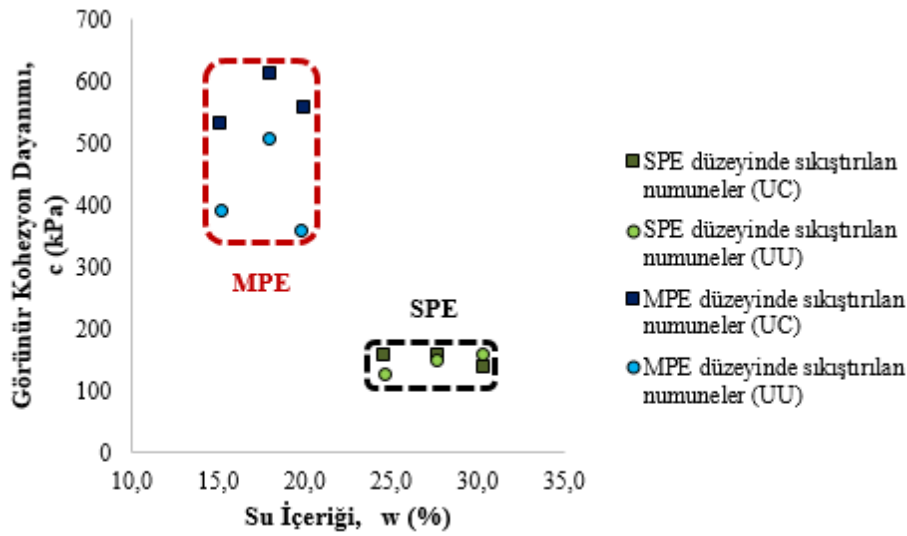
Şekil 4.30. Enerji düzeyi değişimleriyle aşamalı CD deneyi (doyurarak) efektif içsel sürtünme açısının kuru birim hacim yoğunluk ile değişimi

Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte hem ortalama görünür efektif kohezyon dayanımı hem de ortalama efektif içsel sürtünme açısı 1,1 kat civarında artış göstermektedir. Enerji düzeyinin değişimiyle birlikte numunelerin su içerikleri yaklaşık %35 azalmakta ve kuru birim hacim yoğunlukları ise %15 civarında artmaktadır.

4.3. Dayanım Deneyleri Mukavemet Parametrelerinin Birbirleriyle İlişkilendirilmesi

4.3.1. Serbest basınç deneyi (UC) – üç eksenli basınç deneyi (UU)

Serbest basınç deneyleri ile UU tipi üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen görünür kohezyon dayanımları Şekil 4.31’de sunulmuştur.

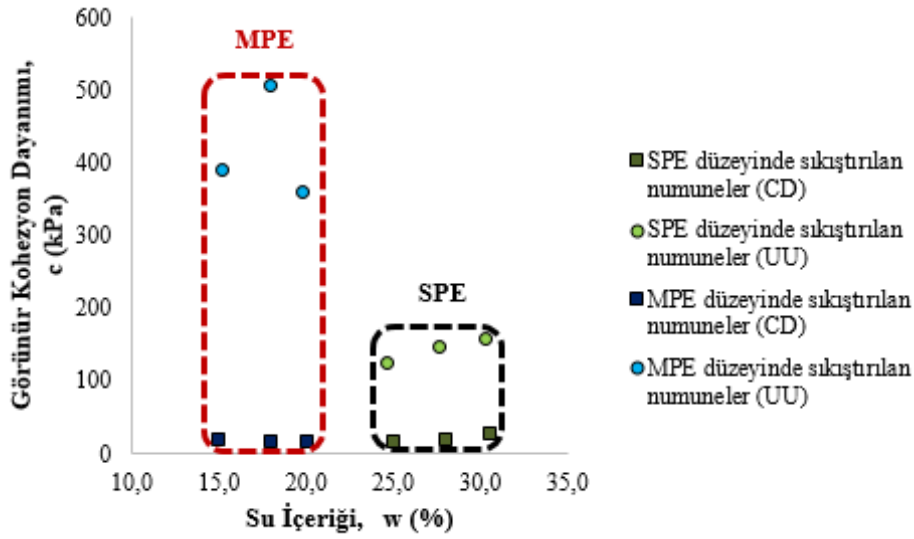


Şekil 4.31. Sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) ve UU (doymadan) deneylerinden elde edilen görünür kohezyon dayanımlarının değişimi

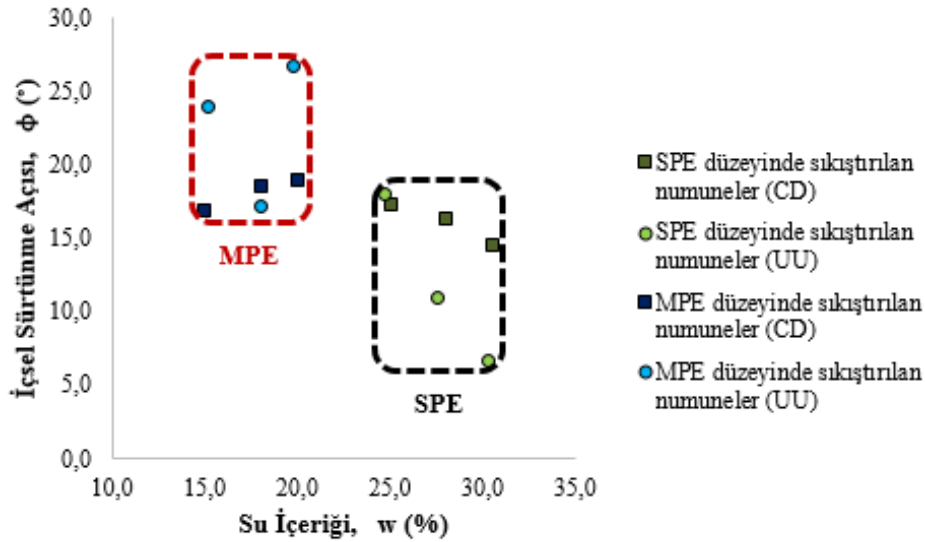
SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, serbest basınç deneylerinden ortalama 150 kPa dayanım elde edilirken UU tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 140 kPa civarındadır. Benzer şekilde MPE düzeyinde hazırlanan numuneler için serbest basınç deneylerinden ortalama 550 kPa dayanım elde edilirken UU tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 420 kPa dolaylarındadır.

4.3.2. Üç eksenli basınç deneyi (UU) – üç eksenli basınç deneyi (CD)

UU ve CD tipi üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen görünür kohezyon dayanımları ve içsel sürtünme açıları Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’te sunulmuştur. Ayrıca numunelere uygulanan sıkıştırma enerjisi ve numunelerin optimum su içeriğinde veya optimum su içeriğinin kuru ya da ıslak tarafında hazırlanmış olmasına bağlı olarak Mohr dairelerinin birbirleriyle olan değişimleri de Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da verilmiştir.



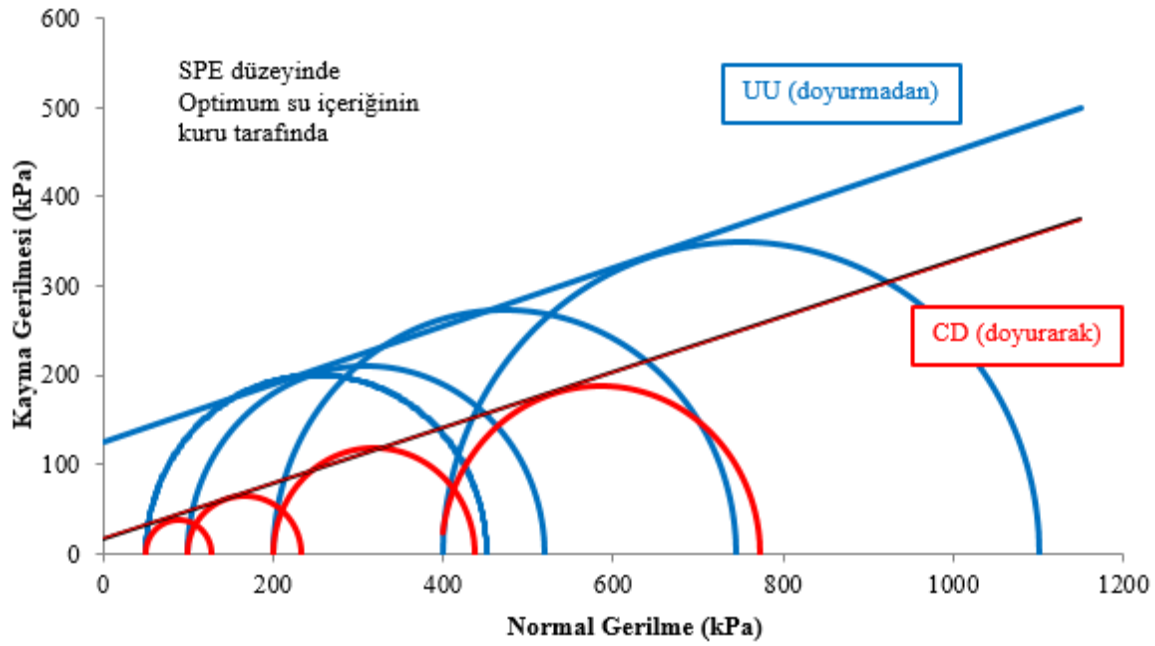
Şekil 4.32. Sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen görünür kohezyon dayanımlarının değişimi



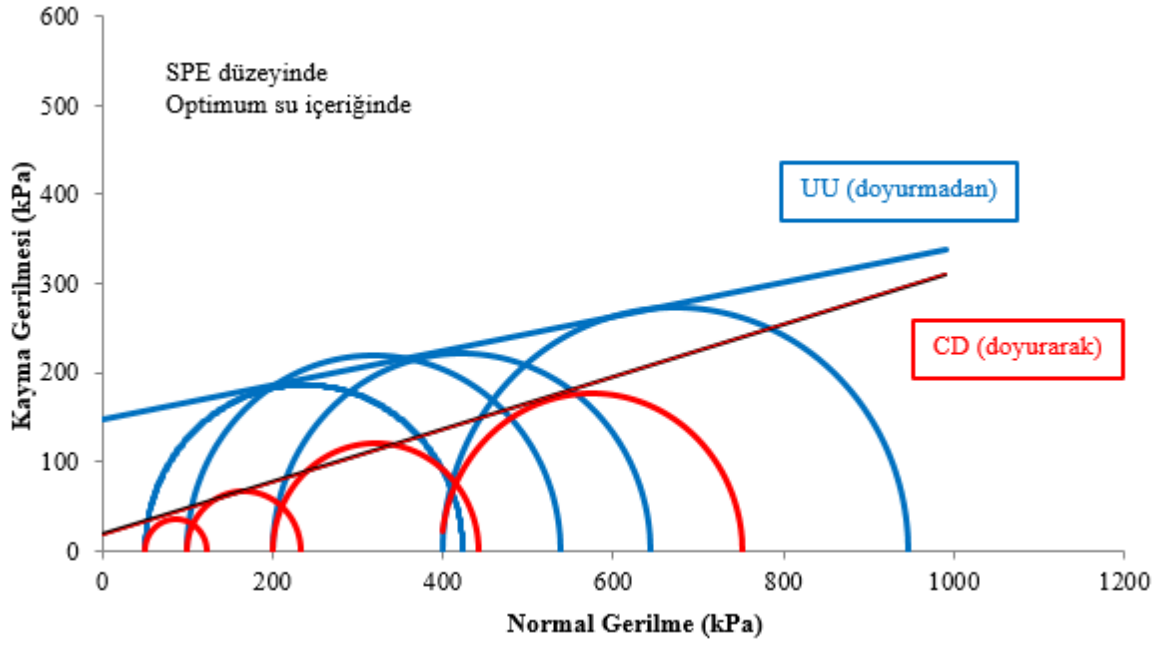
Şekil 4.33. Sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açılarının değişimi

Genel itibariyle görünür kohezyon dayanımları, uzun dönemde yani drenajlı durumda kısa dönem parametrelerine göre çok daha küçüktür. Şöyle ki SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, UU tip deneylerinden ortalama 140 kPa dayanım elde edilirken CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 22 kPa civarındadır. Benzer şekilde MPE düzeyinde hazırlanan numuneler için UU tip deneylerinden ortalama 420 kPa dayanım elde edilirken CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 18 kPa dolaylarındadır.

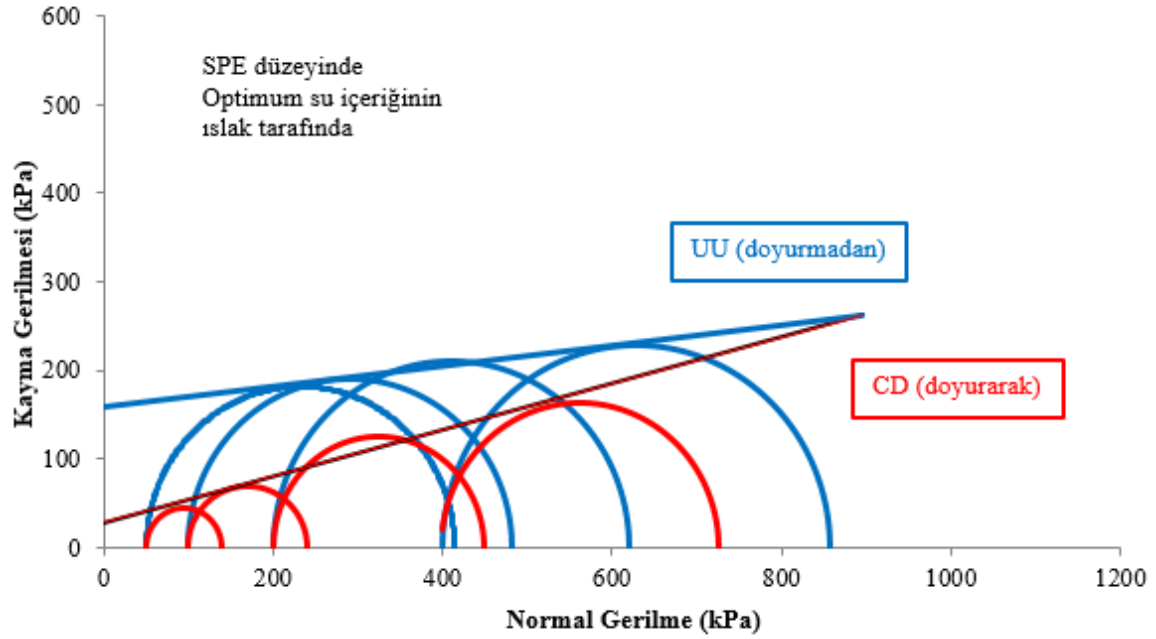
Uzun ve kısa dönemde içsel sürtünme açıları arasındaki değişimler çok net olmamakla birlikte SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, UU tip deneylerinden ortalama 12° lik içsel sürtünme açısı elde edilirken CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 16° civarındadır. Benzer şekilde MPE düzeyinde hazırlanan numuneler için UU tip deneylerinden ortalama 23° lik içsel sürtünme açısı elde edilirken CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 18° dolaylarındadır.



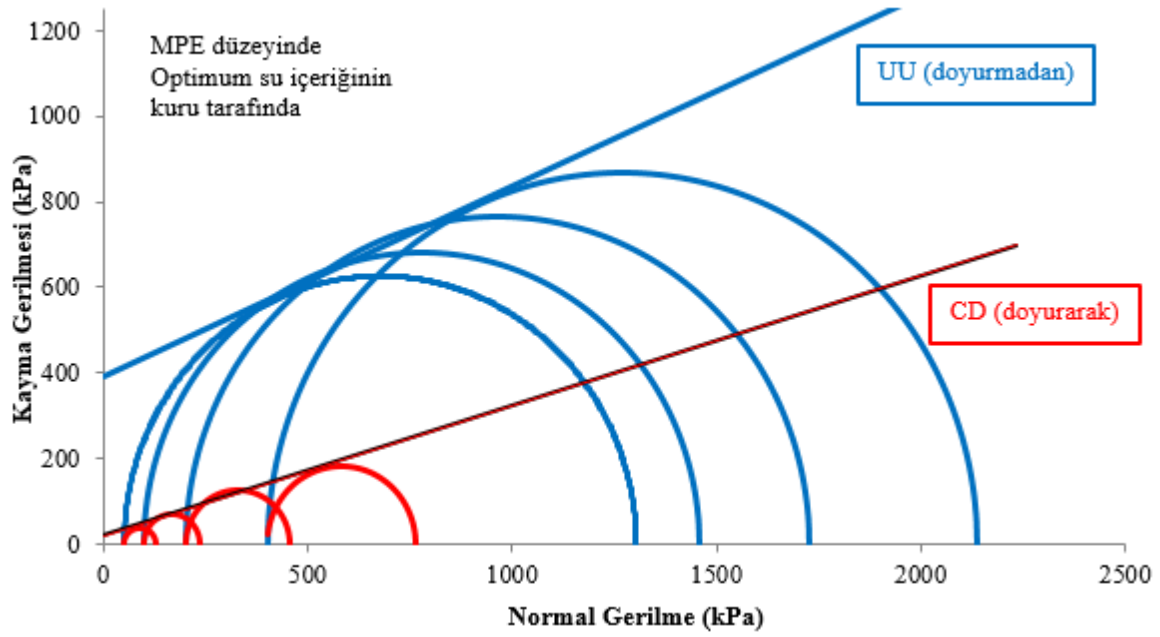
Şekil 4.34. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



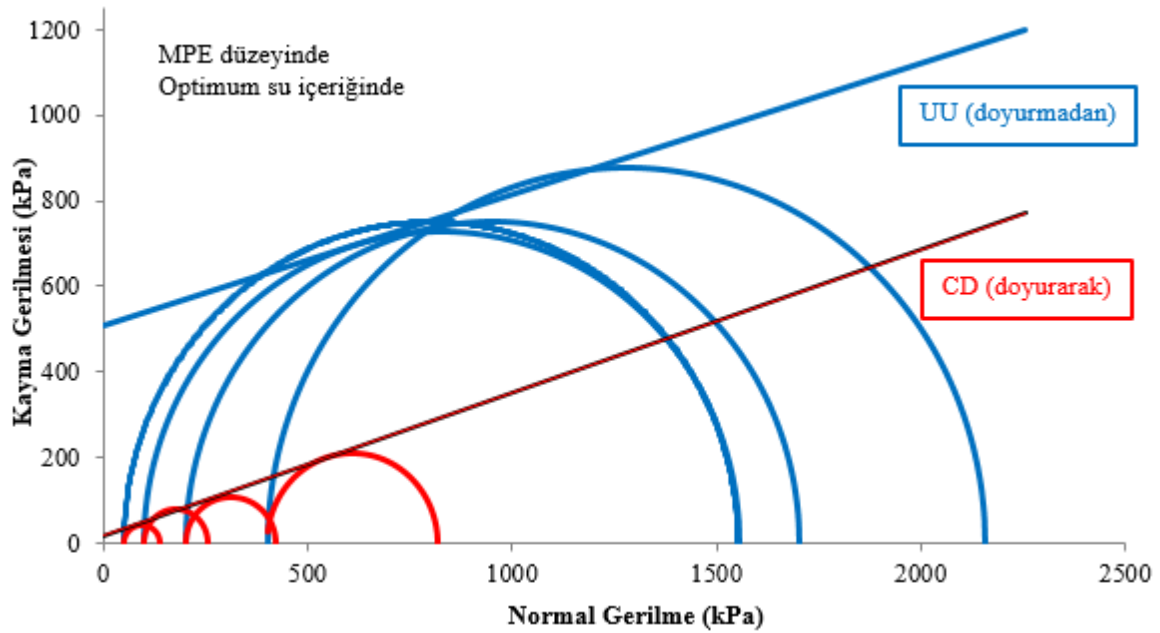
Şekil 4.35. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



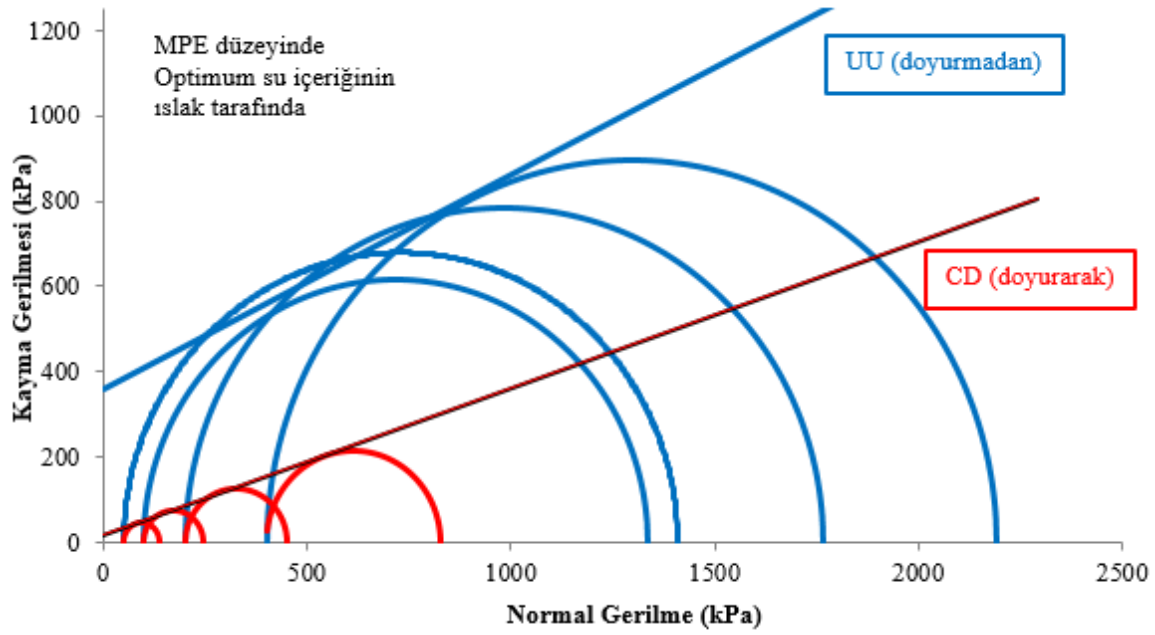
Şekil 4.36. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



Şekil 4.37. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



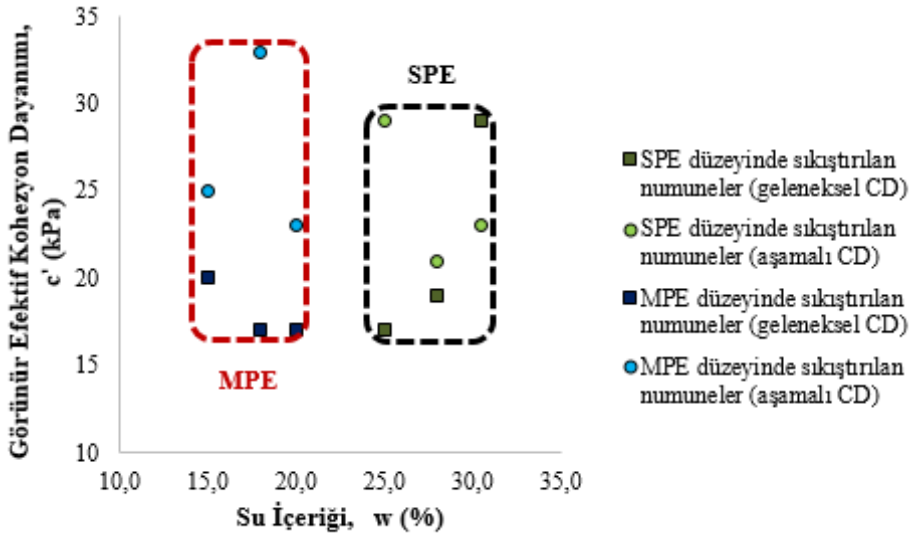
Şekil 4.38. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



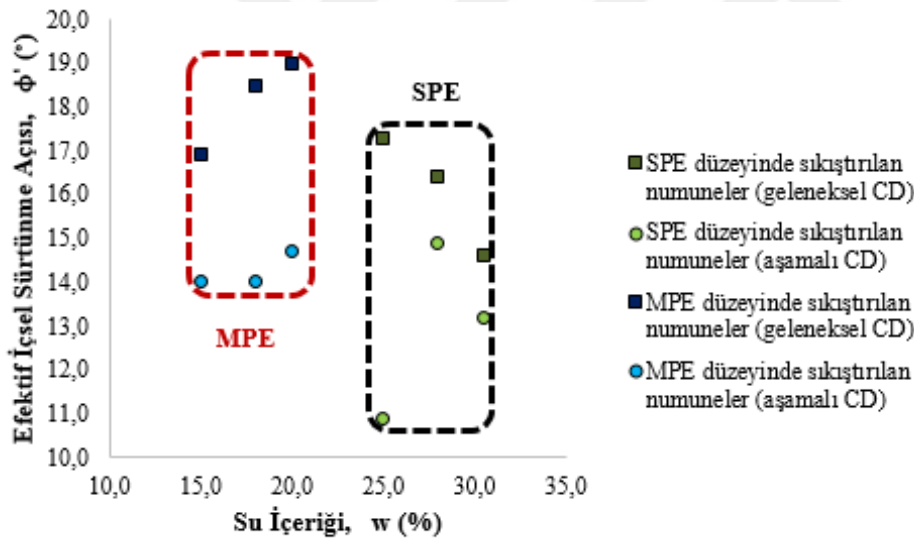
Şekil 4.39. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) ve CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları

4.3.3. Üç eksenli basınç deneyi (geleneksel CD) – üç eksenli basınç deneyi (aşamalı CD)

Geleneksel CD ve aşamalı CD tipi üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen görünür efektif kohezyon dayanımları ve içsel sürtünme açıları Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de sunulmuştur. Ayrıca numunelere uygulanan sıkıştırma enerjisi ve numunelerin optimum su içeriğinde veya optimum su içeriğinin kuru ya da ıslak tarafında hazırlanmış olmasına bağlı olarak Mohr dairelerinin birbirleriyle olan değişimleri de Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de verilmiştir.



