

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİİTLİ NUMUNELERDE
ÇOK AŞAMALI (MULTISTAGE)
ÜÇ EKSENİİ DENEY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Dua KAYATÜRK**

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ertan BOL

Haziran 2021

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİİTLİ NUMUNELERDE
ÇOK AŞAMALI (MULTISTAGE)
ÜÇ EKSENİİ DENEY**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Dua KAYATÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 30.06.2021 tarihinde aşğıdaki jüri tarafından oybirliğı ile kabul edilmiştir.

BEYAN

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

Dua KAYATÜRK

30.06.2021

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım başta değerli danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL olmak üzere, Doç. Dr. Sedat SERT, Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK, Arş. Gör. Kadir KOCAMAN'a, laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından dolayı tekniker Recep EYÜPLER ve tekniker Sebahattin İŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Zeminlerin Kayma Mukavemeti	3
2.2. Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi	4
2.3. Kayma Mukavemeti Deneyleri	7
2.3.1. Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi	8
2.3.1.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi.....	10
2.3.2. Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi	15
2.3.2.1. Çok aşamalı deneyin sonlandırılması	17
2.3.2.2. Çok aşamalı deneyde yöntemler	21
2.3.2.3. Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinde göçme anındaki kırılma noktasının bulunması	22

2.4. Üç Eksenli Hücre Kesme Deneylerinde Deney Hızının Belirlenmesi	24
2.5. Mühendislik Uygulamalarında Efektif Parametrelerin Kullanımı	25

BÖLÜM 3.

MALZEME VE YÖNTEM	28
3.1. Kullanılan Numunelerin Fiziksel Özelliklerinin Tayini	28
3.2. Numune Hazırlama Yöntemi (Bulamaç/Slurry Yöntemi)	28
3.3. Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi	30
3.3.1. CD deneyi için numune hazırlanması ve hücreye yerleştirilmesi	32
3.3.2. Geleneksel CD deneyinin yapılması	33
3.3.3. Çok aşamalı CD deneylerinde konsolidasyon ve kesme aşamaları	39

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	40
4.1. Sınıflandırma Deneyleri	40
4.1.1. Özgül ağırlık	40
4.1.2. Kıvam limitleri	41
4.1.3 Dane çapı dağılımı	41
4.2. Üç Eksenli Hücre Kesme Deney Sonuçları	43
4.2.1. CD deneylerinde kesme hızının belirlenmesi	43
4.2.2. Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyleri sonuçları	45
4.2.3. Çok aşamalı (Multistage) üç eksenli hücre kesme deneyi sonuçları	49
4.2.2.1 Kondner metodu ile kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi	57
4.2.2.2. Eğri uydurma yöntemi ile kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi	59
4.2.2.3. Kayma direnci parametrelerinin karşılaştırılması ..	69

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 71

KAYNAKLAR 78

ÖZGEÇMİŞ 80



KISALTMALAR LİSTESİ

%10-G	: %10 bentonitle hazırlanmış numunelerde geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi
%10-M1	: %10 bentonitle hazırlanmış 1 no'lu numunelerde 1 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%2-G	: %2 bentonitle hazırlanmış numunelerde geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi
%2-M1	: %2 bentonitle hazırlanmış numunelerde 1 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%2-M2	: %2 bentonitle hazırlanmış numunelerde 2 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%2-M3	: %2 bentonitle hazırlanmış numunelerde 3 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%2-M4	: %2 bentonitle hazırlanmış numunelerde 4 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%2-M5	: %2 bentonitle hazırlanmış numunelerde 5 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%5-G	: %5 bentonitle hazırlanmış numunelerde geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi
%5-M1	: %5 bentonitle hazırlanmış numunelerde 1 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%5-M2	: %5 bentonitle hazırlanmış numunelerde 2 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi
%5-M3	: %5 bentonitle hazırlanmış numunelerde 3 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Sürtünme teorisi mekanizması (Das, 2008)	6
Şekil 2.2. Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Das, 2008)	6
Şekil 2.3. Üç eksenli hücre kesme deney düzeneği (Bol ve ark., 2021)	9
Şekil 2.4. Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi	12
Şekil 2.5. Konsolidasyonlu-Drenajlı basınç deneyi (Das, 2008)	13
Şekil 2.6. Kum ve normal konsolide killerde yapılan drenajlı deneyin efektif gerilme kırılma zarfı (Das, 2008)	14
Şekil 2.7. Aşırı konsolide killerde kırılma zarfı (Das, 2008)	14
Şekil 2.8. Zeminler için idealize edilmiş göçme kriterleri	19
Şekil 2.9. Önceki çalışmalarda kullanılmış deney sonlandırma kriterlerinin şematik gösterimi (Sharma, 2011)	20
Şekil 2.10. Çok aşamalı deneylerde döngüsel yükleme metoduna göre ideal gerilme-deformasyon grafiği (Ho ve Fredlund, 1982)	21
Şekil 2.11. Çok aşamalı deney gerilme-deformasyon grafiği (Shahin ve Cargeeg, 2011)	23
Şekil 2.12. Hiperbolik lineerizasyon eğrileri (Shahin ve Cargeeg, 2011)	23
Şekil 2.13. Çok aşamalı deneylerde hacimsel deformasyon ilişkisi (Sharma, 2011)	24
Şekil 2.14. Killerde bazı CD stabilite analizleri (Holtz ve ark., 2011)	26
Şekil 3.1. Bulamaç yöntemiyle numune hazırlanması	29
Şekil 3.2. Konsolidasyon hücresindeki numune	30
Şekil 3.3. Üç eksenli hücre kesme deney düzeneği	31
Şekil 3.4. CD deneyi öncesi numunenin hazırlanması	32
Şekil 3.5. Üç eksenli hücre kesme deney aleti	33
Şekil 3.6. Deney aşamaları	34
Şekil 3.7. Numunenin fiziksel özelliklerinin yazılıma girilmesi	35