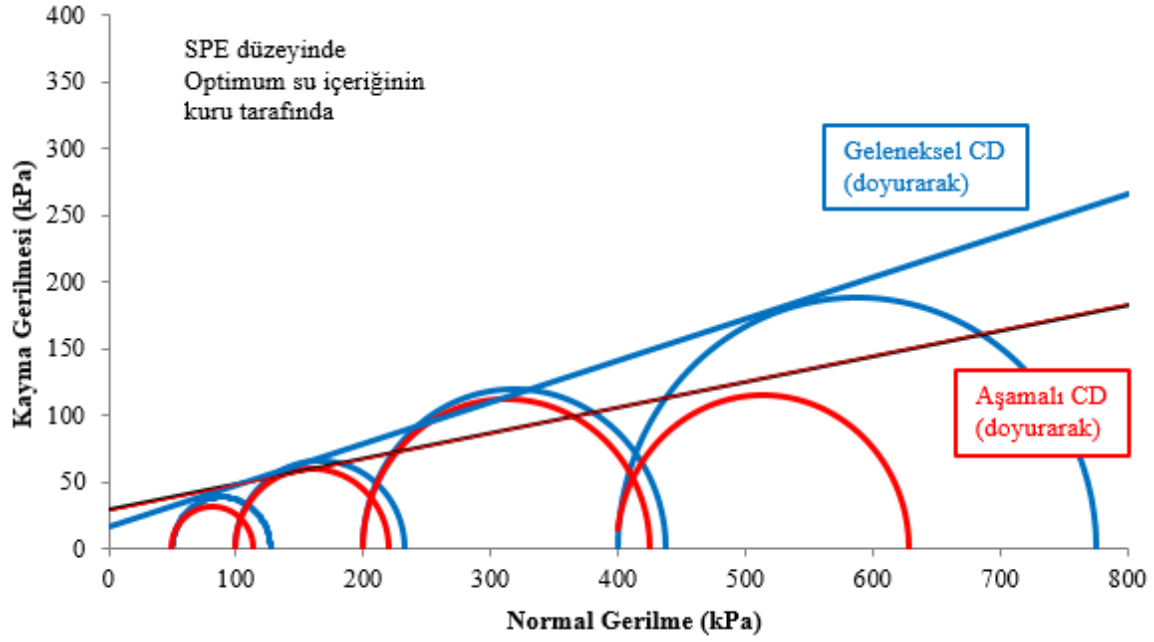
Şekil 4.40. Sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen görünür efektif kohezyon dayanımlarının değişimi



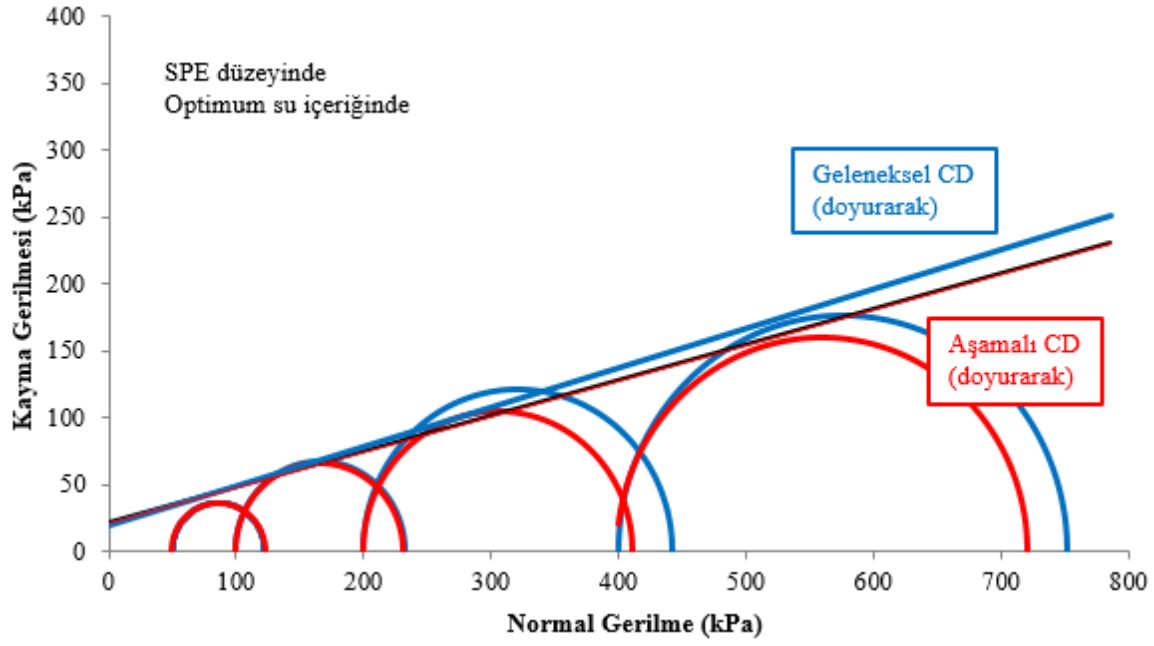
Şekil 4.41. Sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen efektif içsel sürtünme açılarının değişimi

SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, geleneksel CD tip deneylerinden ortalama 22 kPa görünür efektif kohezyon dayanımı elde edilirken aşamalı CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 24 kPa civarındadır. Benzer şekilde MPE düzeyinde hazırlanan numuneler için geleneksel CD tip deneylerinden ortalama 18 kPa görünür efektif kohezyon dayanımı elde edilirken aşamalı CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 27 kPa dolaylarındadır.

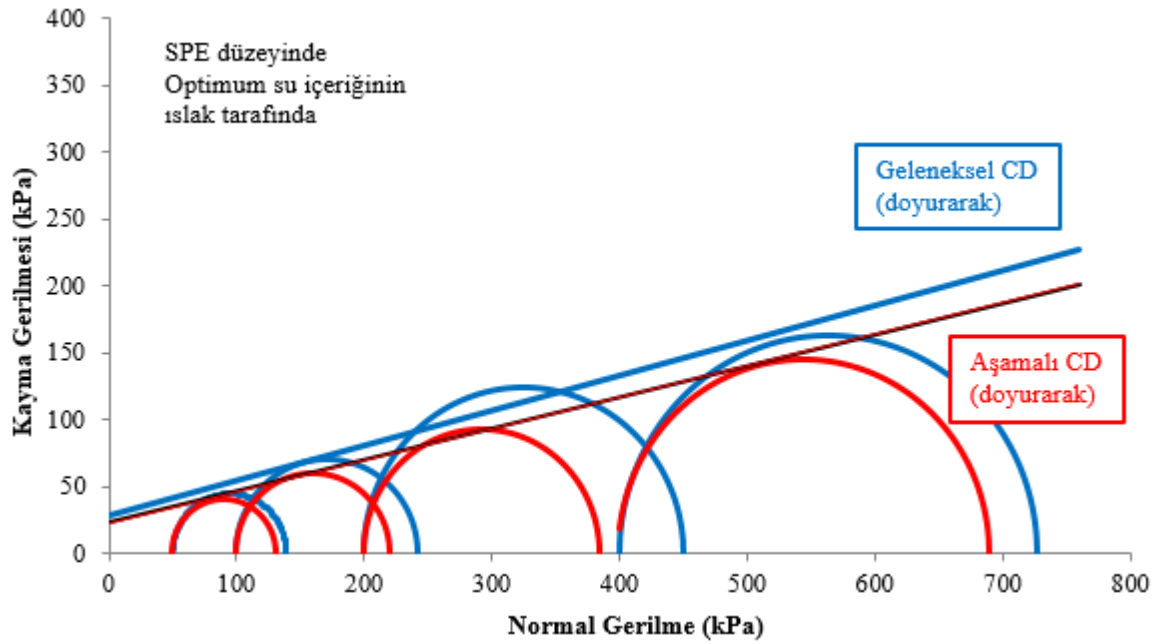
SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, geleneksel CD tip deneylerinden ortalama 16° lik efektif içsel sürtünme açısı elde edilirken aşamalı CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 13° civarındadır. Benzer şekilde MPE düzeyinde hazırlanan numuneler için geleneksel CD tip deneylerinden ortalama 18° lik efektif içsel sürtünme açısı elde edilirken aşamalı CD tip deneyinden elde edilenlerin ortalaması 14° dolaylarındadır.



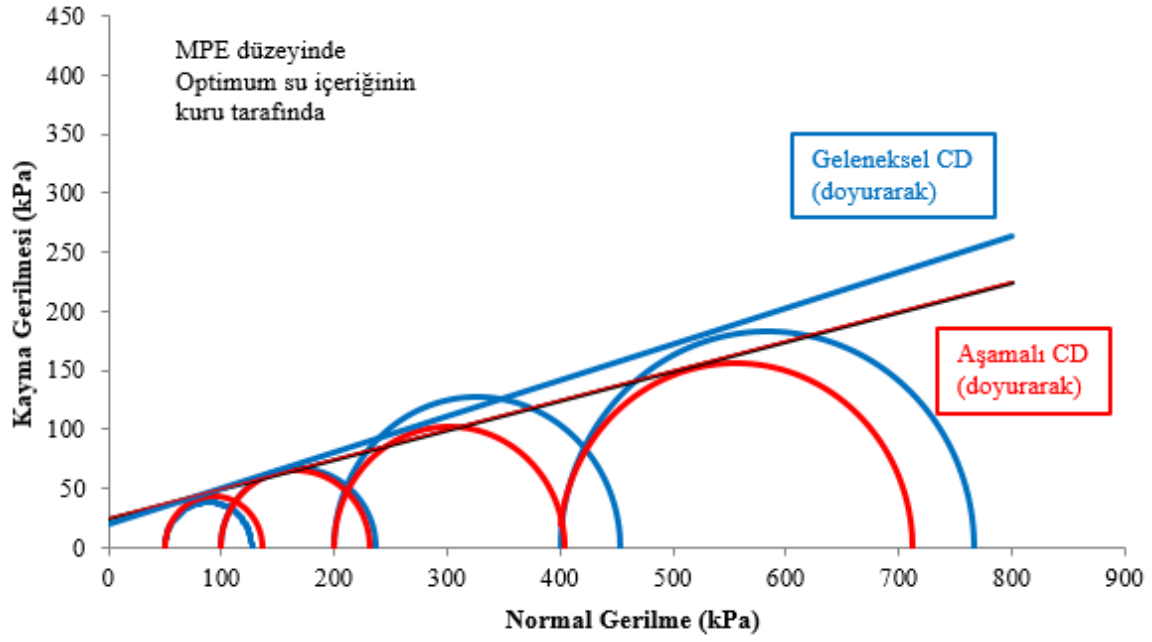
Şekil 4.42. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



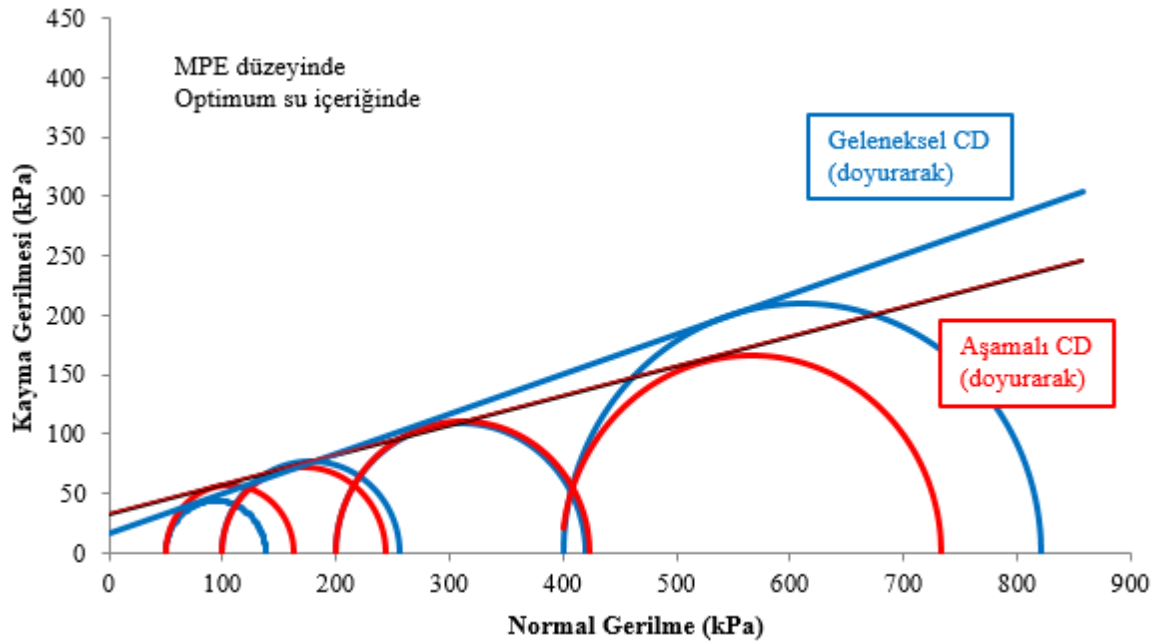
Şekil 4.43. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



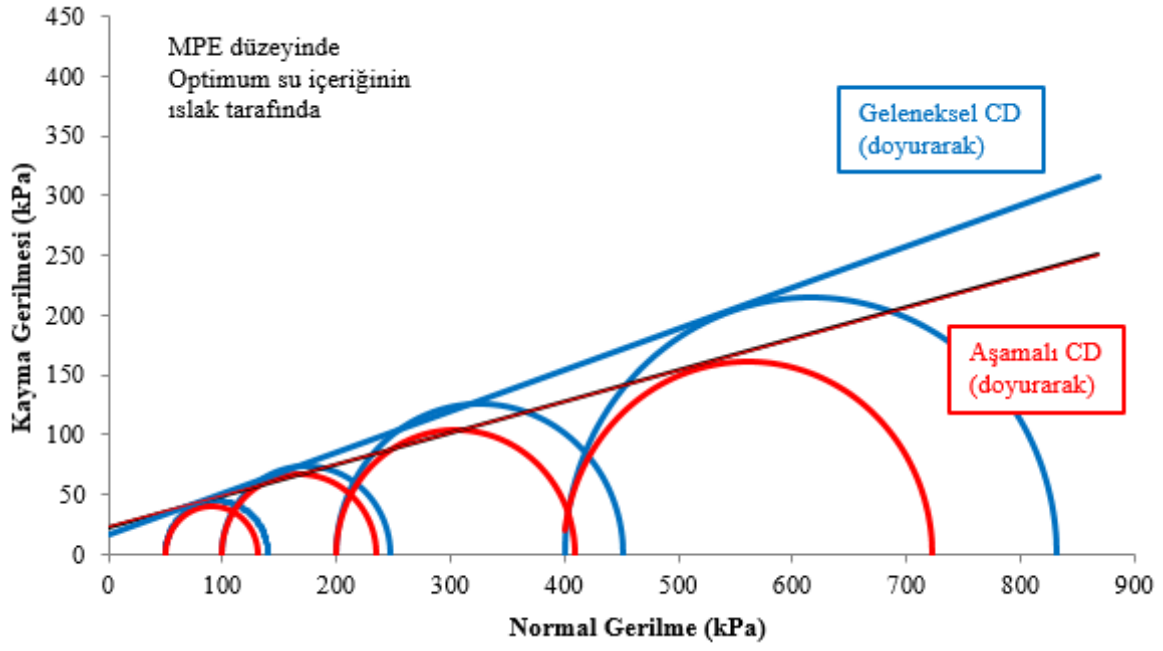
Şekil 4.44. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



Şekil 4.45. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doğurarak) ve aşamalı CD (doğurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



Şekil 4.46. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doğurarak) ve aşamalı CD (doğurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



Şekil 4.47. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde geleneksel CD (doyurarak) ve aşamalı CD (doyurarak) deneylerinden elde edilen yenilme zarfları



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma sonucunda birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre sınıfı CH olan zeminin kayma dayanımı parametrelerinin (görünür kohezyon dayanımı ve içsel sürtünme açısı), serbest basınç ve üç eksenli basınç (UU, CD, aşamalı CD) deneyleri bazında ilişkilendirilebilirliği iki farklı sıkıştırma enerjisi düzeyinde (Standart Proctor ve Modifiye Proctor) incelenmiştir. Dayanım deney numuneleri, ilgili sıkıştırma düzeyinde elde edilen kompaksiyon eğrisi referans alınarak optimum su içeriğinde ve optimum su içeriğinin ıslak ve kuru tarafında hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

Serbest Basınç Deneyleri;

- SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, su içeriği arttıkça serbest basınç dayanımı azalma eğilimi göstermektedir.
- Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte ortalama serbest basınç dayanımları da yaklaşık 4 kat artmaktadır.

Üç Eksenli Basınç (UU) Deneyleri;

- SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, su içeriği arttıkça görünür kohezyon dayanımları artma eğilimi sergilerken içsel sürtünme açıları ise azalma eğilimi göstermektedir.
- Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte ortalama görünür kohezyon dayanımı yaklaşık 3 kat, ortalama içsel sürtünme açısı ise 2 kat civarında artmaktadır.

Üç Eksenli Basınç (CD) Deneyleri;

- SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, su içeriği arttıkça görünür efektif kohezyon dayanımları artma eğilimi sergilerken efektif içsel sürtünme açıları ise azalma eğilimi göstermektedir.
- MPE düzeyinde hazırlanan numunelerde, su içeriği arttıkça görünür efektif kohezyon dayanımları azalma eğilimi sergilerken efektif içsel sürtünme açıları ise artma eğilimi göstermektedir.

- Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte ortalama görünür efektif kohezyon dayanımı yaklaşık 1,2 kat azalırken, ortalama efektif içsel sürtünme açısı ise 1,1 kat civarında artmaktadır.

Üç Eksenli Basınç (aşamalı CD) Deneyleri;

- Görünür efektif kohezyon dayanımları ve efektif içsel sürtünme açıları davranış olarak birbirleriyle tamamen zıt bir dağılım sergilemektedir. Yani maksimum görünür efektif kohezyon dayanımına karşılık minimum efektif içsel sürtünme açısı elde edilmektedir.
- Sıkıştırma enerjisinin SPE düzeyinden MPE düzeyine çıkarılmasıyla birlikte hem ortalama görünür efektif kohezyon dayanımı hem de ortalama efektif içsel sürtünme açısı 1,1 kat civarında artmaktadır.

Serbest Basınç – Üç Eksenli Basınç (UU) Deneyleri;

- Görünür kohezyon dayanımı; serbest basınç deneylerinde UU tip deneylere göre SPE düzeyinde sıkıştırılan numunelerde yaklaşık %10, MPE düzeyinde sıkıştırılanlarda ise %30 civarında daha büyük çıkmaktadır.

Üç Eksenli Basınç (geleneksel CD) - Üç Eksenli Basınç (aşamalı CD) Deneyleri;

- SPE düzeyinde hazırlanan numunelerde görünür efektif kohezyon dayanımı, geleneksel CD tip deneylerinde aşamalı CD tip deneylere göre yaklaşık %10 daha küçük çıkmaktadır. Efektif içsel sürtünme açısı ise geleneksel CD tip deneylerinde aşamalı CD tip deneylere göre yaklaşık %25 daha büyük olmaktadır.
- MPE düzeyinde hazırlanan numunelerde görünür efektif kohezyon dayanımı, geleneksel CD tip deneylerinde aşamalı CD tip deneylere göre yaklaşık %50 daha küçük çıkmaktadır. Efektif içsel sürtünme açısı ise geleneksel CD tip deneylerinde aşamalı CD tip deneylere göre yaklaşık %30 daha büyük olmaktadır.

Çalışmanın tek tip zemin üzerinde yürütülmüş olduğu düşünüldünce farklı zemin sınıfları ile kapsamının genişletilerek devam ettirilmesi uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- ASTM C117-13, (2013). Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D698-12e2, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D854-14, (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D1557-12e1, (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³)), *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2166M-16, (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2216-10, (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D2850-15, (2015). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soil, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D4318-10e1, (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D7181-11, (2011). Standard Test Method for Consolidated-Drained Triaxial Compression Test for Soils, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D7928-16, (2016). Standard Test Method for Particle Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, USA.
- Blotz, L. R., Benson, C. and Boutwell, G. (1998). Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 124 (9), 907-912.
- Brackley, I. J. A. (1973). *Swell pressure and free swell in a compacted clay*. Proceedings 3rd International Conference Expansive Soils, 1, 169-176.
- Brackley, I. J. A. (1975). *A model of unsaturated clay structure and its application to swell behavior*. Proceedings 6th African Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, 65-70.

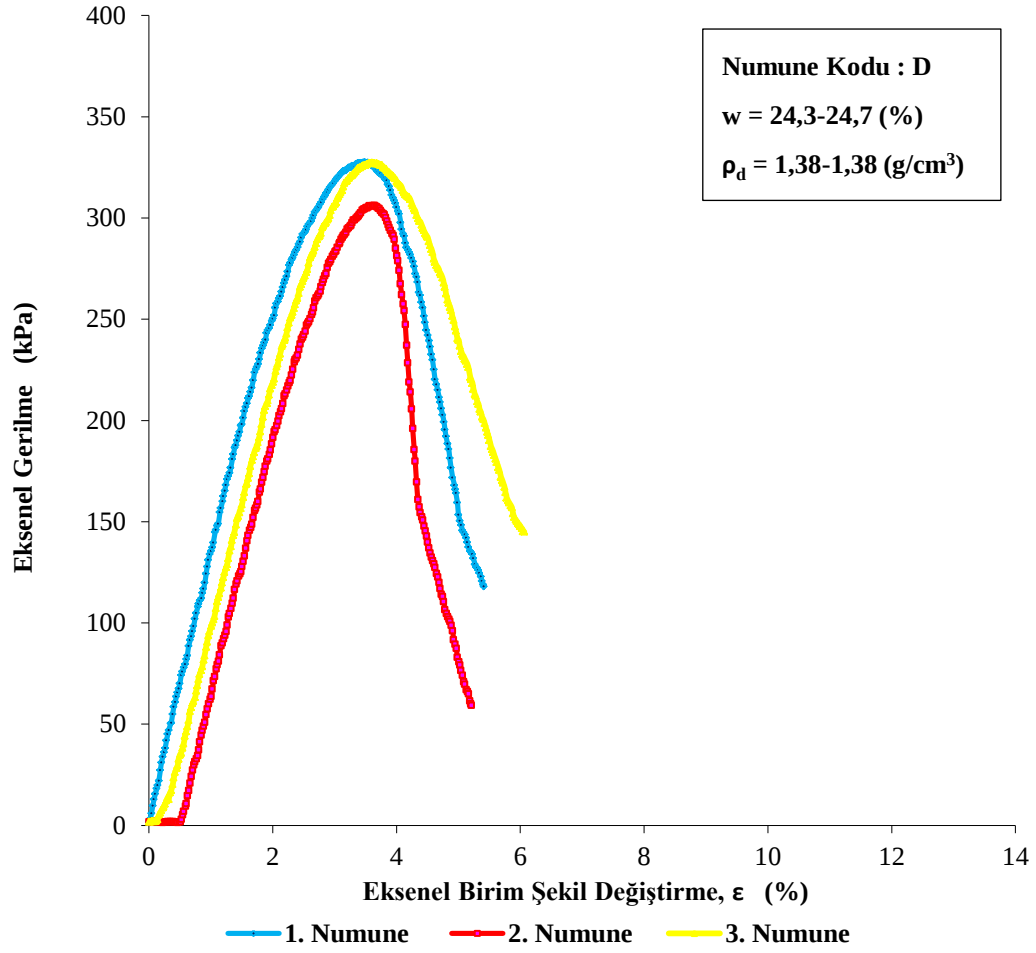
- BS 1377: Part 7 (1990). British Standard Methods of test for soils for civil engineering purposes: Shear strength tests (total stress), *British Standard Institution*, London, UK.
- Coduto, D. P. *Geoteknik mühendisliği ilkeler ve uygulamalar* (çev. M. Mollamahmutoğlu ve K. Kayabalı). Ankara: Gazi Kitabevi. (Eserin orijinali 1999’da yayımlandı), 125-506.
- Davidson, D. T. and Gardiner, W. F. (1949). Calculation of standard proctor density and optimum moisture content from mechanical, analysis, shrinkage and factors and plasticity index. *Highway Research Board* 29, 447-481.
- Delage, P., Audiger, M., Cui, Y. J. and Howat, M. D. (1996). Microstructure of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 150-158.
- Diamond, S. (1970). Pore size distribution in clays. *Clays and Clay Minerals*, 18, 7-23.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1-77, 247-258.
- Gurtug, Y. and Sridharan, A. (2004). Compaction behaviour and prediction of its characteristics of fine grained soils with particular reference to compaction energy. *Soils and Foundations*, 44 (5), 27-36.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D. *Geoteknik mühendisliğine giriş* (çev. K. Kayabalı). Ankara: Gazi Kitabevi. (Eserin orijinali 1981’de yayımlandı), 1-462.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W. and Apichatvullop, A. (2008). An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test. *Soils and Foundations*, 48 (2), 115-126.
- Horpibulsuk, S., Katkan, W. and Naramitkornburee, A. (2009). Modified Ohio’s curves: a rapid estimation of compaction curves for coarse and fine grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM 32 (1), 64-75.
- Jeng, Y. S. and Strohm, W. E. (1976). Prediction of the shear strength and compaction characteristics of compacted fine-grained cohesive soils. *United States Waterways Experiment Station, Soil and Pavement Laboratory*, Vicksburg, Miss.
- Joslin, J. C. (1959). Ohio’s typical water-density curves. *American Society for testing and materials*, Special Technical Publication STP 239, 111-118.
- Kong, L. W. and Tan, L. R. (2000). Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil. In H. Rahardjo, D. G. Toll and E. C. Leong (Eds.), *Unsaturated Soils for Asia*. Singapore: Springer, 515-519.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics*. New York: Wiley.
- Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 422.

- Nagaraj, T. S., Lutenecker, A. J., Pandian, N. S. and Manoj, M. (2006). Rapid estimation of compaction parameters for field control. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM 29 (6), 1-10.
- Pandian, N. S., Nagaraj, T. S. and Manoj, M. (1997). Re-examination of compaction characteristics of fine-grained soils. *Geotechnique*, 47 (2), 363-366.
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. *Engineering News-Record*, 111, 9-13.
- Ramiah, B. K., Viswanath, V. and Krihnamurthy, H. V. (1970). *Interrelationship of compaction and index properties*. Proceedings of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, 577-587.
- Seed, H. and Chan, C. (1959). Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85, 87-128.
- Toll, D. G. (2000). The influence of fabric on the shear behavior of unsaturated compacted soils. *Advances in Unsaturated Geotechnics: Geotechnical Special Publication*, 99, 222-234.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G. and Pufahi, D. E. (1996). The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till. *Geotechnical Testing Journal ASTM*, 19, 19-28.
- Zein, A. K. M. (1985). *Swelling Characteristic and Micro Fabric of Compacted Black Cotton Soil*, PhD. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow.

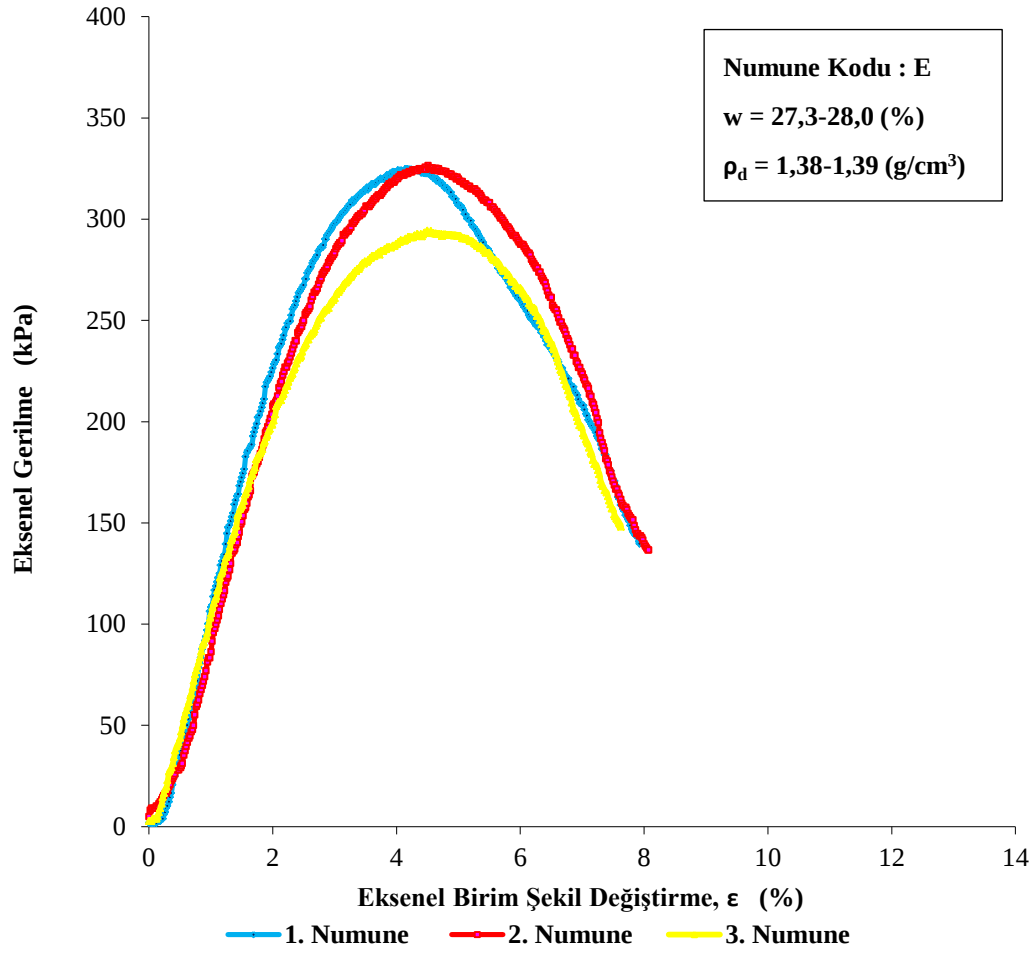


EKLER

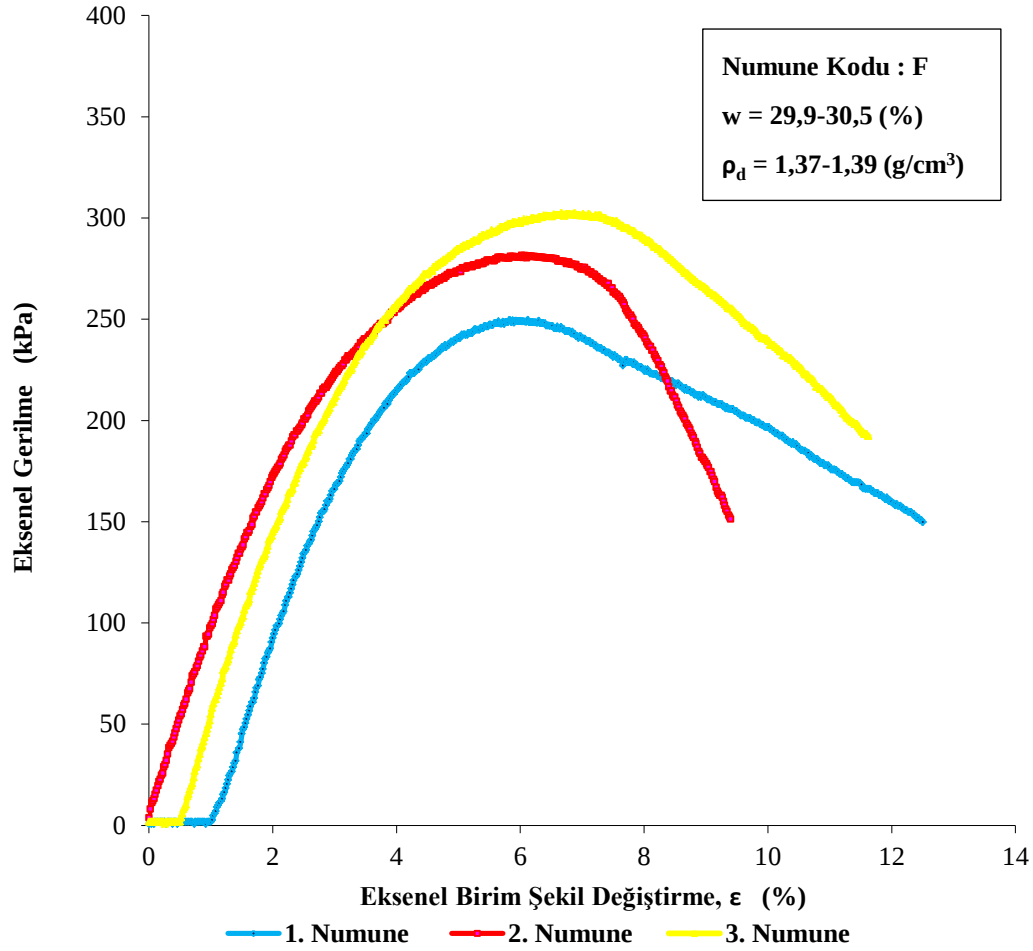
EK-1. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen aksel gerilme - aksel birim şekil değıştirme grafiğı



EK-2. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen aksel gerilme - aksel birim şekil değıştirme grafiği



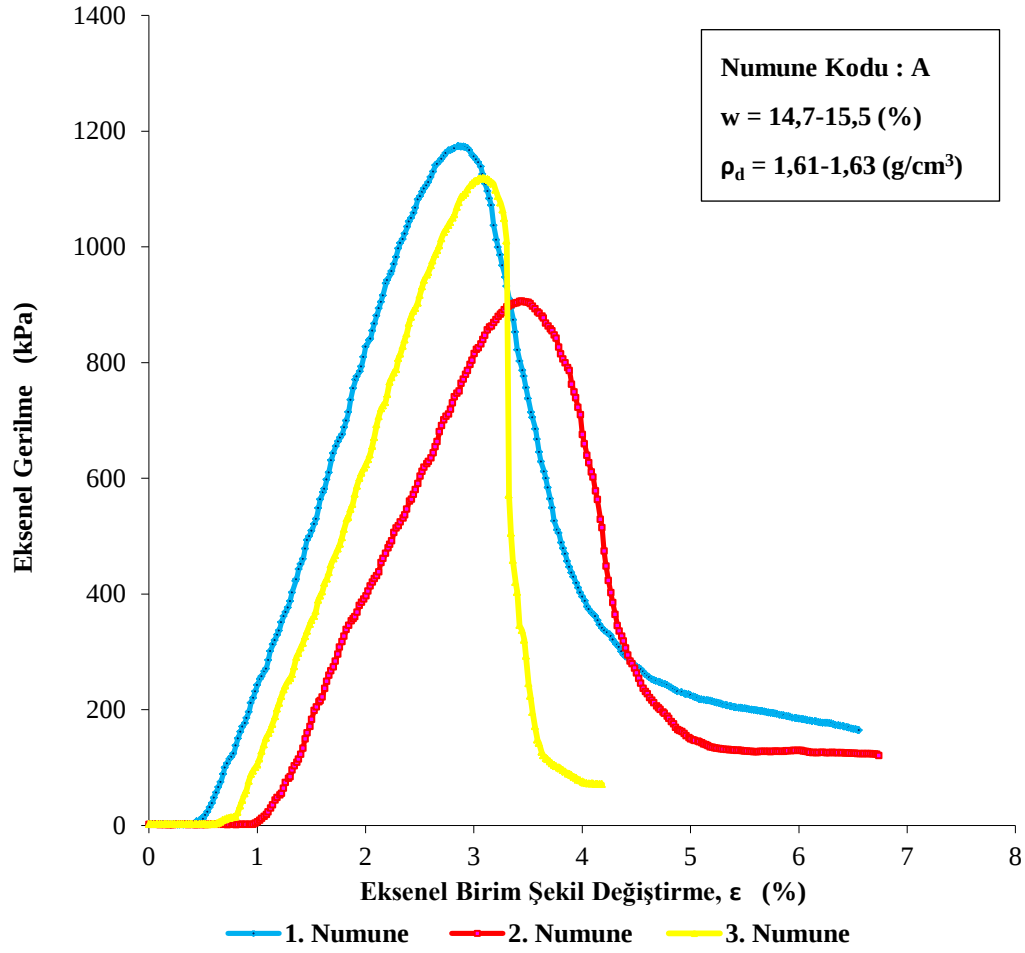
EK-3. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen aksel gerilme - aksel birim şekil değıştirme grafiğı



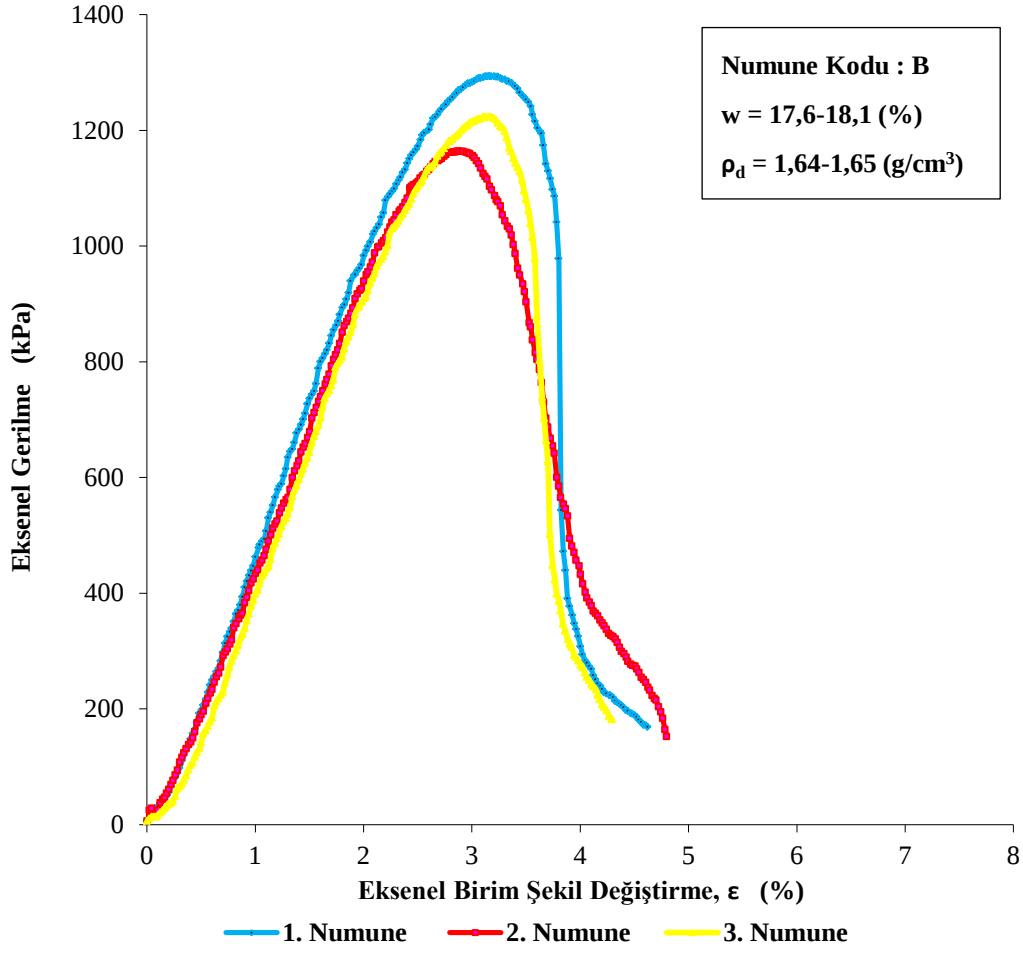
EK-4. SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deney sonu fotoğrafları (D, E ve F numuneleri)



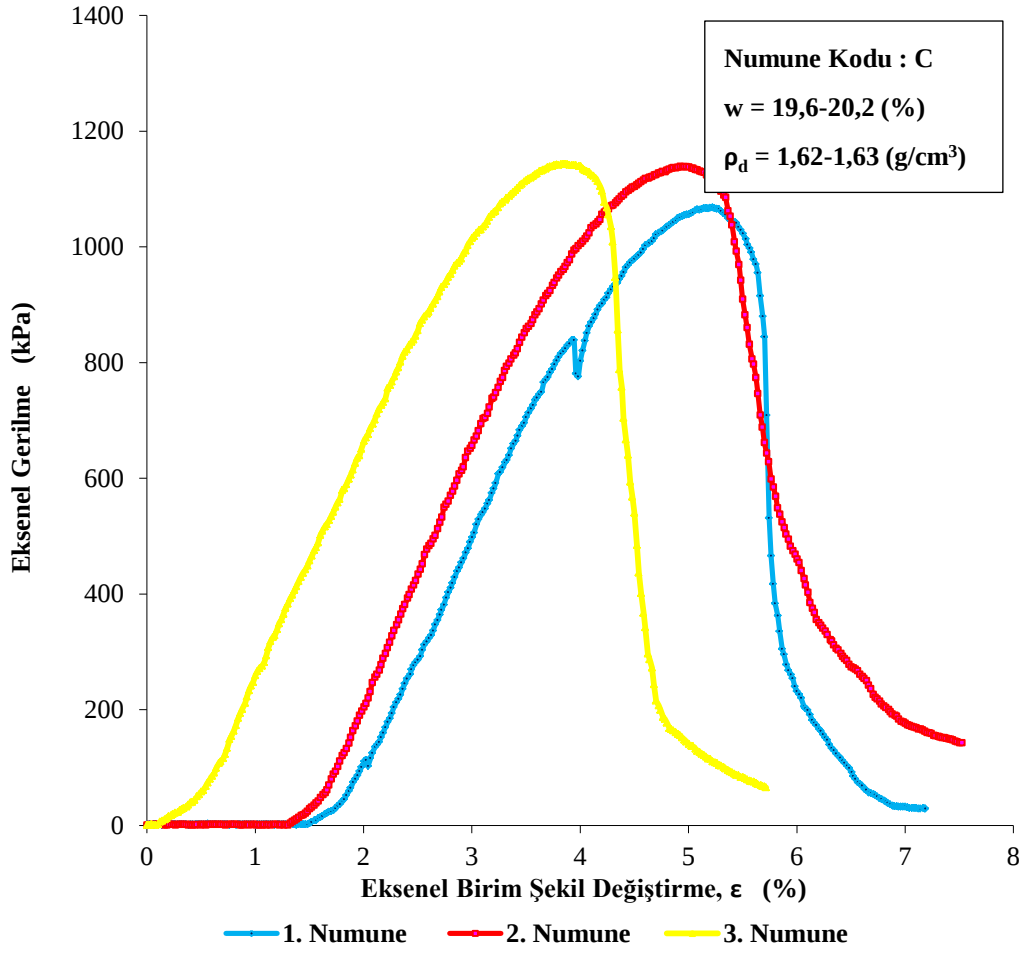
EK-5. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen aksenal gerilme - aksenal birim şekil değiştirme grafiği