Şekil 3.8. Hücre basıncı veri giriş ekranı	36
Şekil 3.9. Geri basınç veri giriş ekranı	36
Şekil 3.10. Konsolidasyon aşaması grafikleri	38
Şekil 3.11. Kesme aşaması grafikleri	39
Şekil 4.1. Numunelerin dane çapı dağılım grafiği	42
Şekil 4.2. %10-G-100 deneyi konsolidasyon grafiği	44
Şekil 4.3. %2-G deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiği	46
Şekil 4.4. %5-G deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiği	46
Şekil 4.5. %10-G deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiği	47
Şekil 4.6. %2-G deneyleri için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	48
Şekil 4.7. %5-G deneyleri için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	48
Şekil 4.8. %10-G deneyleri için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	48
Şekil 4.9. %2-M1 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	50
Şekil 4.10. %2-M2 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	51
Şekil 4.11. %2-M3 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	51
Şekil 4.12. %2-M4 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	52
Şekil 4.13. %2-M5 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	53
Şekil 4.14. %5-M1 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	53
Şekil 4.15. %5-M2 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	54
Şekil 4.16. %5-M3 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	54
Şekil 4.17. %10-M1 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği	55
Şekil 4.18. %5-M2 gerilme-deformasyon grafiğinin hiperbolik lineerizasyonu	58
Şekil 4.19. %2-M1 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	61
Şekil 4.20. %2-M2 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	62
Şekil 4.21. %2-M3 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	62
Şekil 4.22. %2-M4 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	63
Şekil 4.23. %2-M5 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	64
Şekil 4.24. %5-M1 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	64
Şekil 4.25. %5-M2 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	65
Şekil 4.26. %5-M3 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	65
Şekil 4.27. %10-M1 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler	66
Şekil 4.28. %2-M2 deneyi için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	68

Şekil 4.29. %2-M3 deneyi için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	68
Şekil 4.30. %5-M2 deneyi için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	68
Şekil 4.31. %5-M3 deneyi için Mohr-Coulomb kırılma zarfı	69
Şekil 5.1. Adapazarı kilinde çok aşamalı deneylerden elde edilmiş efektif kayma direnci parametreleri (Öntürk, 2021)	73



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Kırılma kriterleri arasındaki farklar (Budhu, 2011)	4
Tablo 2.2. Kum ve silt zeminler için efektif içsel sürtünme açısı değerleri (Das, 2008)	6
Tablo 3.1. Bulamaç çamuru için bileşenlerin miktarları	29
Tablo 4.1. Numunelerin zemin sınıfları	41
Tablo 4.2. Numunelerde bulunan kil, silt ve kum oranları	42
Tablo 4.3. Deney hızları	44
Tablo 4.4. Çok aşamalı deneylerde %15 deformasyondaki gerilmeler	56
Tablo 4.5. Çok aşamalı deneylerde a, b parametreleri ve kayma direnci parametreleri	58
Tablo 4.6. Çok aşamalı deneylerde kullanılan y_0 ve a katsayıları	60
Tablo 4.7. Eğri uydurma ile elde edilen kayma direnci parametreleri	67
Tablo 4.8. Farklı yöntemlerden elde edilen kayma direnci parametreleri	69
Tablo 5.1. Farklı yöntemlerden ve geleneksel deneylerden elde edilen kayma direnci parametrelerinin yüzde cinsinden yakınlığı	76

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çok aşamalı deney, Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli deney, eğri uydurma