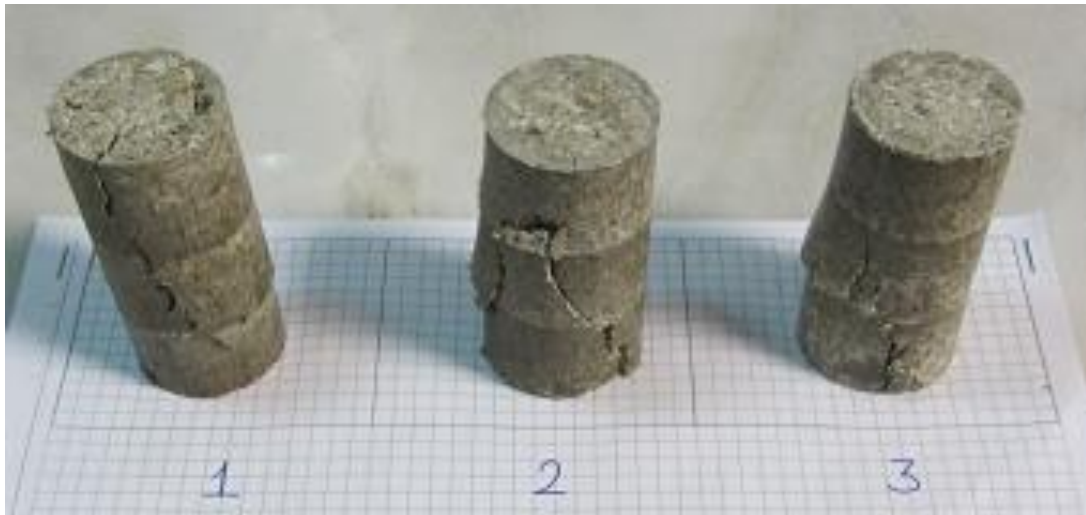
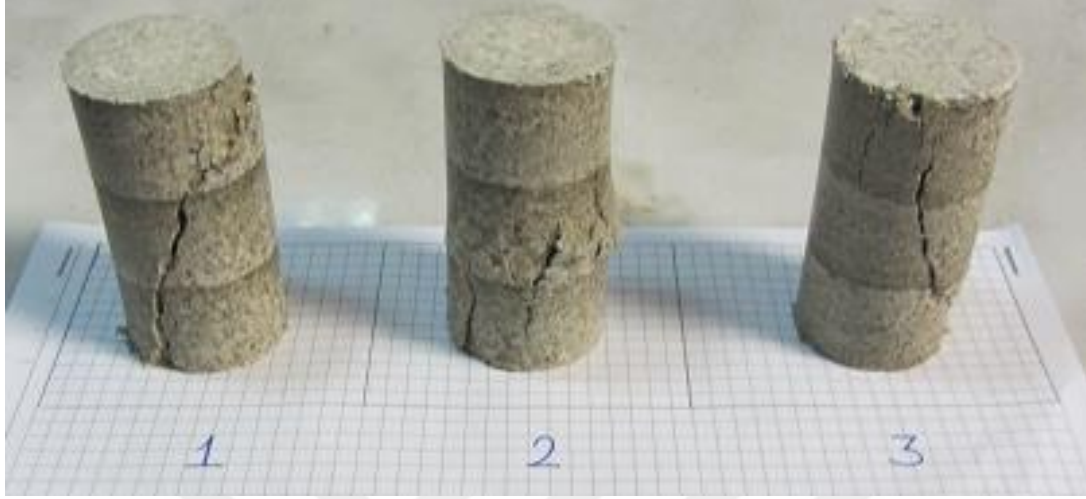
EK-6. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



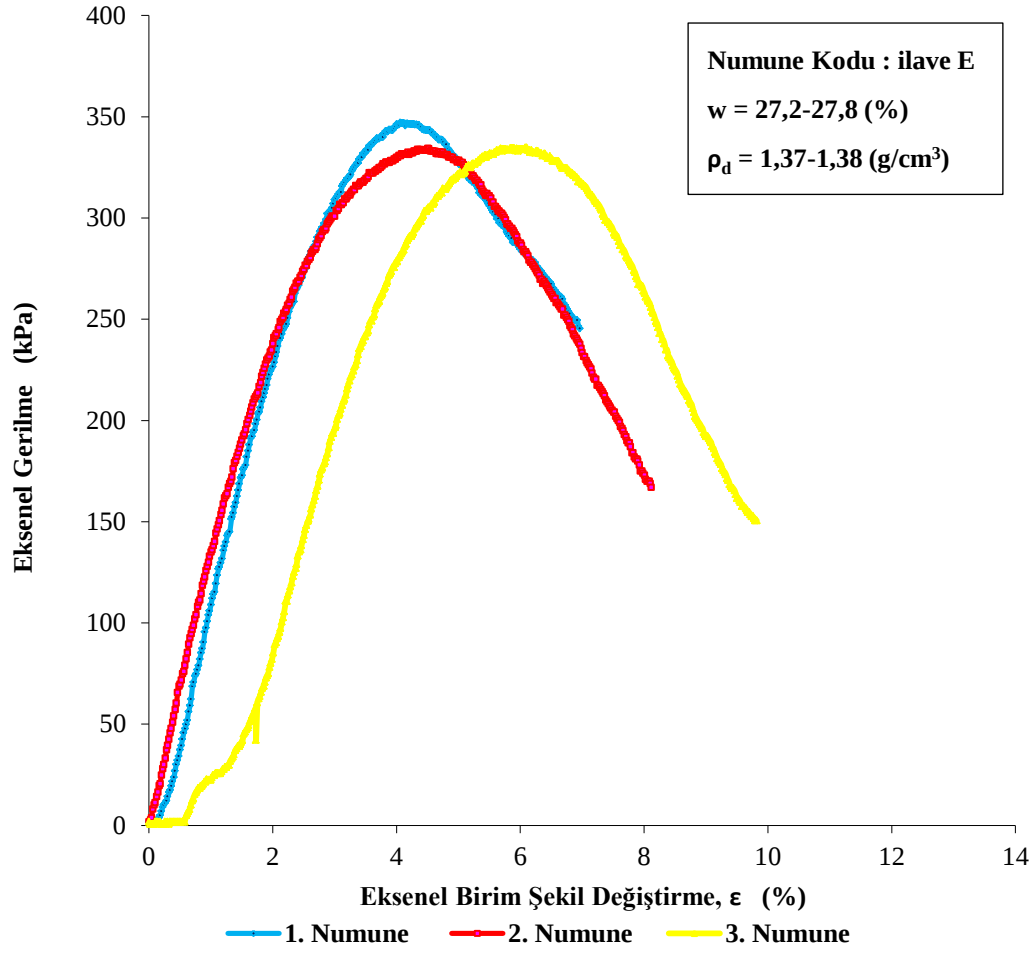
EK-7. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen aksel gerilme - aksel birim şekil değıştirme grafiğı



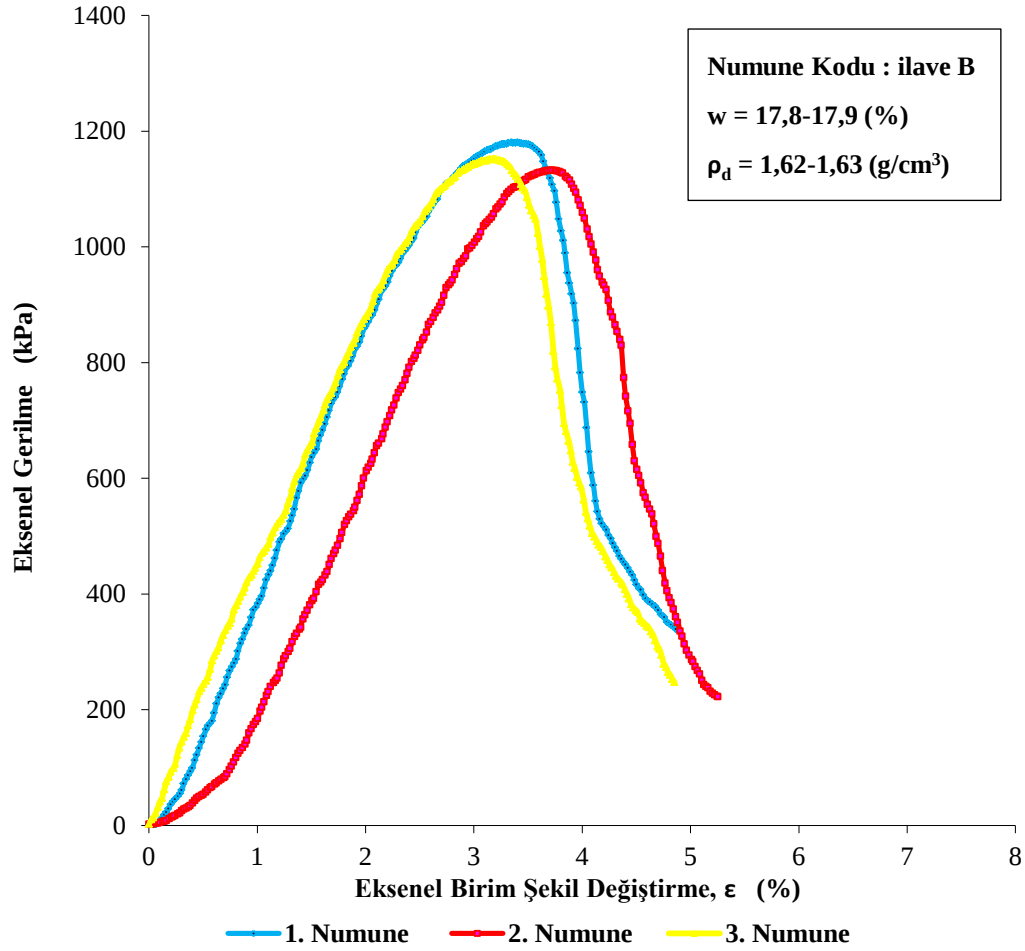
EK-8. MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UC (doymadan) deney sonu fotoğrafları (A, B ve C numuneleri)



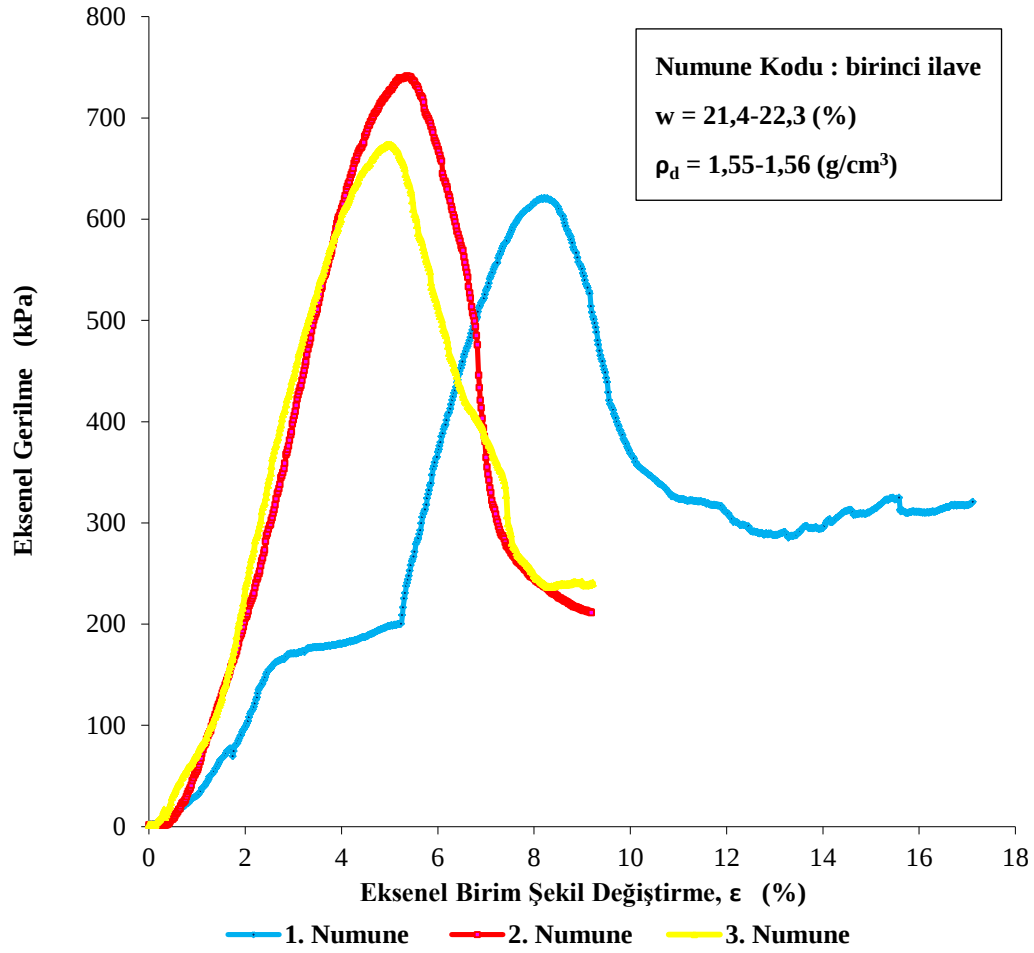
EK-9. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış ilave numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



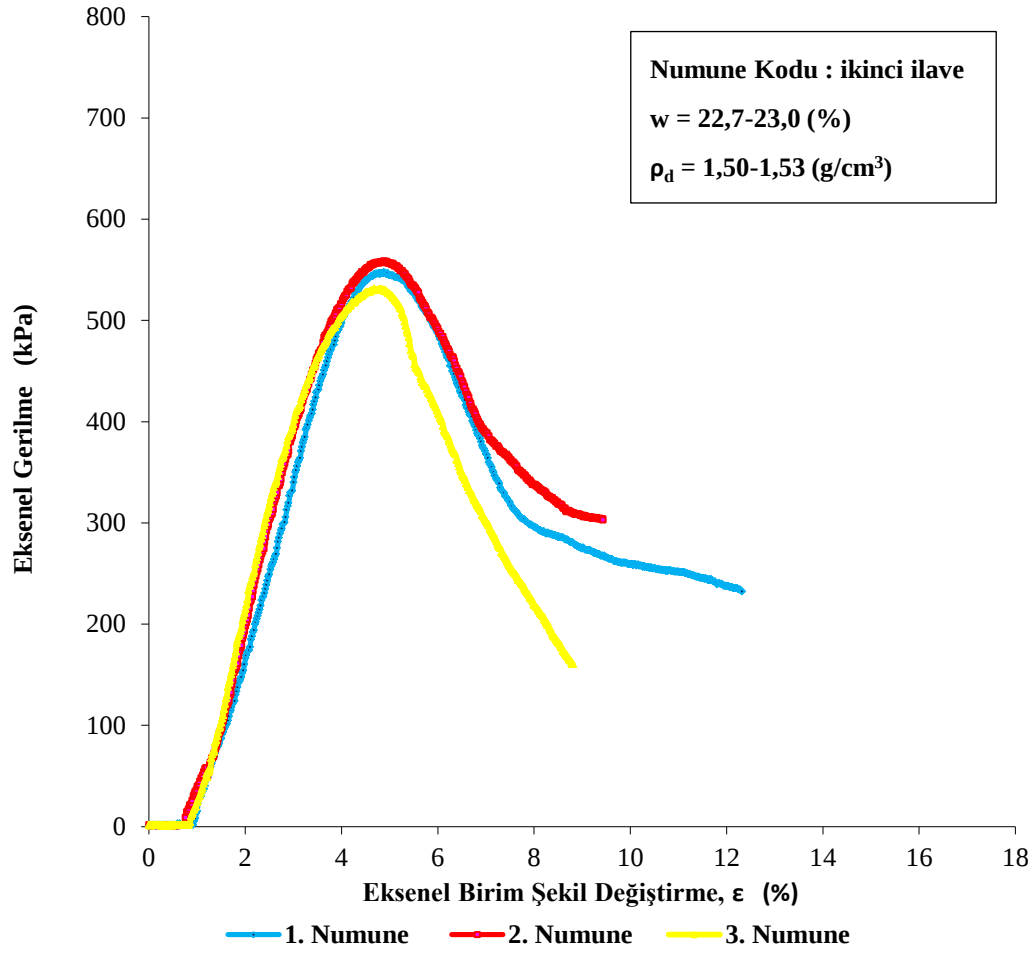
EK-10. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış ilave numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen aksenal gerilme - aksenal birim şekil değiştirme grafiği



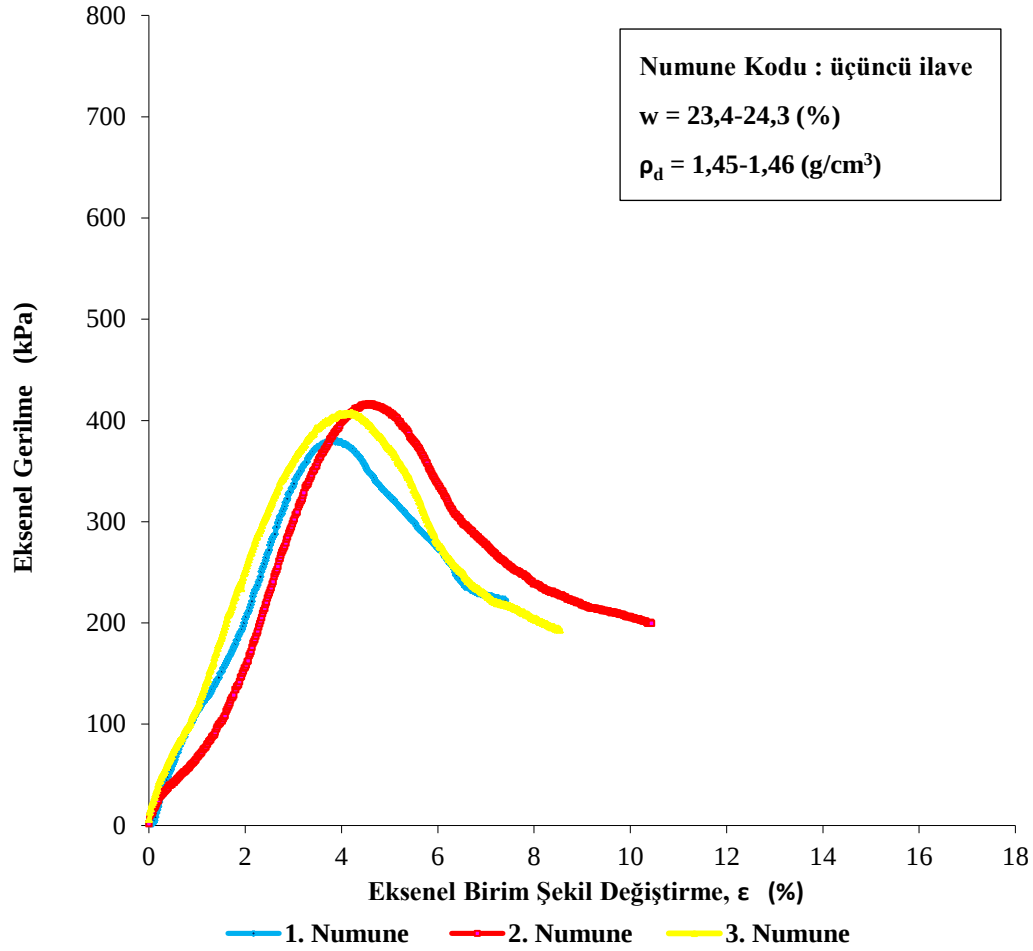
EK-11. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılmış ilave birinci numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



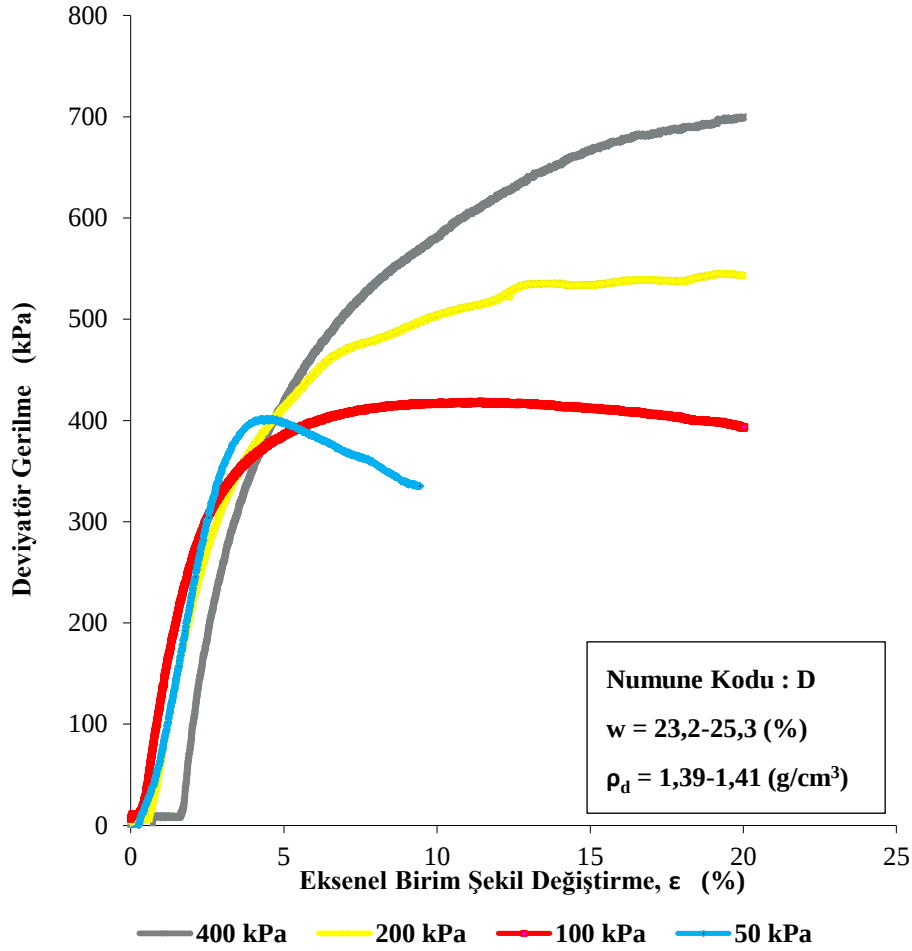
EK-12. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılmış ilave ikinci numunelerde UC (doyurmadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme - eksenel birim şekil değıştirme grafiğı



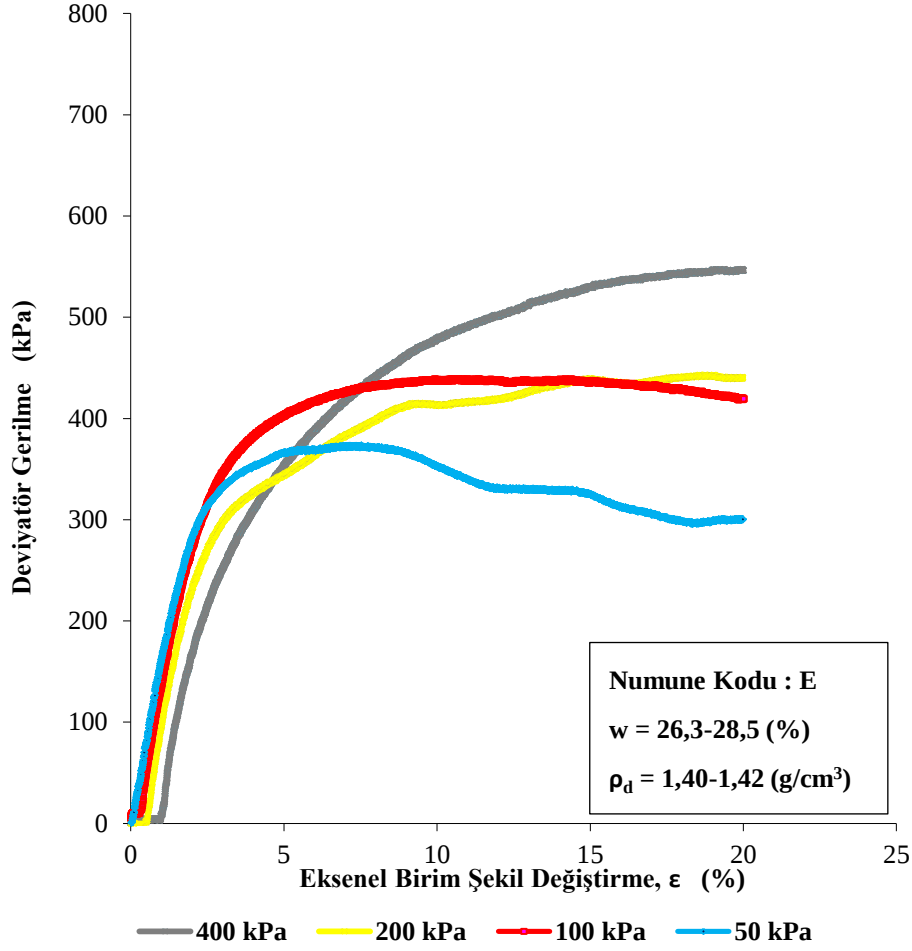
EK-13. SPE-MPE ara bölgesinde sıkıştırılmış ilave üçüncü numunelerde UC (doymadan) deneyinden elde edilen eksenel gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



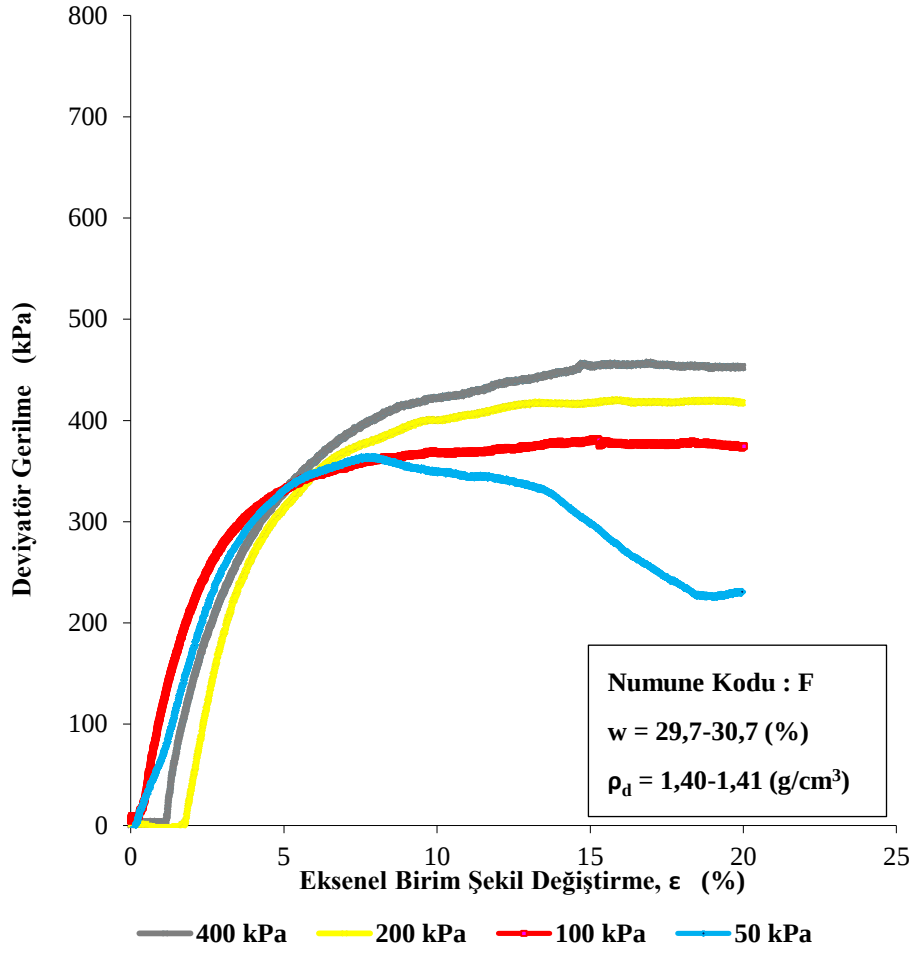
EK-14. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



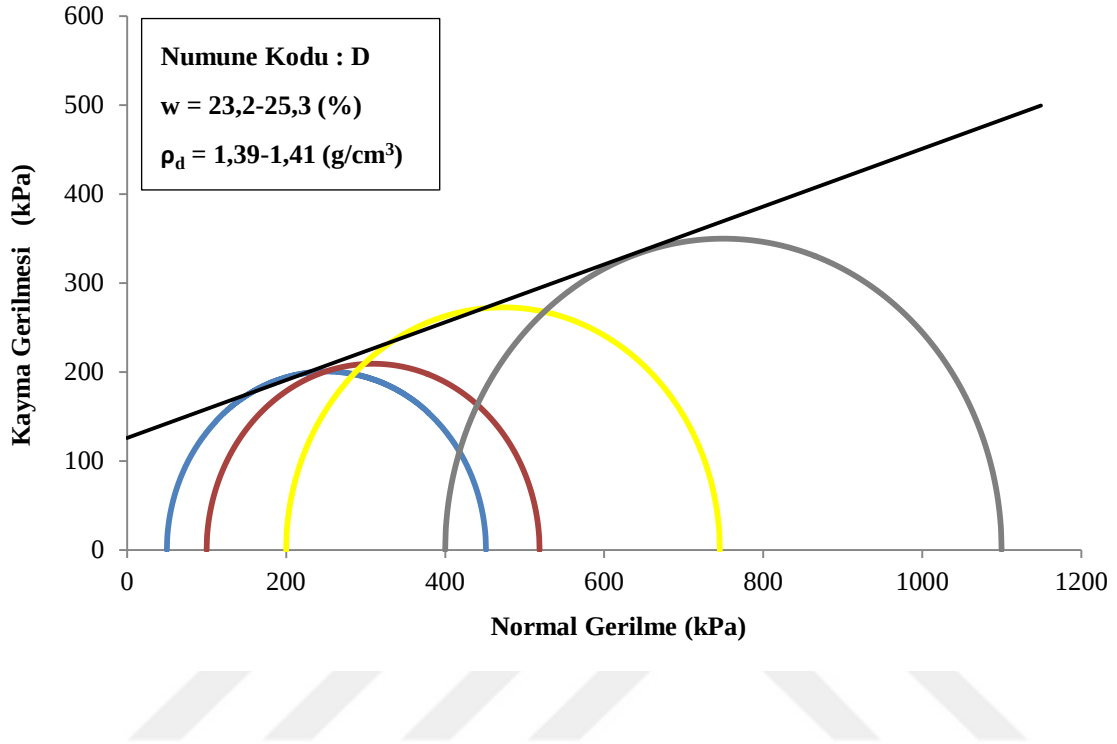
EK-15. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



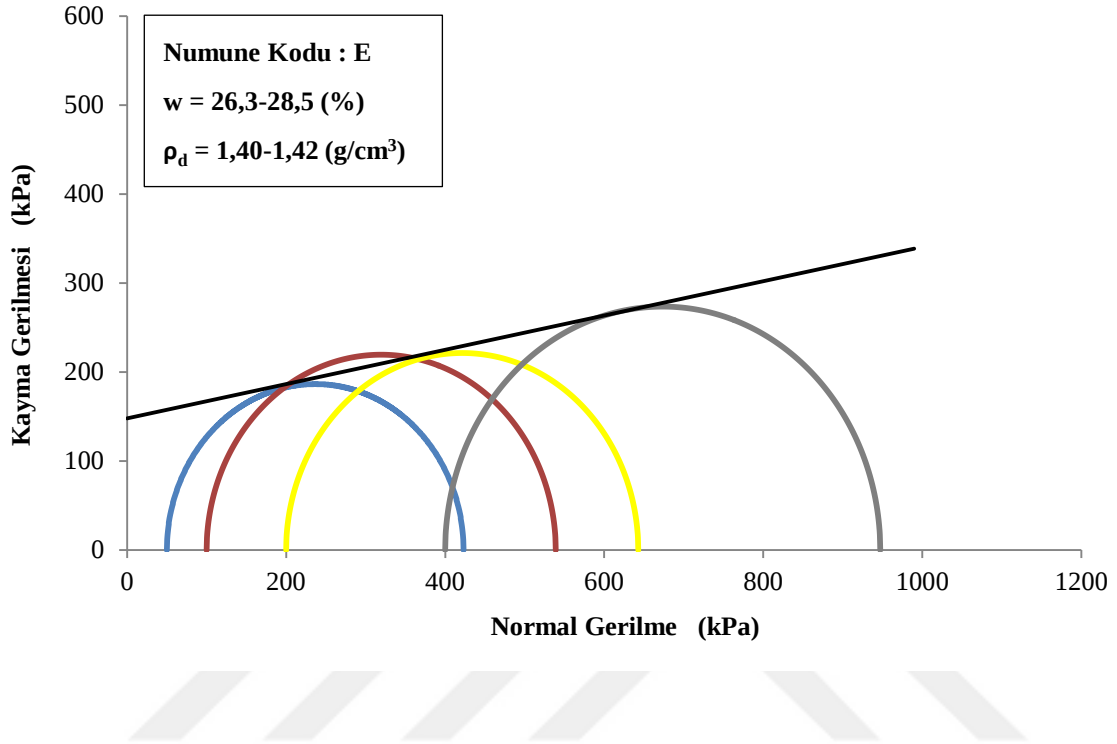
EK-16. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



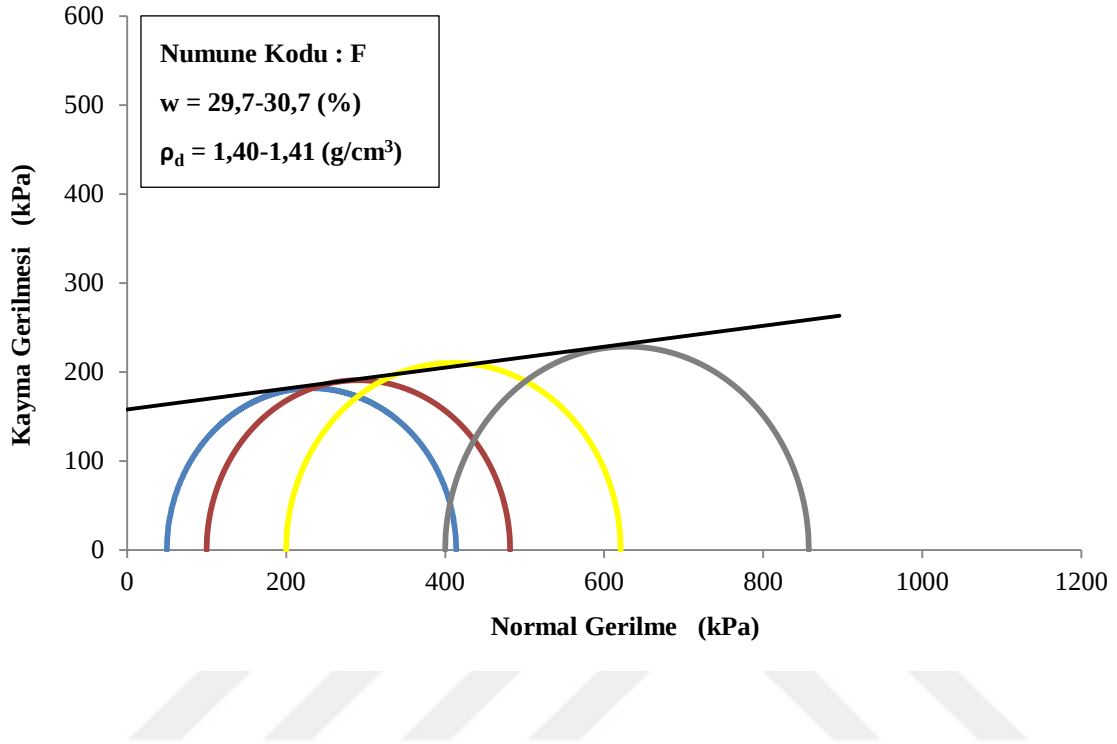
EK-17. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



EK-18. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



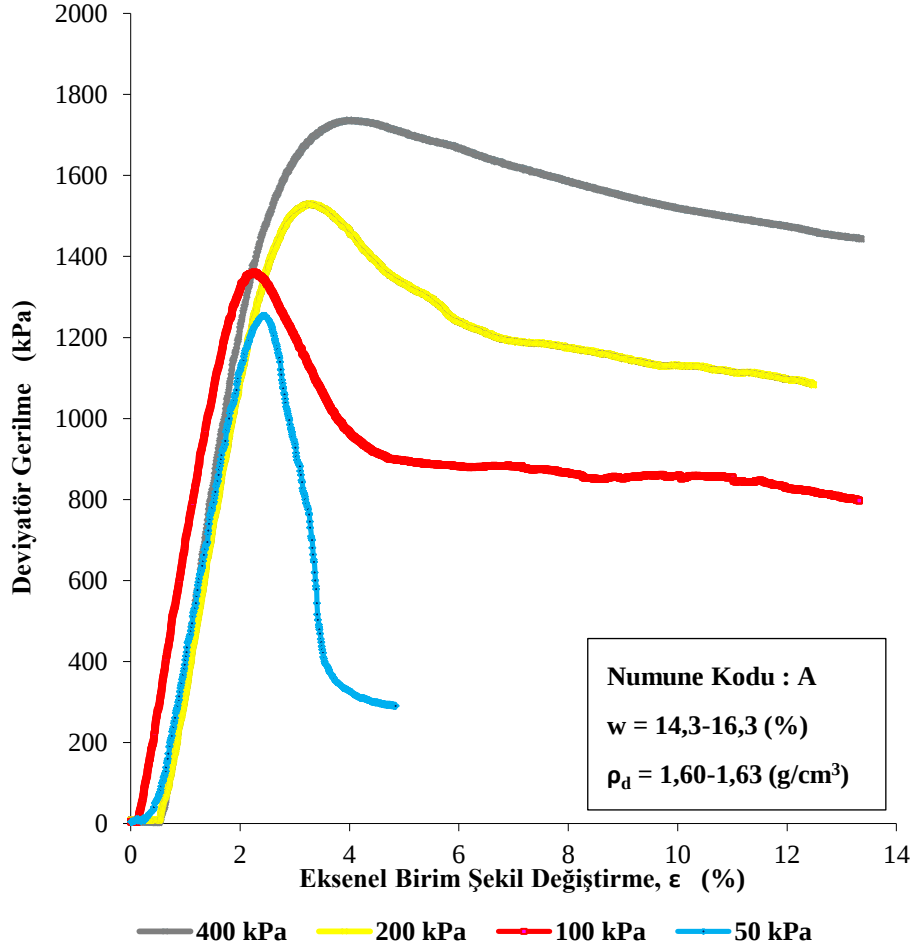
EK-19. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



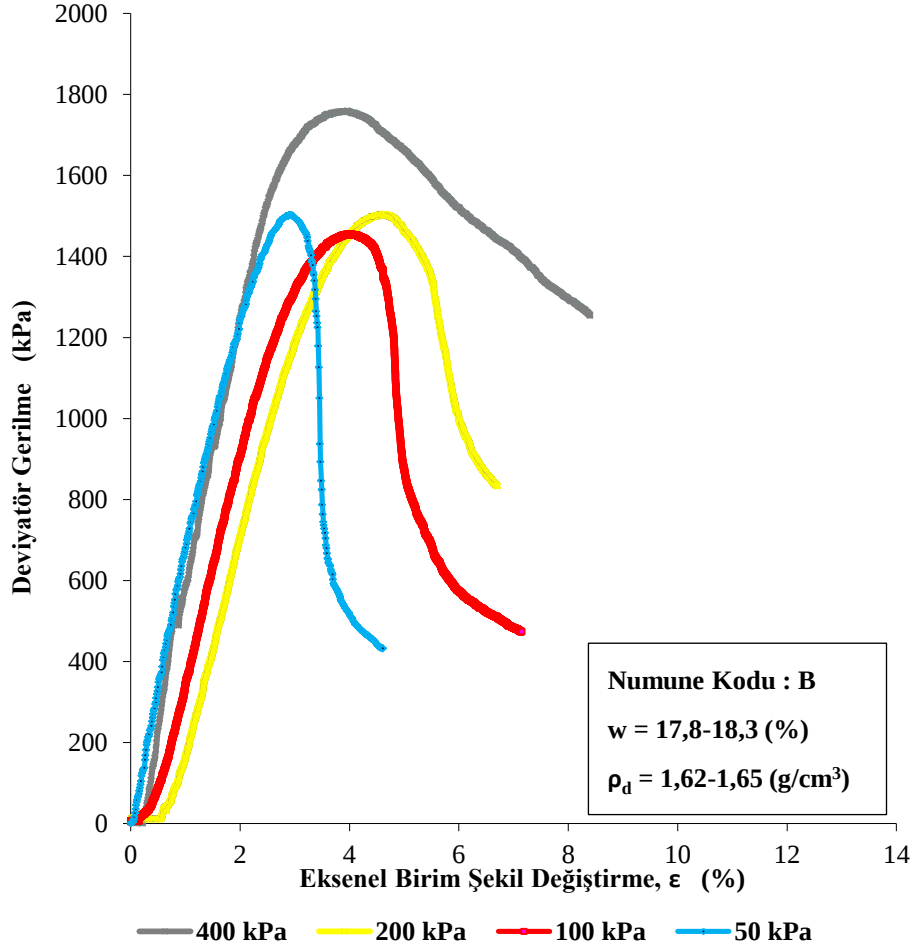
EK-20. SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deney sonu fotoğrafları (D, E ve F numuneleri)



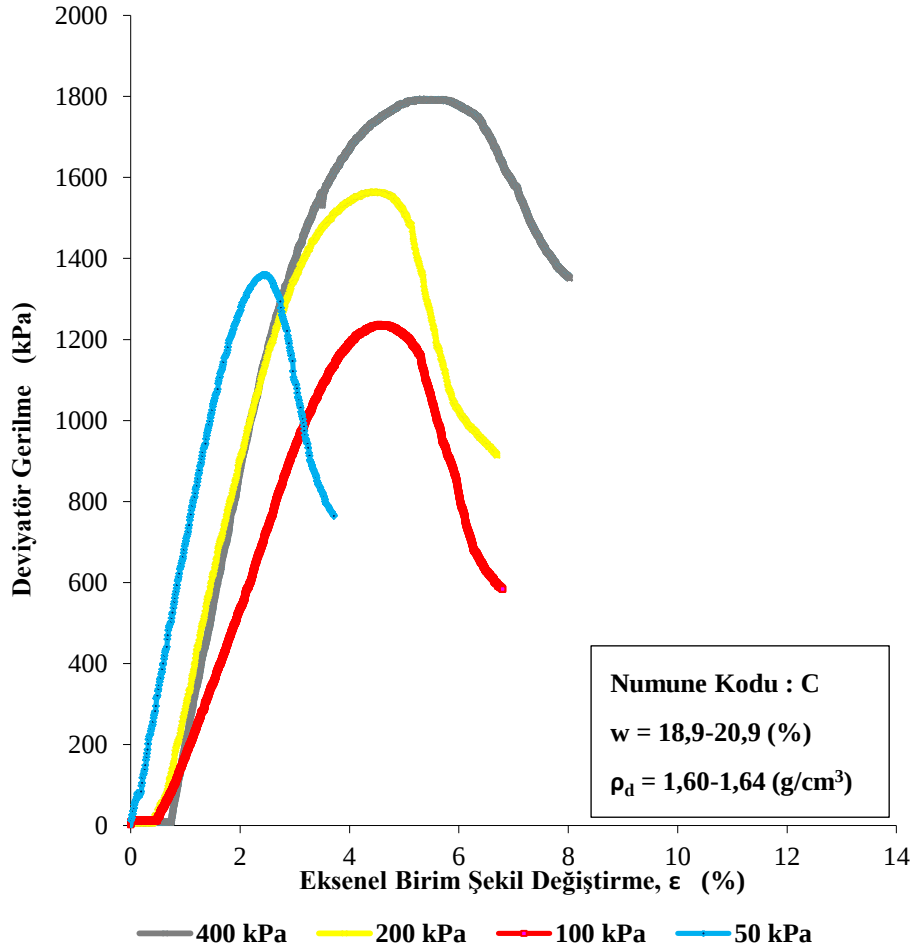
EK-21. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



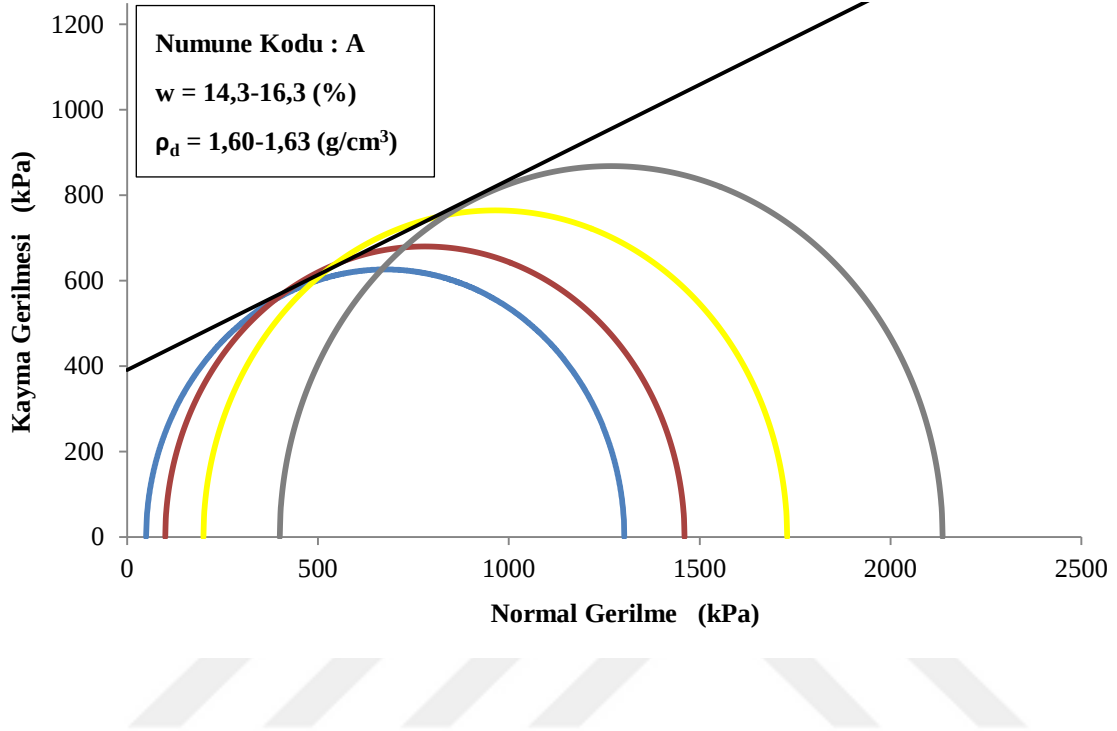
EK-22. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