Zeminleri tanımlayabilmek için laboratuvar ortamında uygulanan üç eksenli hücre kesme deneyi, zeminin kayma direncinin tayininde kullanılan deneylerden biridir. Kayma mukavemetini belirleyen parametrelerin elde edilebilmesi için üç eksenli hücre kesme deneyine tabi tutulan zeminin aynı özellik gösteren en az üç numunesinde bu deneyin uygulanması gerekir. Bu durumun aynı özellik gösteren numunelerin elde edilmesinin arazi şartlarından dolayı zor olması, zaman kaybı, ekonomik endişeler gibi sorunları beraberinde getirmesiyle zemin hakkında bilgi edinmeyi zorlaştırmaktadır. Bu noktada çok aşamalı (multistage) deneyler belirtilen sorunlara çözüm olmak adına geliştirilmiştir. Literatürde çok aşamalı deneylerin avantajlarının yanında güvenilir zemin davranışı ya da doğru kesme mukavemeti parametrelerinin elde edilememesi dezavantajları da bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında çok aşamalı deney yönteminin normal konsolide killerin Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre deneylerinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Farklı kil oranlarındaki killi zeminler ile yeniden oluşturularak hazırlanmış silindirik numuneler üzerinde hem geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi hem de çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi yürütülmüş ve deneyler çeşitlendirilerek kayma mukavemeti parametreleri karşılaştırılmıştır. Geleneksel ve çok aşamalı yöntemlerden elde edilen kayma direnci parametreleri arasındaki farklar incelenmiştir. Literatürde uygulanan çalışmaların yanında kayma direnci parametrelerinin bulunması için yeni bir yöntem daha uygulanmış ve tartışılmıştır. Uygulanan bu yeni yöntemin de umut verici sonuçlar sunduğu gözlenmiştir.

MULTISTAGE TRIAXIAL TEST ON SILTY SOILS

SUMMARY

Keywords: Multistage test, Consolidated-Drained triaxial test, curve fitting

The triaxial compression tests applied in the laboratory to define soils are one of the test methods used to determine the shear strength of the soil. In order to obtain the parameters determining the shear strength, this test should be applied on at least three samples of the soil subjected to the triaxial test, having the same characteristics. This situation makes it difficult to obtain information about the soils due to problems such as the difficulty of obtaining samples with the same characteristics due to field conditions, loss of time, and economic concerns. At this point, multistage tests have been developed to solve these problems. Contrary to the advantages of multistage tests in the literature, there are also disadvantages of not obtaining reliable soil behavior or accurate shear strength parameters.

Within the scope of this study, the usability of the multistage test method in normally consolidated clayey silt soils with consolidated drainage triaxial tests was investigated, and both conventional triaxial tests and multistage tests were performed on cylindrical specimens prepared by reconstituted. The tests were carried out on clayey silty soils with different clay ratios. Thus, the shear strength parameters obtained from the tests were diversified and the obtained parameters were compared. The differences between the shear strength parameters obtained from conventional and multistage methods were investigated. In addition to the studies applied in the literature, a new method has been applied and discussed to find the shear strength parameters. It has been observed that this new method applied also gives promising results.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Geoteknik problemlerdeki çözümler için zeminin özelliklerinin tanımlanması gerekir. Zeminin oldukça önemli bir özelliği olan kayma direncinin belirlenmesi geoteknik problemlere yaklaşımı kolaylaştırmaktadır. Kayma direncinin laboratuvar ortamında belirlenmesinde en çok kullanılan deney yöntemi üç eksenli hücre kesme deneyidir.

Geleneksel yöntemlerle yapılan üç eksenli hücre kesme deneyinde kırılma zarfının elde edilmesi için üç veya daha fazla sayıda numuneye ve aynı sayıda deney yapılmasına ihtiyaç duyulur. Yeniden hazırlanmış numunelerde aynı numunenin homojen biçimde hazırlanması ya da araziden alınmış örselenmemiş numunelerin arazinin durumunu yansıtamaması gibi numune içeriği ile ilgili sorunlar, ekonomik sebepler ve deneylerin zaman alıyor oluşu çok aşamalı (*multistage*) deneyleri alternatif bir yöntem olarak öne çıkarmaktadır. Çok aşamalı deneylerde bir numuneye artan farklı efektif gerilmeler uygulanarak tek bir numune ile kırılma zarfının elde edilebilmesi, geleneksel yöntemlere kıyasla pratik bir yöntem olmasını sağlamaktadır.