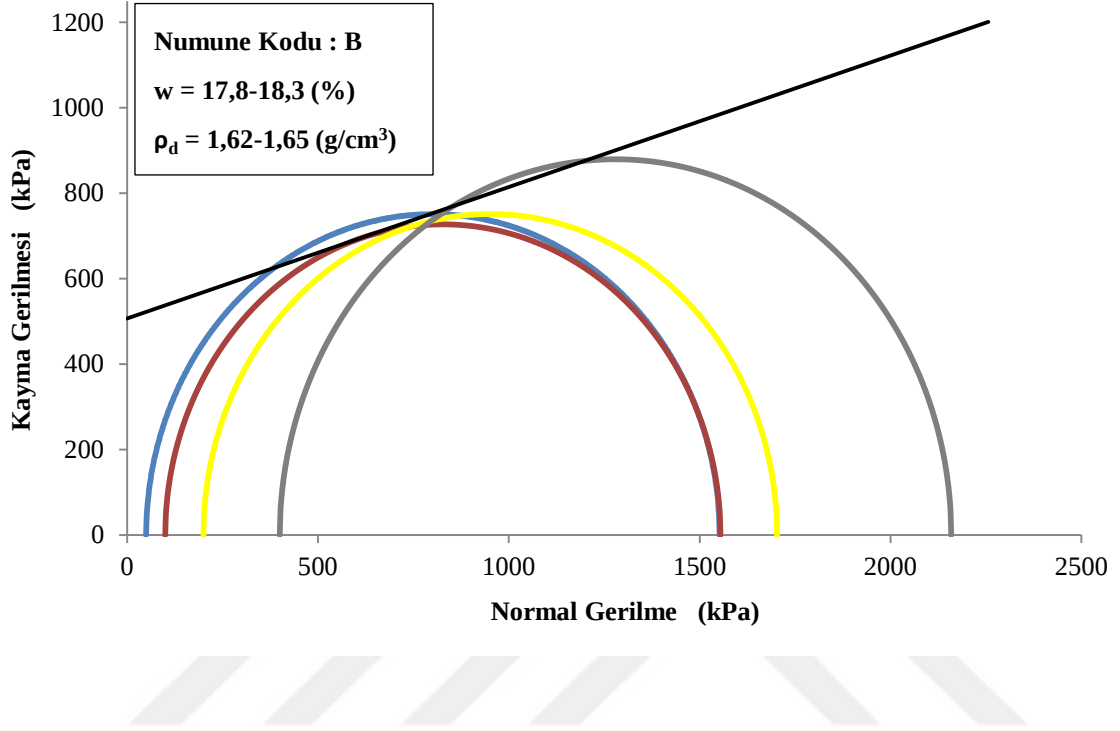
EK-23. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



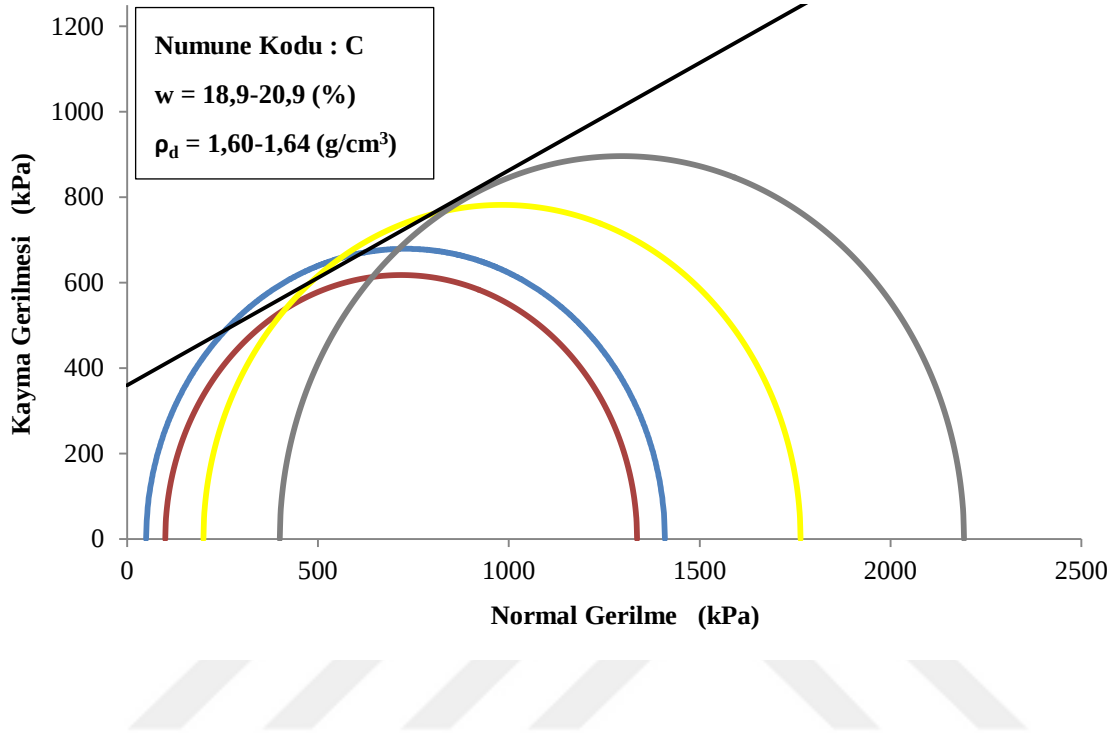
EK-24. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



EK-25. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doyurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



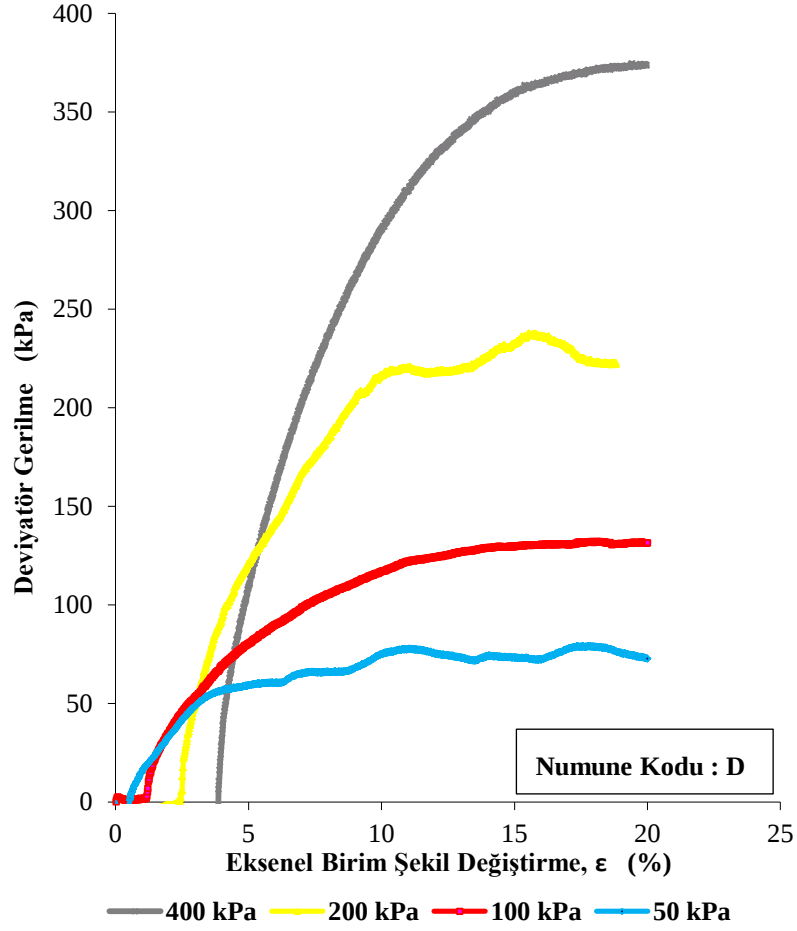
EK-26. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymurmadan) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



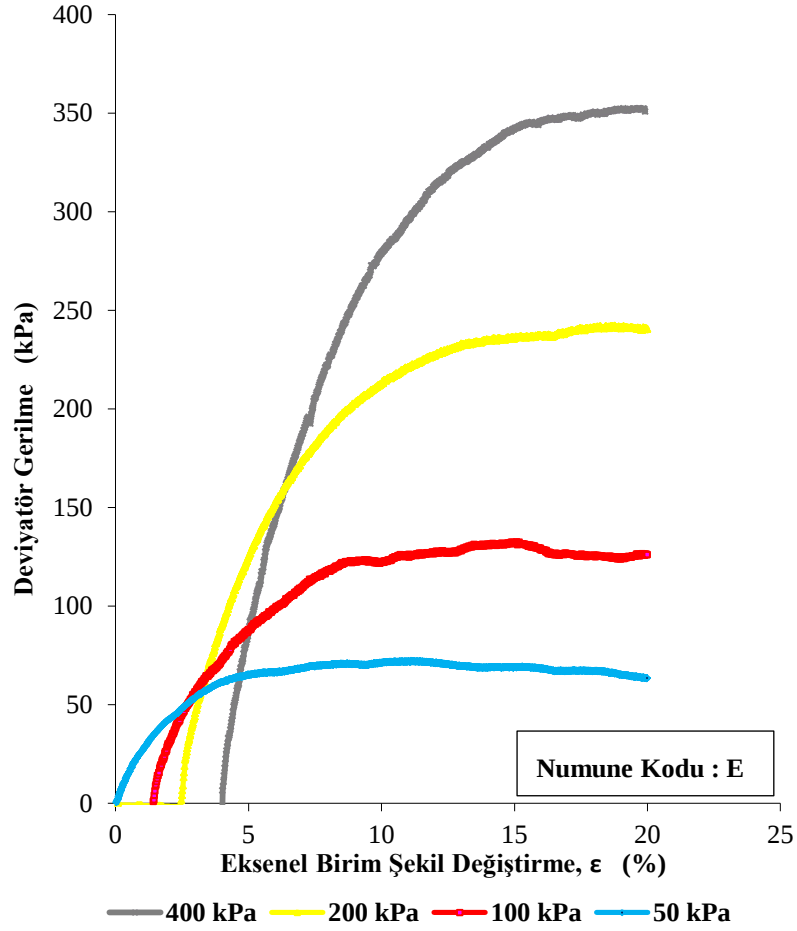
EK-27. MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde UU (doymadan) deney sonu fotoğrafları (A, B ve C numuneleri)



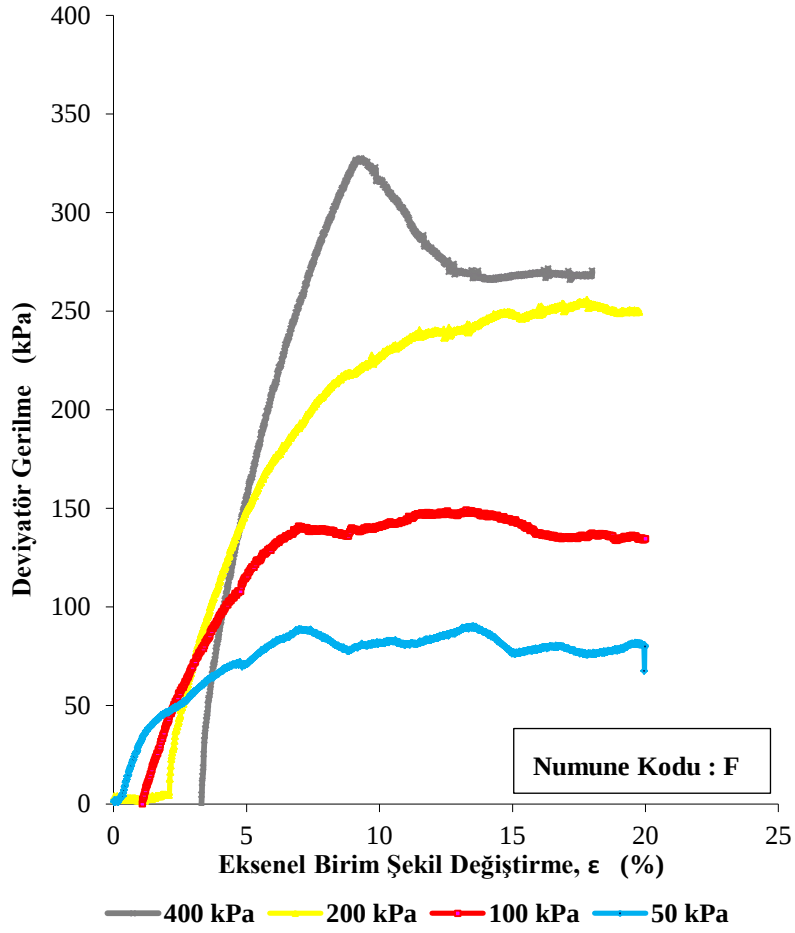
EK-28. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



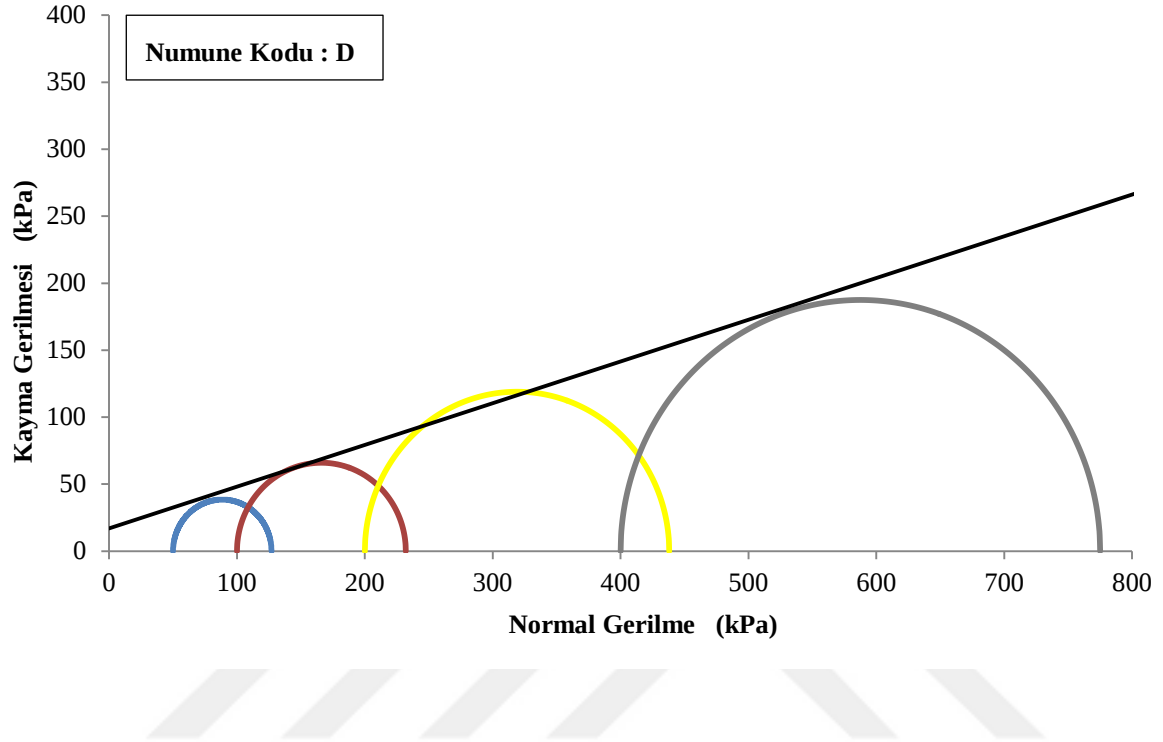
EK-29. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değıştirme grafiği



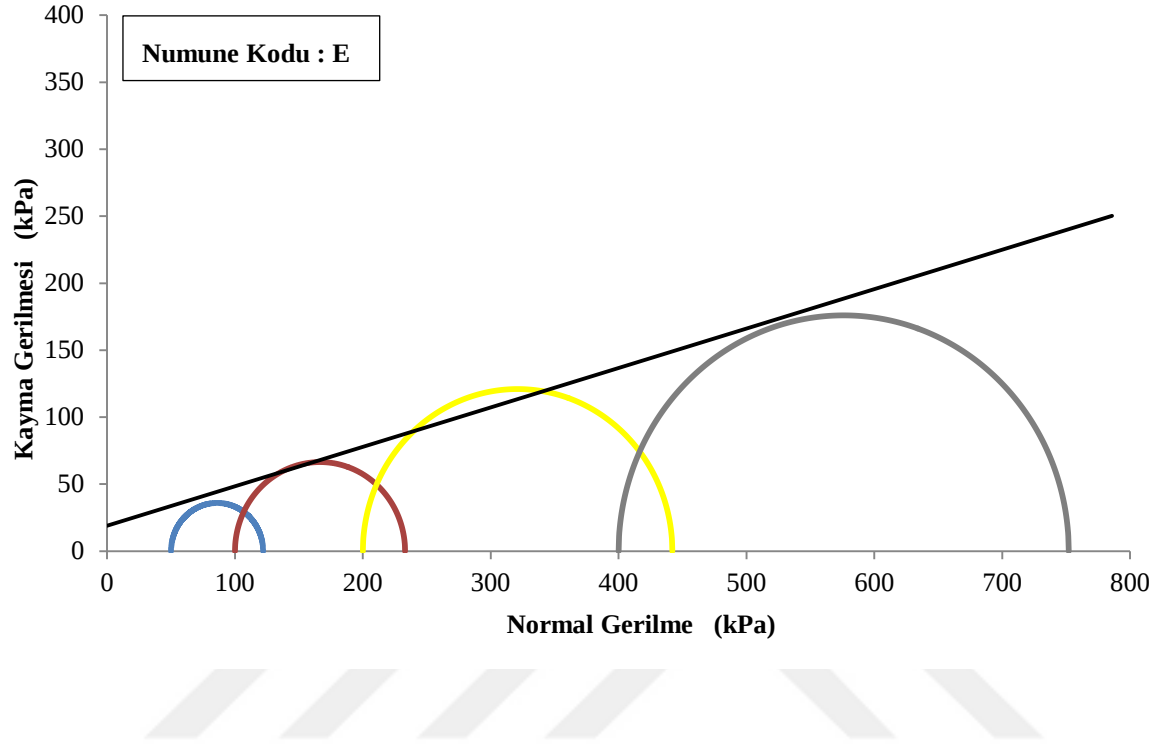
EK-30. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



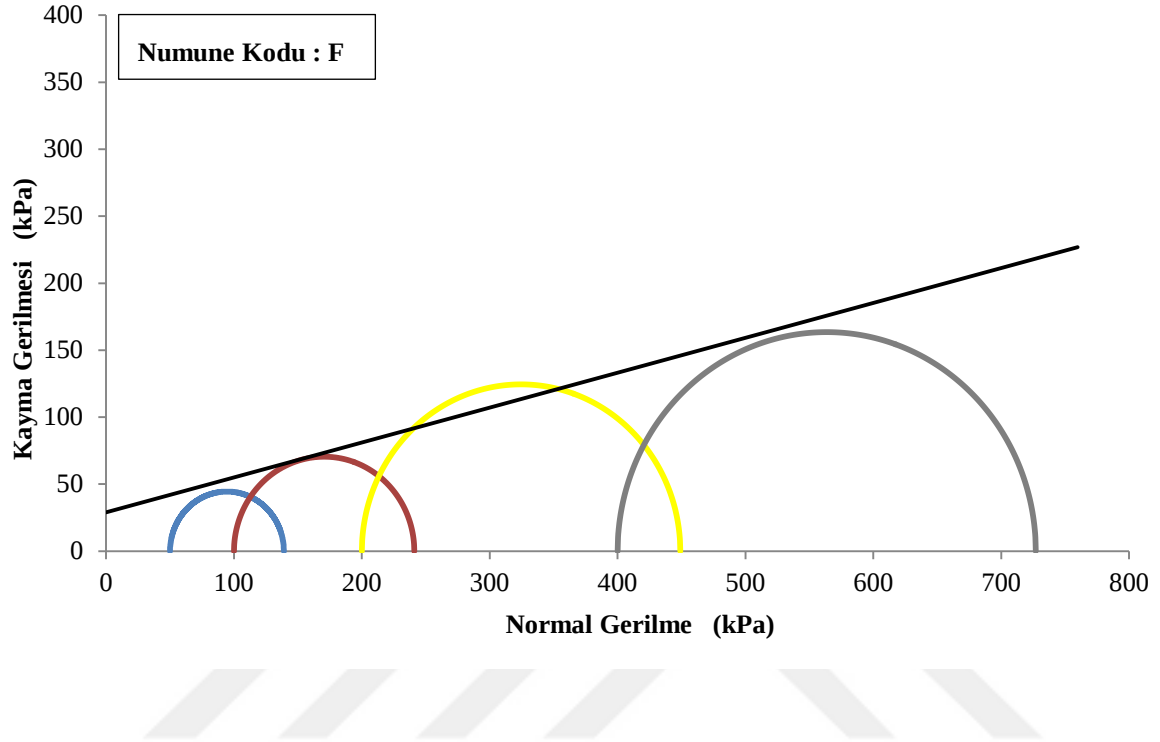
EK-31. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



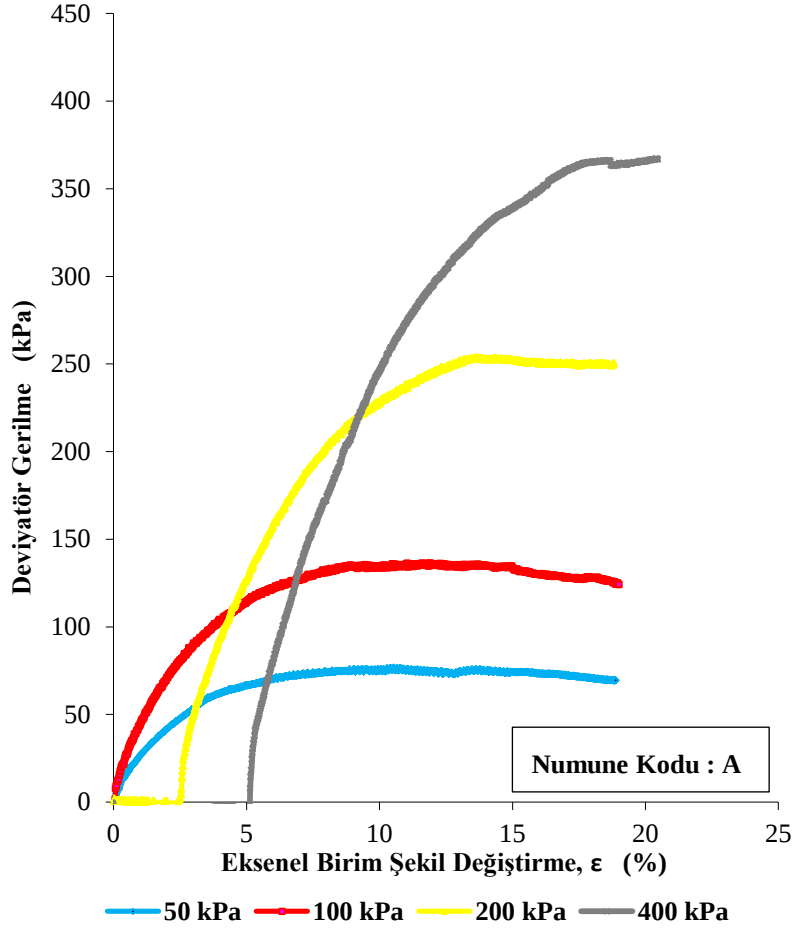
EK-32. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doğurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



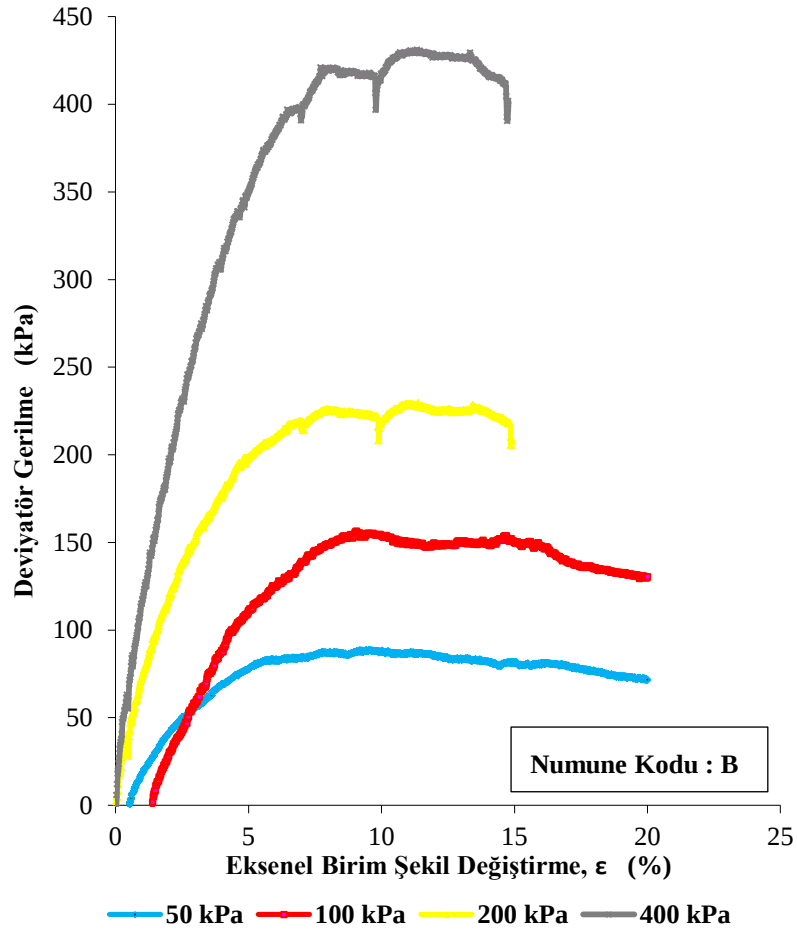
EK-33. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



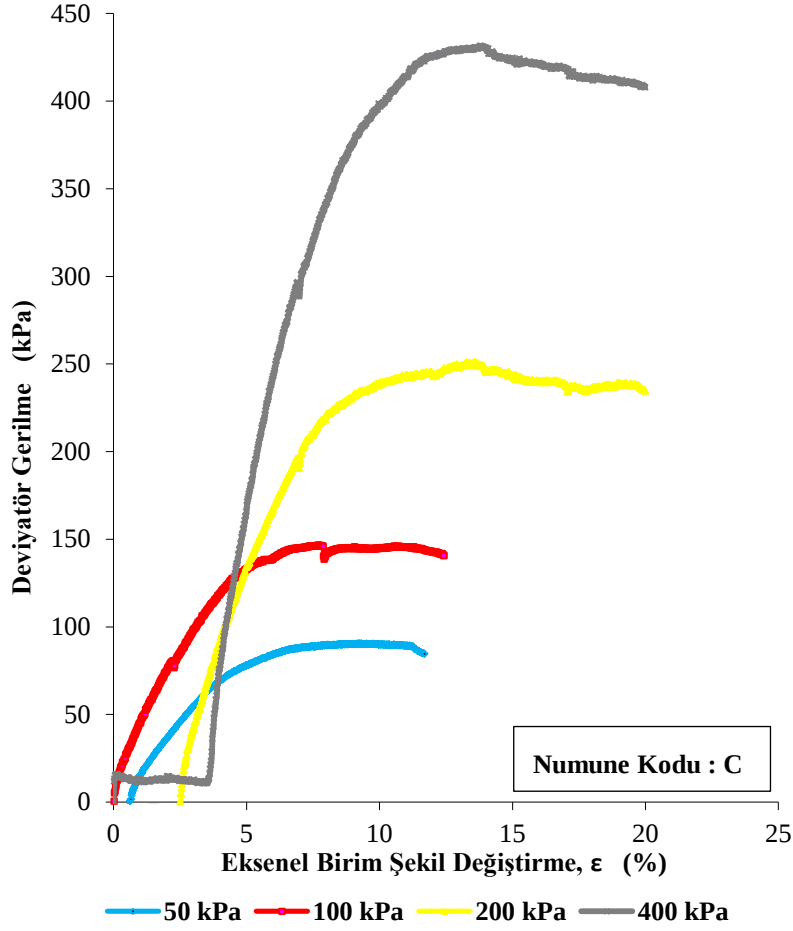
EK-34. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



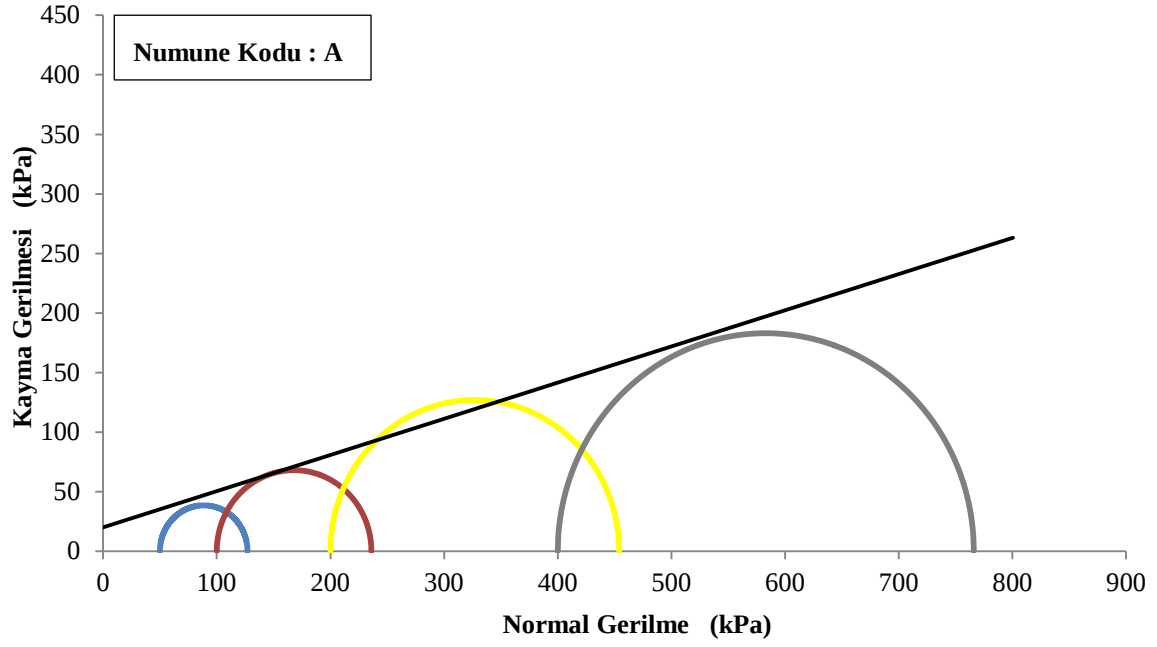
EK-35. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değıştirme grafiği



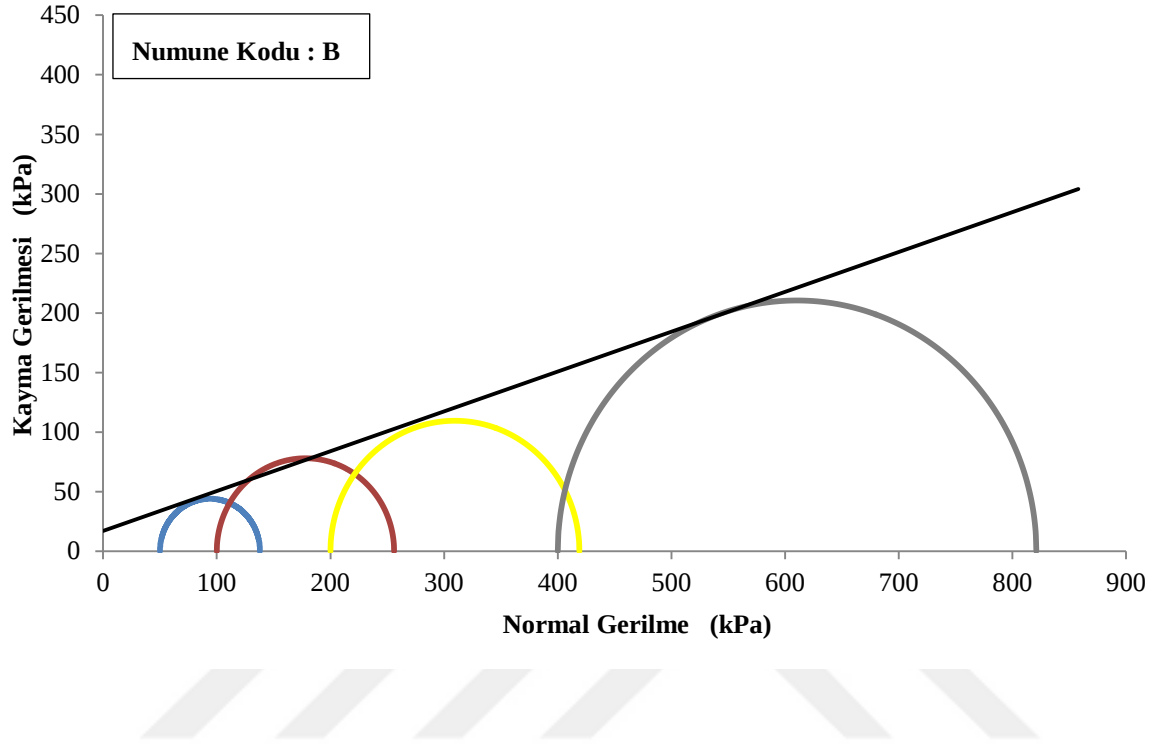
EK-36. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



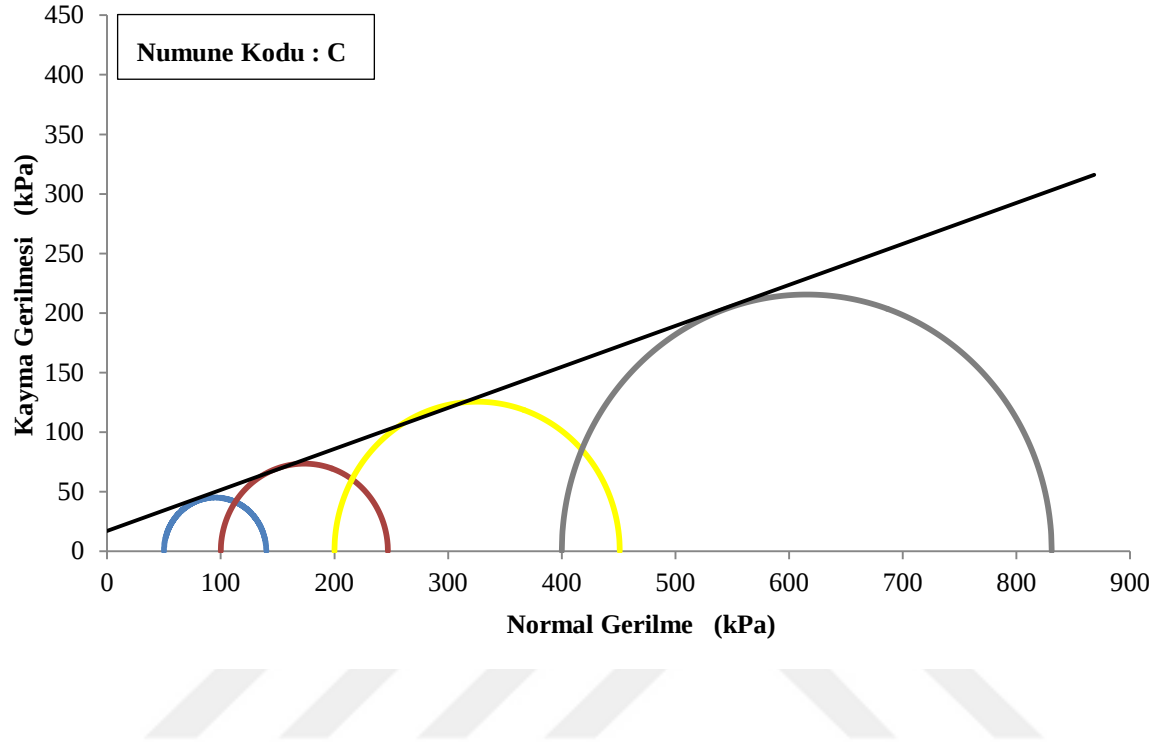
EK-37. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



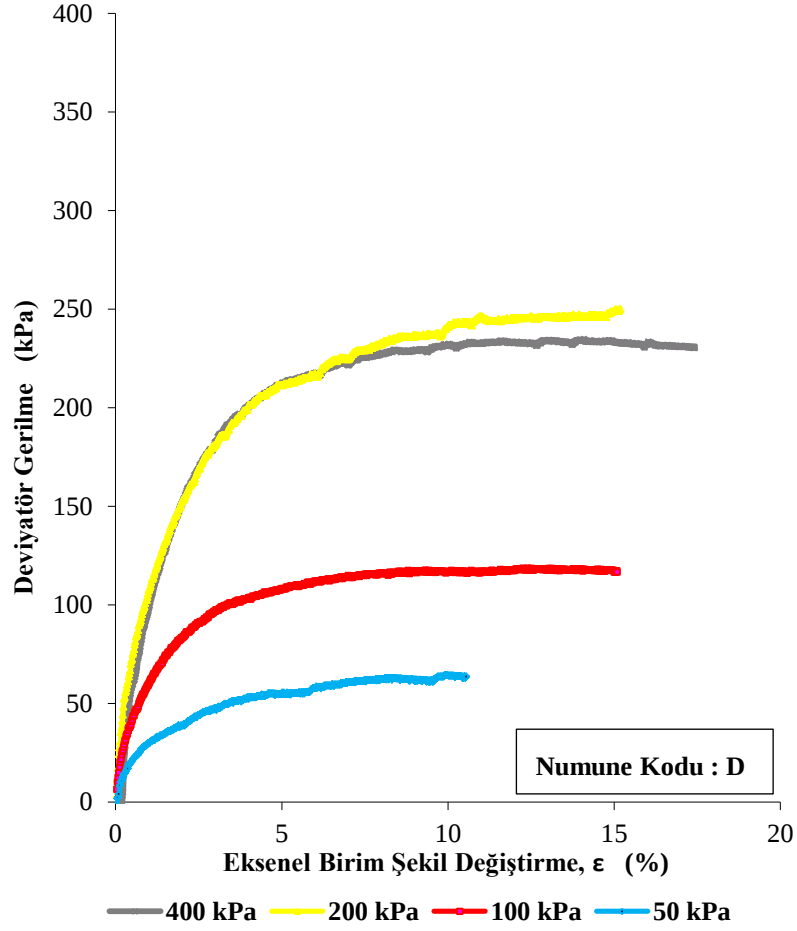
EK-38. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



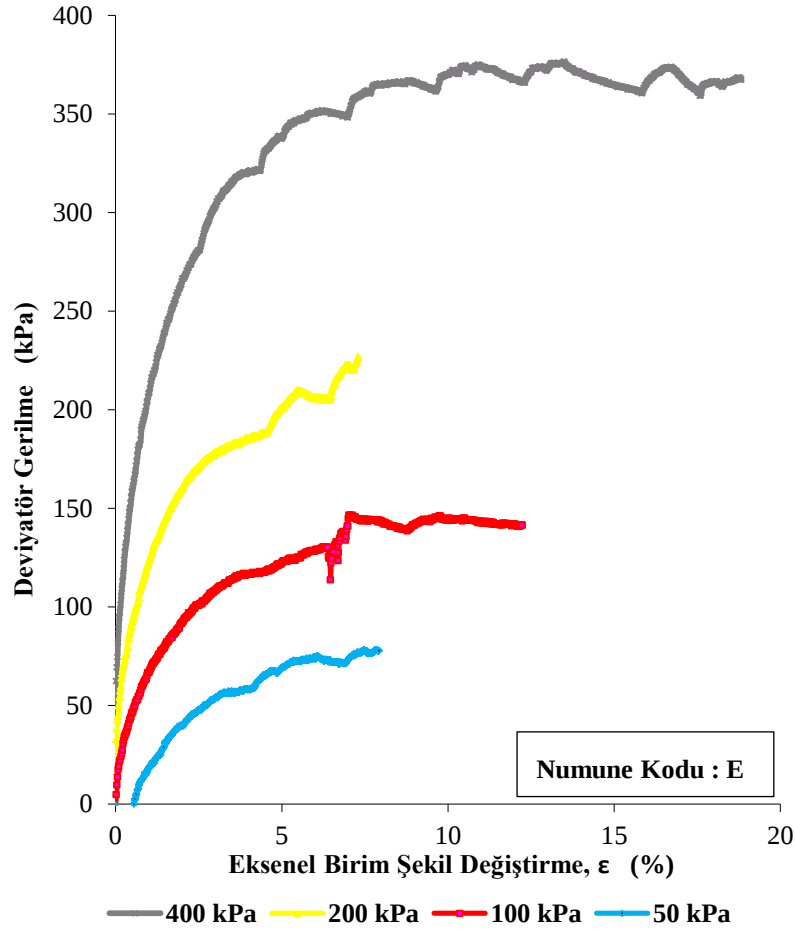
EK-39. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



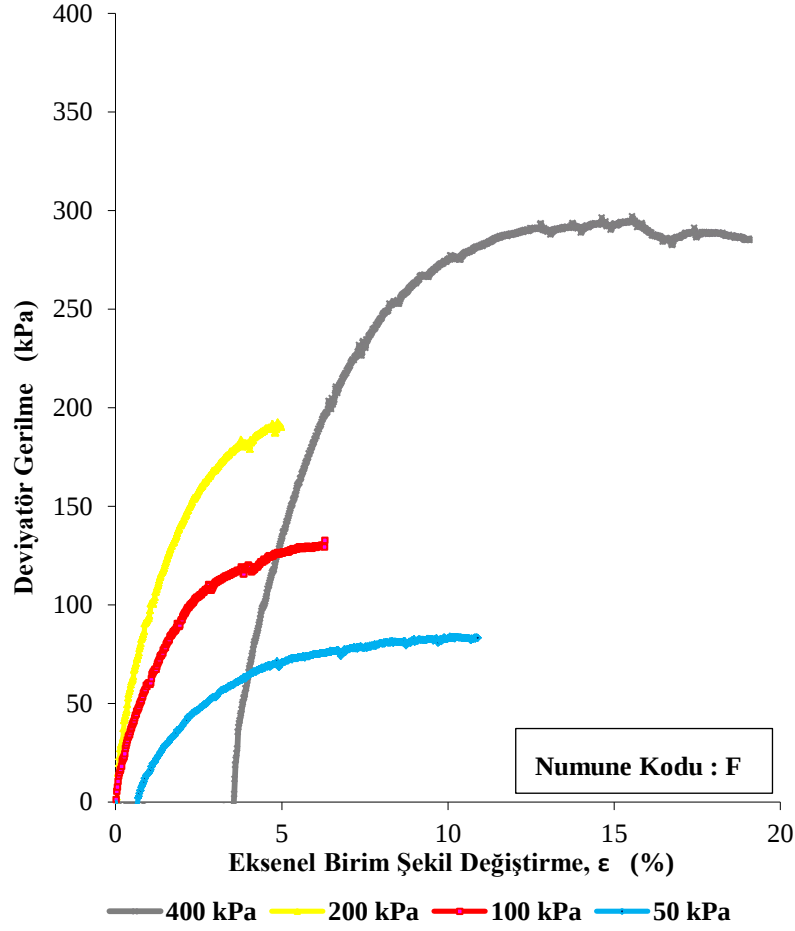
EK-40. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



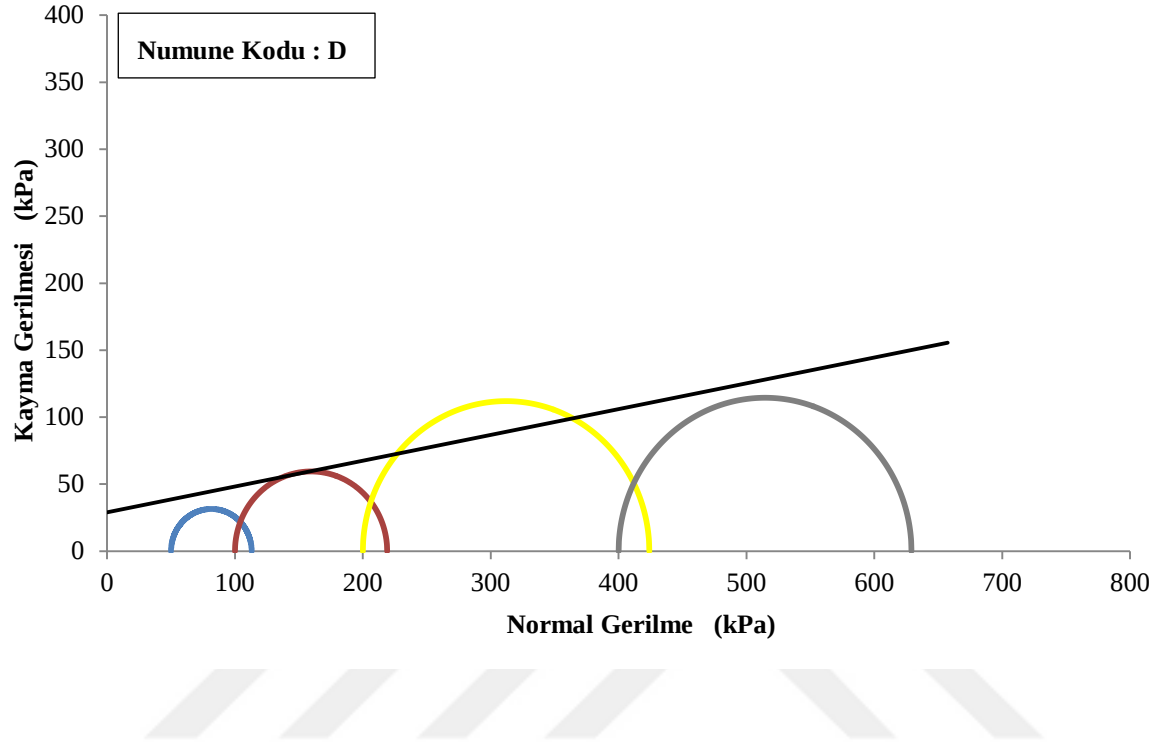
EK-41. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