De Beer (1950)'ın yaptığı çalışma çok aşamalı (*multistage*) deneylerdeki ilk çalışma olmuş ve bu çalışmadan bu yana pek çok çalışma yürütülerek çok aşamalı deneylerin elverişliliği araştırılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında Konsolidasyonlu-Drenajsız (CU) deneylerinin Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) deneylere kıyasla daha çok yürütüldüğü gözlenmiştir. Konsolidasyonlu drenajlı yöntem uzun süreli (efektif gerilme) analizlerinde kullanılan bir deney yöntemi olup permeabilitesi düşük zeminlerde yükleme esnasında boşluk suyu basınçlarında artış gözlenmemesi için deney sürecinin çok yavaş gerçekleşmesi sebebiyle yürütülmesi uzun zaman alan bir deneydir. Bu yöntemdeki diğer bir zorluk ise deneyde kullanılacak numunelerin özdeş olmama durumudur. Zira araziden gelen örselenmemiş numune alıcı içindeki zemin örneğinin tamamı benzer özellikler sunmayabilir. Bu durum Adapazarı gibi düşeyde çok ince farklı tabakalar sunan

taşıyarak oluşmuş flüviyal kökenli alüvyon ortamlarda oldukça yaygındır. Bu durumda her farklı konsolidasyon basıncı altında aslında farklı bir numune ile deney yürütülmektedir.

Bu çalışma kapsamında da çok aşamalı deneylerin CD yöntemiyle araştırılması killi numuneler üzerinde yapılmıştır. Hem geleneksel hem de çok aşamalı konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleri, farklı kil oranlarındaki killi zeminler ile yeniden oluşturularak (*reconstitute*) hazırlanmış silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çok aşamalı deneylerde kullanılan farklı yöntemler denenerek, ilk ve ara aşamalardaki deformasyon miktarları çeşitlendirilerek elde edilebilecek farklı dayanımlar incelenmiştir.

Çalışma sonucunda çok aşamalı deneylerin, geleneksel deneylerden elde edilen veriler ile karşılaştırıldığında yoruma açık olsa bile yaklaşık olarak doğru değerler verdiği gözlenmiştir. Yükleme aşamalarındaki deformasyon miktarlarının önemi açık bir şekilde belirlenmiştir. Farklı kil oranları ile hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan deneylerin kesme hızlarının belirlenmesine yönelik ön araştırmalar yapılmıştır. Geleneksel ve çok aşamalı deney yöntemlerinden elde edilen kayma direnci parametrelerindeki farklar incelendiğinde çok aşamalı deneylerden tahmin edilen kayma direnci parametrelerinin farklı yöntemlerle farklı sonuçlarda olduğu görülmüştür. Literatürde önerilen yöntemlerin yanı sıra çok aşamalı yöntemden tahmin edilen kayma direnci parametrelerinin elde edilmesi için yeni bir yöntem daha denenmiş ve edinilen sonuçlara bakıldığında umut verici sonuçlarla karşılaşıldığı görülmüştür.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Zeminlerin Kayma Mukavemeti

Bir zemin kütlesinin kayma mukavemeti, birim alan başına zemin kütlesinin bozulmaya ve içindeki herhangi bir düzlem boyunca kaymaya direnmek için sunabileceği iç dirençtir. Mühendisler, dayanma yapılarının taşıma kapasitesi, şev stabilitesi ve yanal basınca maruz yapıların stabilite sorunlarını analiz etmek için kayma direncinin doğasını anlamalıdır (Das ve Sivakugan, 2008).

Zeminlerin ve kayaların kayma mukavemetinin geoteknik mühendisliği kapsamında incelenen en önemli konulardan biri olmasının sebebi, zeminle ilişkili pek çok mühendislik probleminde karşılaşıyor olmasıdır. Sığ ve derin temellerin taşıma gücü, şev stabilitesi, istinat duvarı tasarımı ve dolaylı olarak da yol kaplaması tasarımı, bir şevdeki, istinat duvarı arkasındaki veya bir temel ya da kaplamayı oluşturan zeminin kayma mukavemetinden etkilenmektedir. Yapılar ve şevler, beklenen maksimum yükleme koşullarına tabi tutulduğunda, toptan göçmeye karşı kararlı ve güvenli olmalıdırlar. Temel ve şevlerin tasarımında, nihai veya limit durum, limit denge yöntemi ile göçme veya göçme durumları analiz edilmektedir. Bu yöntemler, zeminin ve kayanın nihai veya limit kayma mukavemetinin tanımlanmasına gereksinim duyarlar (Holtz ve ark., 2010).

Zeminlerde kayma mukavemetinin tanımlanabilmesine yönelik olarak zeminin göçme sınır durumu olan kırılma zarfının belirlenebilmesi için kırılma zarfı hipotezleri oluşturulmuştur. Bu hipotezlere Coulomb, Mohr-Coulomb, Tresca, Taylor hipotezleri örnek verilebilir. Budhu (2011), bu kırılma hipotezlerinin hangi kriterlere bağlı olduğunu ve hangi koşullarda kullanıldığını Tablo 2.1.'de ifade etmiştir.