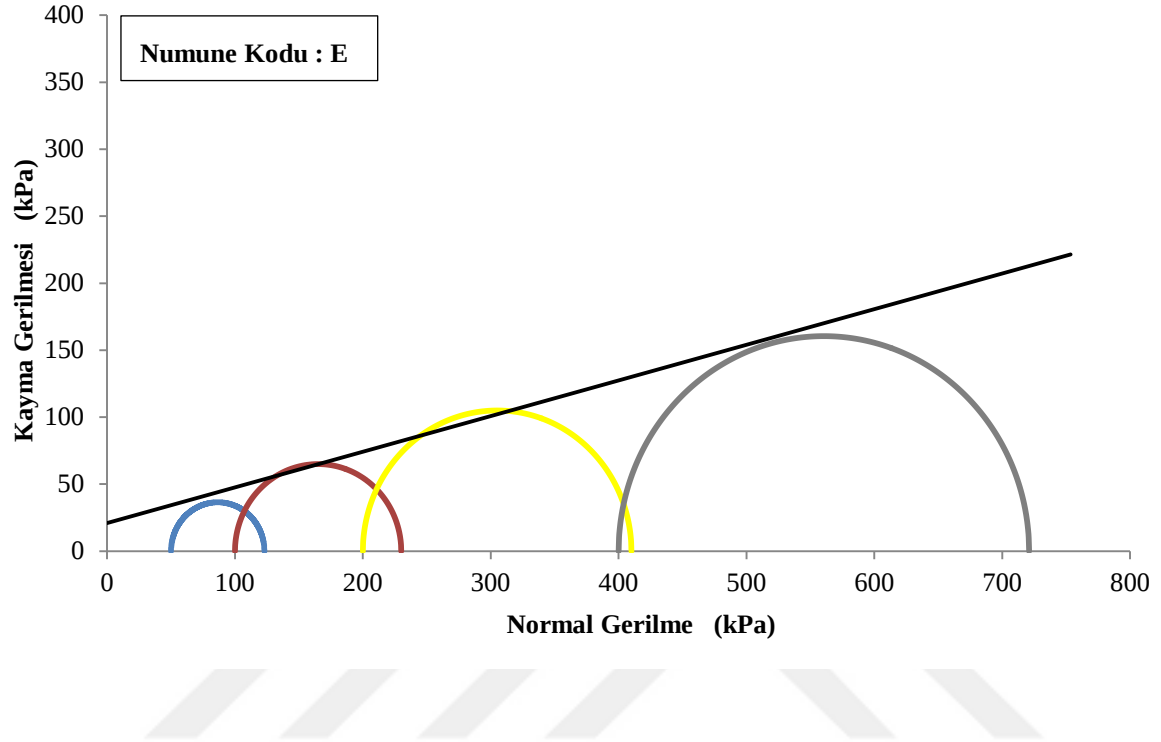
EK-42. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



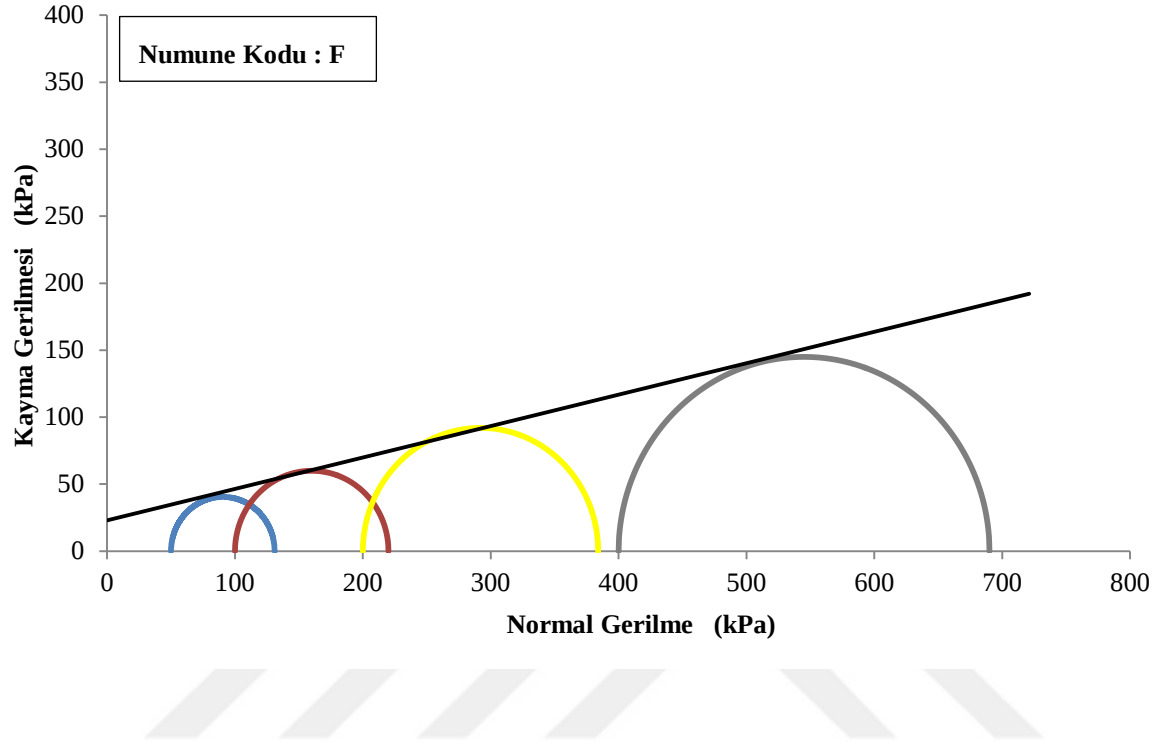
EK-43. Optimum su içeriğinin kuru tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



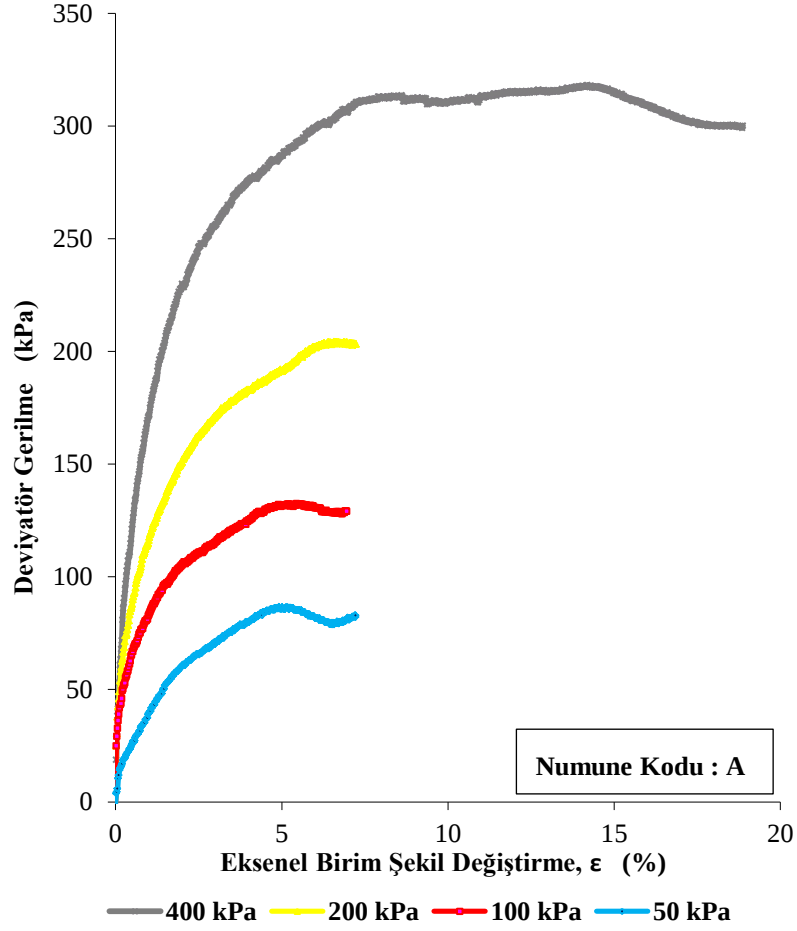
EK-44. Optimum su içeriğinde SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



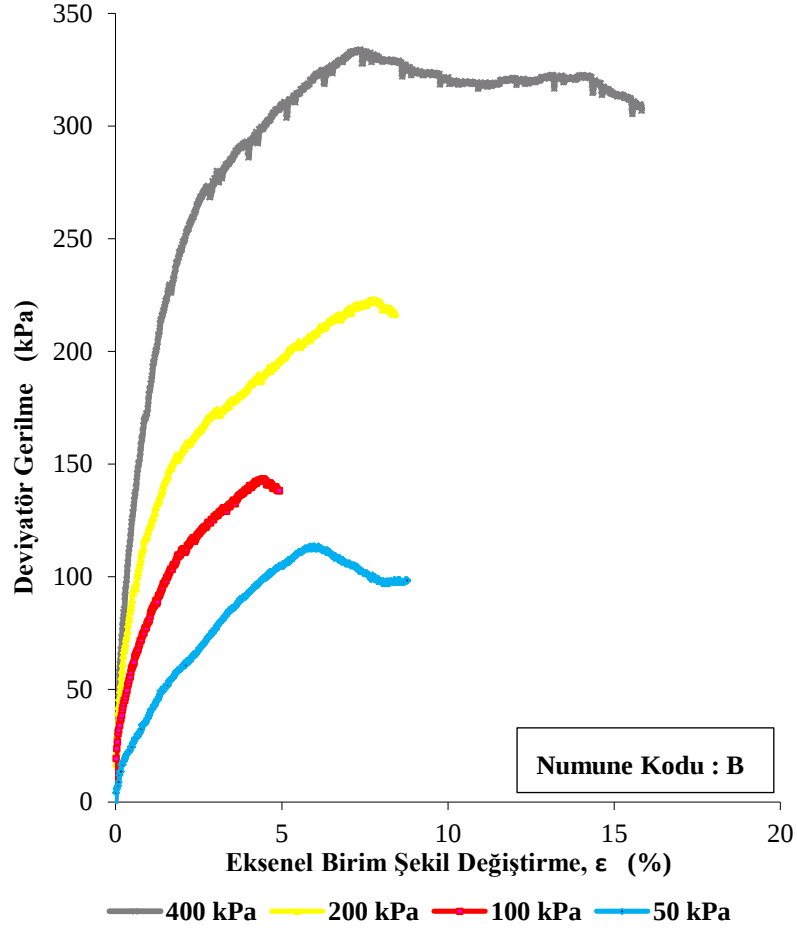
EK-45. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında SPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



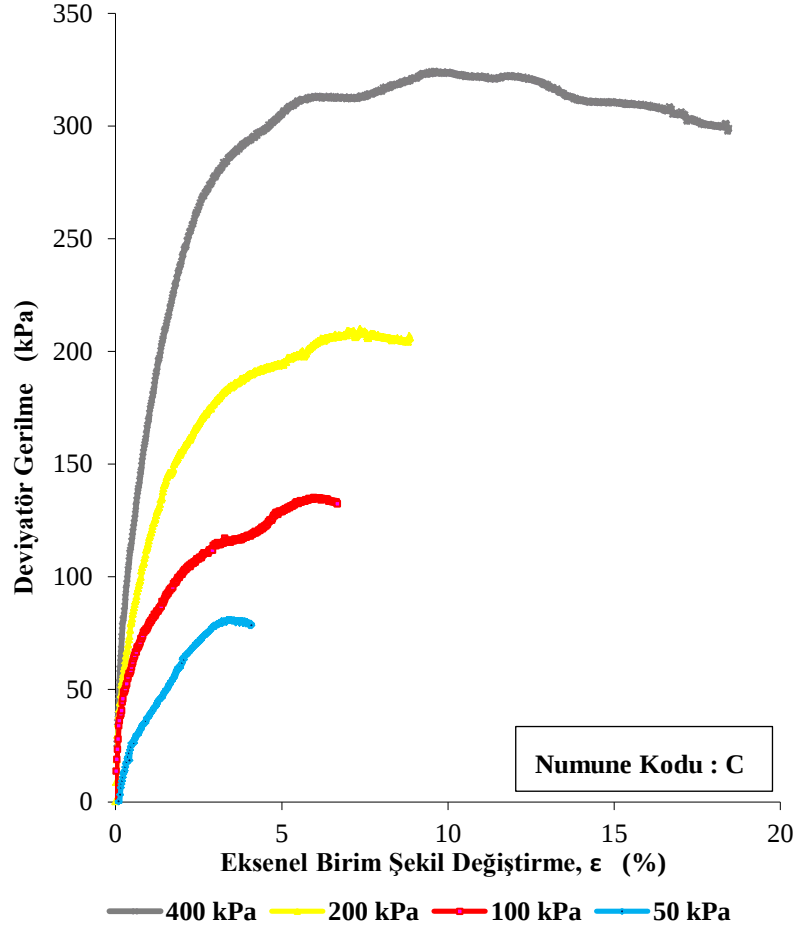
EK-46. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



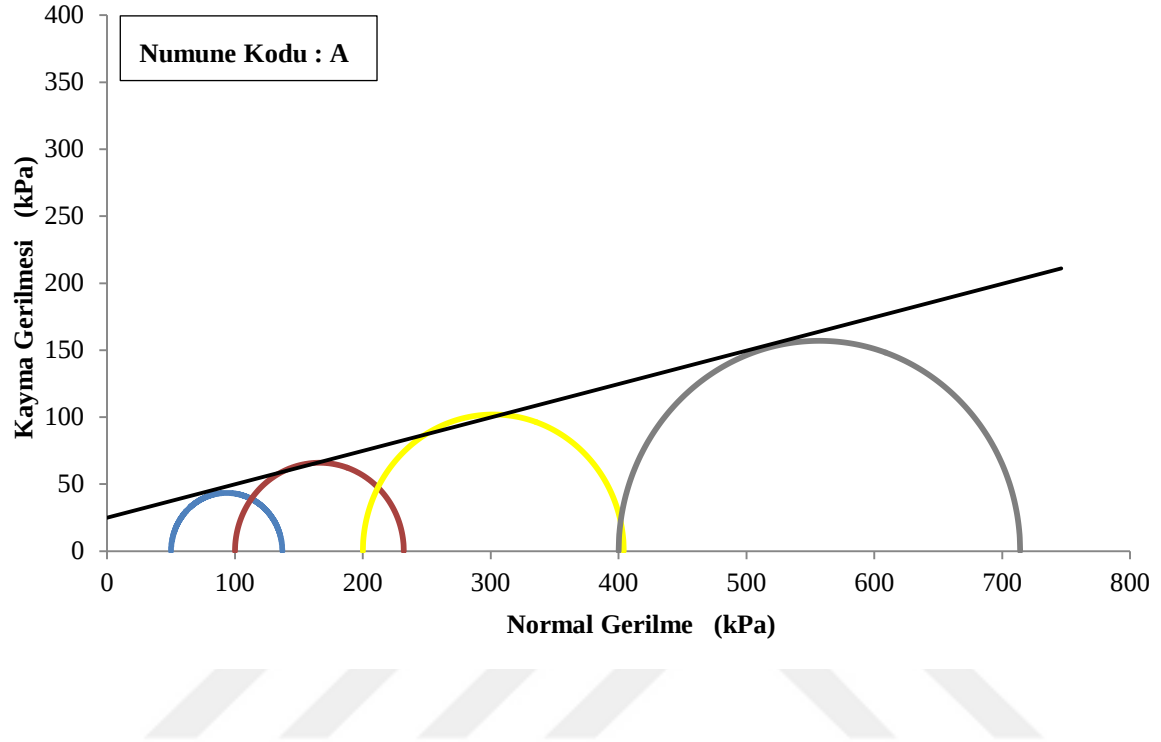
EK-47. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



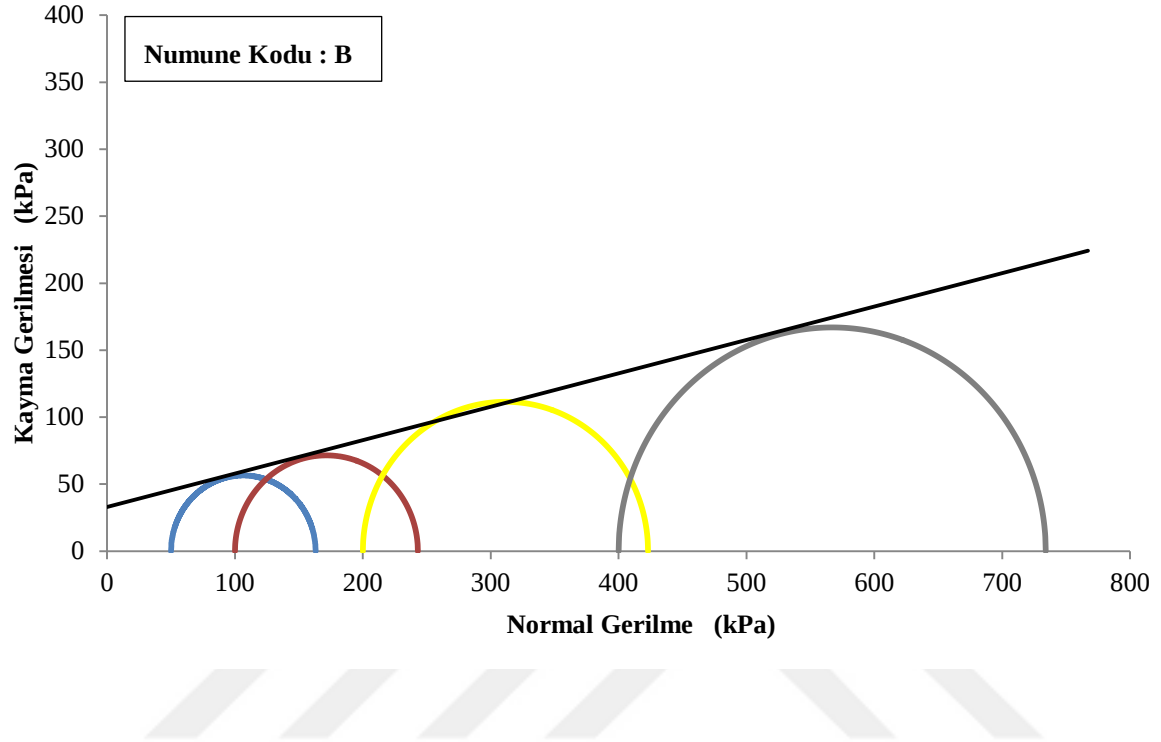
EK-48. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen deviyatör gerilme - eksenel birim şekil değiştirme grafiği



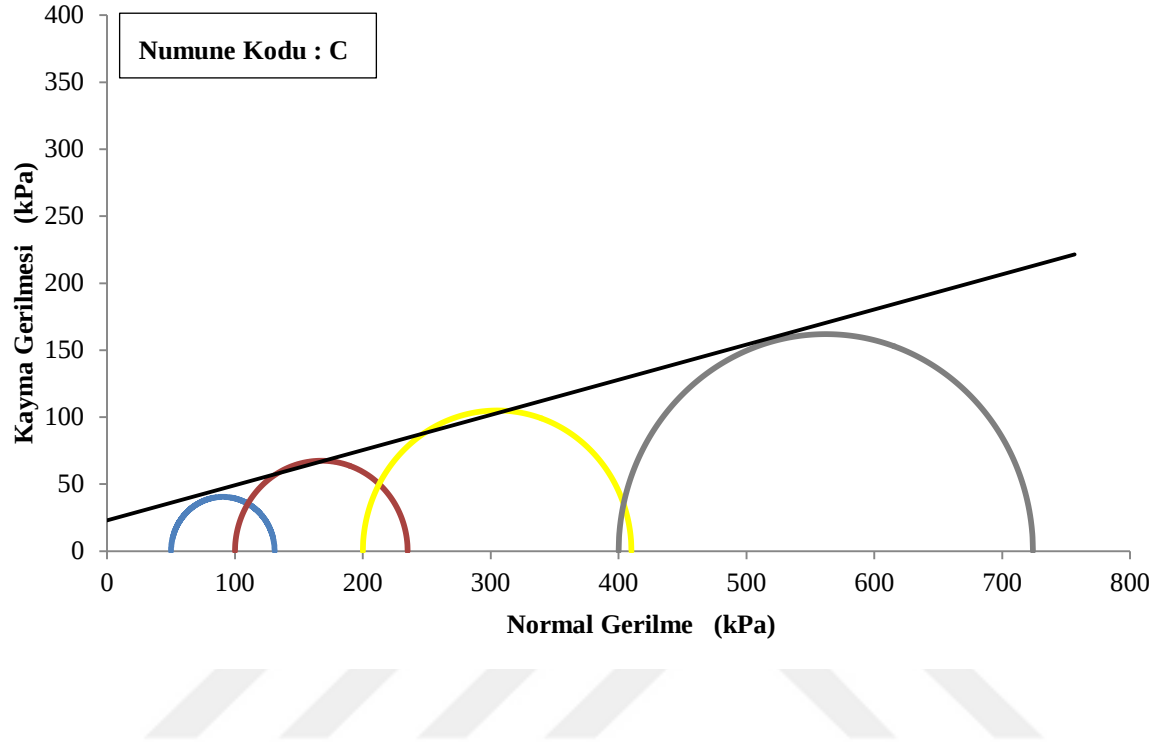
EK-49. Optimum su içeriğinin kuru tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



EK-50. Optimum su içeriğinde MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



EK-51. Optimum su içeriğinin ıslak tarafında MPE düzeyinde sıkıştırılmış numunelerde aşamalı CD (doyurarak) deneyinden elde edilen Mohr daireleri ve yenilme zarfı



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZKAYNAK, M. İrşad
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 23.02.1986, Elazığ
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (532) 696 46 99
 e-mail : mozkaynak@kgm.gov.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Fırat Üniversitesi /İnşaat Mühendisliği	2009
Lise	Elazığ Balakgazi Lisesi (Y.D.A.)	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	KGM - ARGE Dairesi Başkanlığı	Zemin Mek. Lab. Müh.
2011-2012	Uluova İnş. ve Mak. San. Ltd. Şti.	Şantiye Şefi
2010-2011	Bechtel – ENKA GP	Saha Müh.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Yılmaz, Y. ve Özkaynak, M. İ. (2014). Sıkıştırma Enerji Düzeyinin Kohezyonlu Bir Taban Zemininin Esneklik Modülüne Etkisinin Araştırılması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbeşinci Ulusal Kongresi*, 2, 975-984.

Hobiler

Edebiyat, yüzme, tarih ve fotoğrafçılık.



GAZİ GELECEKTİR..