Tablo 2.1. Kırılma kriterleri arasındaki farklar (Budhu, 2011)

Ad	Kırılma Kriteri	Malzeme Tanımı	En Uygun Kullanım
Coulomb (1776)	Kayma düzleminde sürtünmeden dolayı oluşan kayma	Rijit ve sürtünmeli malzeme	Tabakalı halde bulunan veya aşırı konsolide zeminler
Mohr-Coulomb (1911)	Kayma düzleminde sürtünmeden ve max efektif gerilmeden dolayı oluşan kayma	Rijit ve sürtünmeli malzeme	Drenajlı koşullarda aşırı konsolide ince daneli zeminler veya sıkı kaba daneli zeminler
Tresca (1869)	Max gerilmenin yarısında oluşan kayma	Homojen-katı malzeme	Drenajsız koşullarda ince daneli zeminler
Taylor (1948)	Danelerin kenetlenmesinden dolayı oluşan, sürtünme etkisinde meydana gelen kayma	Şekil değiştirebilir, sürtünmeli katı	Drenajlı veya drenajsız koşullarda homojen özellik gösteren zeminler

2.2. Mohr-Coulomb Kırılma Hipotezi

Mohr (1900), malzemelerdeki kırılma için bir teori sunmuştur. Sunduğu bu teoride, bir malzemenin tek başına maksimum normal veya kayma gerilmesinden değil, normal gerilme ve kayma gerilmesinin bir kombinasyonu nedeniyle kırıldığını ifade etmiştir. Normal gerilme ile bir göçme düzlemindeki kayma gerilmesi arasındaki fonksiyonel ilişki şu şekilde ifade edilebilir:

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (2.1)$$

Burada;

τ_f = kırılma düzlemindeki kayma gerilmesi (kayma mukavemeti)

σ = kırılma düzlemindeki normal gerilme olarak tanımlanmaktadır.

Mohr (1900)'un önerdiği Denklem 2.1'de tanımlanan kırılma zarfı eğri bir çizgiyi temsil etmektedir. Coulomb (1776), pek çok zemin mekaniği problemi için kırılma

düzlemindeki kayma gerilmesini normal gerilmenin bir fonksiyonu olarak tahmin etmenin yeterli olacağını belirtmiştir. Mohr ve Coulomb'un teorilerinin ilişkisi şu şekilde ifade edilebilir:

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

Burada;

c = kohezyon

ϕ = içsel sürtünme açısı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 2.2'de ifade edilmiş olan eşitlik Mohr-Coulomb kırılma kriteri olarak tanımlanmıştır.

Suya doymun durumda toplam gerilme, efektif gerilme ve boşluk suyu basıncı ilişkisi;

$$\sigma = \sigma' + u \quad (2.3)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

Burada;

σ' = efektif normal gerilme

u = boşluk suyu basıncı olarak tanımlanmaktadır.

Efektif gerilmeler zemin daneleri tarafından taşınmaktadır. Mohr-Coulomb kırılma hipotezinin efektif gerilmelere göre tekrar yazılmasıyla kayma gerilmesi;

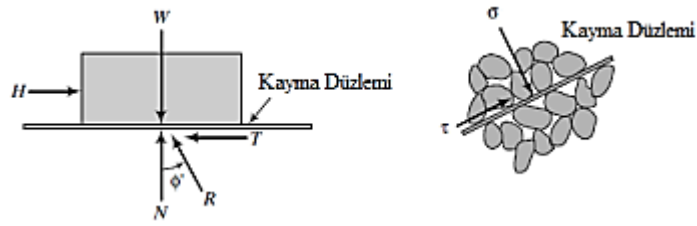
$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \cdot \tan\phi' = c' + \sigma' \cdot \tan\phi' \quad (2.4)$$

bağıntısı ile gösterilir. Burada;

c' = efektif kohezyon

ϕ' = efektif kayma direnci açısı olarak ifade edilir.

Mohr-Coulomb sürtünme teorisinin mekanizması Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.

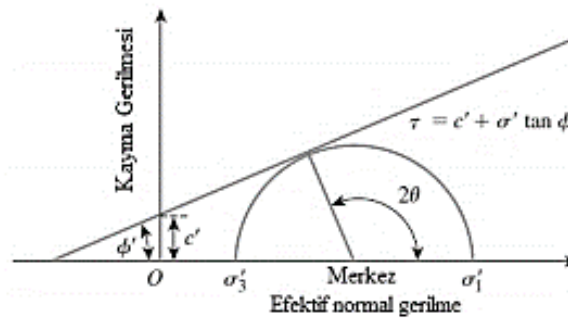


Şekil 2.1. Sürtünme teorisi mekanizması (Das, 2008)

Kohezyon değerleri kum ve inorganik silt için 0, normal konsolide killer için yaklaşık 0 olarak hesaplanmıştır. Aşırı konsolide killer, 0'dan büyük kohezyon değerlerine sahiptir. Bazı zeminler için tipik kayma direnci açısı değerleri Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Kum ve silt zeminler için efektif kayma direnci açısı değerleri (Das, 2008)

Zemin Tipi	ϕ'
Kum (Yuvarlak Daneli)	
Gevşek	27-30
Orta	30-35
Sıkı	35-38
Kum (Köşeli Daneli)	
Gevşek	30-35
Orta	35-40
Sıkı	40-45
Çakıllı Kum	34-48
Kil	15-35
Silt	26-35



Şekil 2.2. Mohr-Coulomb kırılma zarfı (Das, 2008)

Şekil 2.2.'de gösterilen kırılma zarfı zeminin göçme sınır durumunu temsil etmektedir. Zarfın altı göçmenin meydana gelmediği durumu, zarfın üstü zemin göçtükten sonraki durumu tanımlar. Kırılma zarfının y ekseniiyle olan kesişimi zeminin kohezyon değeri, x ekseniiyle yaptığı açı ise zeminin kayma direnci açısını gösterir. Denklem 2.2'de de verilmiş olan kırılma zarfı denklemi ile zeminde herhangi bir gerilme değeri karşılık gelen kayma gerilmesi elde edilir.

2.3. Kayma Mukavemeti Deneyleri

Belirli bir zemin için kayma mukavemeti parametreleri, yerinde zeminin temsili örneklerinden alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri vasıtasıyla belirlenebilir. Numune alma işlemi sırasında ve deneyler öncesinde numunelerin depolanıp taşınmasında, özellikle zeminin yapısını ve su içeriğini korumak için büyük özen ve muhakeme gereklidir. Killer söz konusu olduğunda, deney numuneleri ince cidarlı (shelby) tüpler veya blok numunelerden elde edilebilir, blok numuneler normal olarak en az örselenmeye maruz kalır (Craig, 2004).

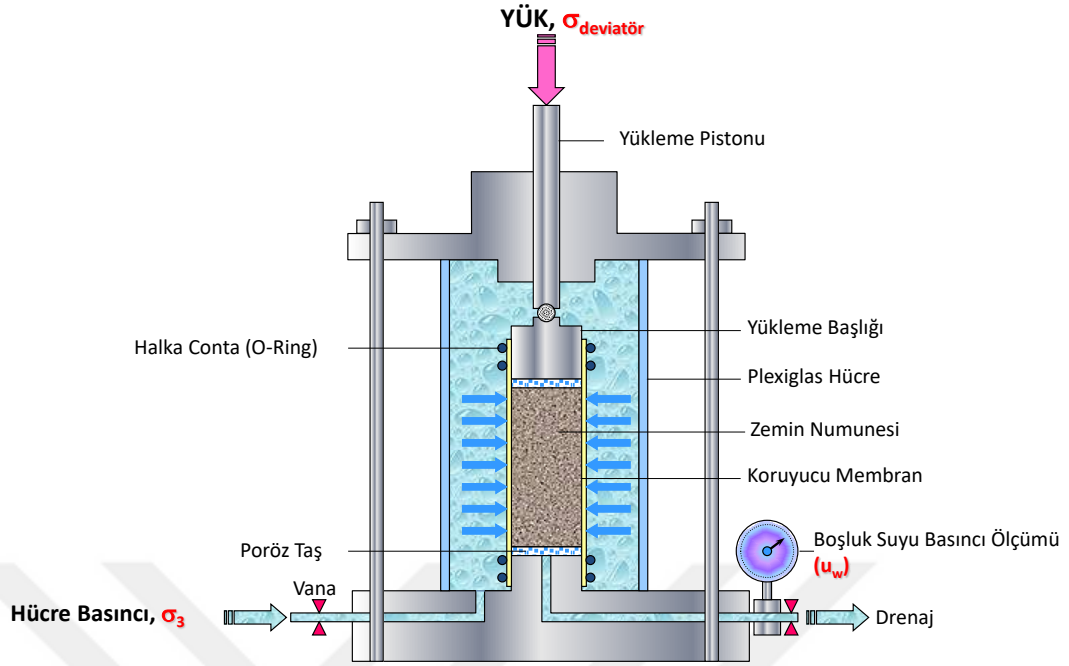
İnce daneli zeminlerde dane boyutlarının küçük olması kohezyon etkisi yaratır. Kohezyon, moleküller arası çekim kuvvetini ifade eder. İnce daneli zeminlerin kayma mukavemetinin belirlenmesinden kohezyon etkisi göz ardı edilemez. Suyu doygunluk derecesi, gerilme geçmişi, başlangıç koşulları, yükleme ve drenaj koşulları ince daneli zeminlerde kayma mukavemetini etkileyen faktörlerdir.

Bir zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin laboratuvar ortamında belirlenebilmesi için genellikle iki tür deneyden yararlanılır. Biri doğrudan kesme (kesme kutusu) deneyi, diğeri ise üç eksenli hücre kesme deneyidir (Das, 2008). Bu deneylerin yanı sıra kayma mukavemetinin belirlenmesi için direk kesme ve veyn deneylerinden de yararlanılmaktadır.

2.3.1. Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi

Üç eksenli hücre kesme deneyinde eksenel gerilmelerin yanı sıra yanal gerilmelerin de oluşturulabilmesiyle arazideki yükleme ve drenaj koşullarının laboratuvarda gerçeğe en yakın şekilde modellenenebilmesi bu deneyin yaygın olarak kullanılmasının en önemli sebebidir. Böylelikle kayma mukavemeti parametreleri gerçeğe yakın olarak belirlenebilir (Tan, 2013). Bu sayede araziden alınmış örselenmemiş numune veya laboratuvar ortamında hazırlanmış numune, deney hücresi içinde arazi koşullarına benzer gerilmeler oluşturularak deneye tabi tutulur. Das (2008) üç sebepten dolayı üç eksenli deneyin daha sağlıklı sonuçlar verdiğini ifade etmiştir; (i) doğrudan kesme deneyinin uygulanamadığı zeminlerde gerilme-şekil değiştirme davranışı hakkında bilgi sağlaması; (ii) kırılma düzlemi boyunca oluşturulan eşit gerilme dağılımı ile doğrudan kesme deneyinden daha düzgün gerilme koşullarının oluşması; (iii) yüklemenin çeşitlendirilebiliyor olması. Craig (2004), drenaj koşullarının kontrol edilebiliyor olması, deney sırasında boşluk suyu basınçlarının ölçümünün yapılabilmesi ve düşük geçirgenliğe sahip doygun zeminlerin gerekirse deney prosedürünün bir parçası olarak konsolide edilebiliyor olması sebeplerinden dolayı üç eksenli hücre kesme deneyini avantajlı olarak görmüştür.

Üç eksenli hücre kesme deneyi, yükseklik/çap oranı 2 olan, yaygın olarak 38.1mm, araştırma veya özel amaçla 50, 70 veya 100 mm çaplı numuneler üzerinde yapılır. Yükseklik/çap oranı 2'den büyük numunelerde burkulma, 2'den küçük numunelerde ise kesme yüzeyinin başlıkla sınırlandırılması sorunu ortaya çıkar (Tan, 2013).



Şekil 2.3. Üç eksenli hücre kesme deney düzeneği (Bol ve ark., 2021)

Şekil 2.3.'te üç eksenli hücre kesme deney cihazının şematik bir çizimi görülmektedir. Sistemin merkezinde konumlanmış olan tabanda drenaj ve gözenek basınçlarının ölçülmesi için kanallar mevcuttur. Hücre silindirik şekildedir ve içine doldurulan sıvı yardımıyla hücre basıncının oluşturulacağı bu alanı sınırlandırır. Hücrenin üst noktasında bulunan yükleme pistonu da sistemin merkezine konumlandırılmıştır. Hücre yerleştirilirken contalar vasıtasıyla sızdırmazlığın sağlanması için sisteme sıkıca sabitlenir (Craig 2004).

Zemin numunesi geçirimsiz lastik kılıf/membran içindedir. Membran, hücre sıvısı (su) ile boşluk suyunu ayırır. Numunenin alt ve üstünde poroz taş ve filtre bulunur. Numune basınca dayanıklı bir şeffaf hücre içerisine yerleştirilir. Deney hücresine yerleştirilen numune kendi kendine ayakta durabilen bir numune değilse dondurulduktan sonra deney hücresine yerleştirilebilir. Hücre sıvısı olarak damıtık su kullanılır. Su, numuneye her yönden hücre basıncını (σ_3) uygular. Hücre tabanında dışarıdan sabit hücre basıncı bağlantısı, numune tabanına ve üst başlığına isteğe göre drenaj ya da boşluk suyu basıncı ölçme bağlantıları bulunmaktadır. Konsolidasyonlu deney yapılmak istendiğinde drenaj musluğu açılır, buraya bir hacim ölçer bağlanarak numune içine giren veya numuneden çıkan su hacmi ölçülür. Konsolidasyonun

tamamlandığı çıkan su hacminin sabit kalmasından anlaşılır. Musluk kapatılır, istenirse aynı kanaldan deney sırasında boşluk suyu basıncı ölçülebilir. Drenajlı deney yapılıyorsa drenaj çıkışı deney boyunca açık bırakılır. Önceden belirlenen hücre basıncı altında, hücre tabanı veya başlığının düşey yönde, sabit hızda hareket ettirilmesi ile numune kırılmacaya kadar yükleme yapılır. Deney boyunca zemin numunesinin gösterdiği direnç bir yük halkası vasıtası ile deviatör gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$) olarak, numunenin boy değişimi ise bir düşey deplasman saati ile ölçülür ve kaydedilir. Deney sonunda deviatör gerilme-deformasyon eğrisi çizilir, maksimum değer kırılma gerilmesini verir. Teorik olarak kırılmanın meydana geldiği düzlemin normalinin, σ_1 asal gerilme düzleminin normali ile $\alpha = 45 + \phi/2$ açısı yapması beklenir (Tan, 2013).

Üç eksenli hücre kesme deneyi üç farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU) deney yönteminde; numune, konsolidasyona ve su girişine maruz bırakılmadığı için yapılan bu deney kısa sürede kohezyonlu zeminler için sonuç verir. Konsolidasyonlu-Drenajsız (CU) deney yönteminde; konsolidasyon sırasında drenaja izin verilir ancak kesme drenajsız yapılır ve kesme sırasında boşluk suyu basıncında oluşan değişimler gözlenir. CU deneyi UU deneyine göre daha uzun sürede tamamlanır. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) deney yönteminde; kesme esnasında da drenaja izin verilir ve numunedeki hacim değişimleri gözlenir. Numune, kesme sırasında boşluk suyu artışları meydana gelmeyecek kadar yavaş kesilir, bu sebeple tamamlanması CU ve UU deneylerine göre daha uzun sürer. Bishop ve Henkel (1957) üç eksenli hücre kesme deneylerini tanımlarken UU deneyini hızlı deney, CU deneyini konsolidasyonlu hızlı deney, CD deneyini ise yavaş deney olarak tanımlamıştır.

2.3.1.1. Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi

Üç eksenli hücre kesme deneylerinden Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) üç eksenli hücre kesme deneyi bu çalışma kapsamında kullanılan deney yöntemidir. CD deneylerinin yürütülmesinde ASTM (D7181) standardından yararlanılmıştır.

Konsolidasyonlu-Drenajlı yöntemde numune hücre sıvısı tarafından oluşturulmuş çevre basıncına maruz bırakılır. Drenaja izin verilmesiyle boşluk suyu basıncı

sönümlenecek ve bu sayede de konsolidasyon meydana gelecektir. Deney süresince zamanla boşluk suyu basınçları (u_c) numunenin doymun hale gelmesiyle sıfıra eşitlenecektir. Boşluk suyu basıncındaki artış boyutsuz parametre formunda tanımlanabilir. Skempton (1954) tarafından boşluk basıncı parametresi “B” olarak tanımlanır ve doymun zeminler için 1’dir (Das, 2002).

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = \frac{u_1 - u_0}{\Delta \sigma_3} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5’te gösterilen Skempton’un boşluk suyu parametresi ile numunenin doymunluk oranı tayin edilir.

Burada;

Δu = çevre basıncı farkının ($\Delta \sigma_3$) ölçülen boşluk suyunda yarattığı değişim

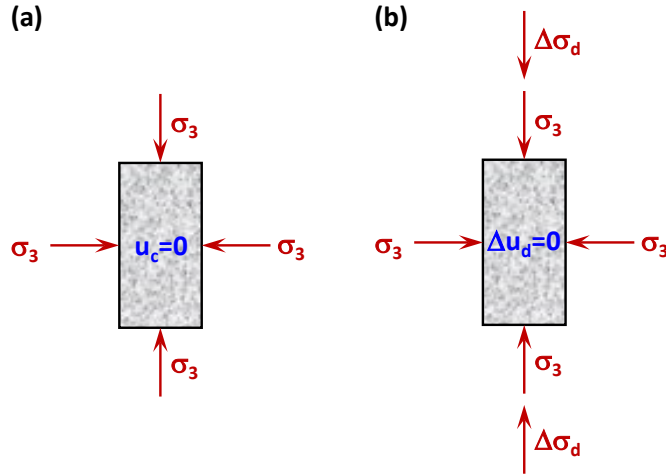
$\Delta \sigma_3$ = çevre basıncında yaratılan gerilme değişimi olarak tanımlanır.

B parametresi, CD ve CU deneylerinde numunenin doymunluğa erişip erişmediğinin kontrolünde kullanılmaktadır. %95 doymunluk derecesi ve üstü durumlarda numune doymun olarak kabul edilmiştir.

Şekil 2.4.’te Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyinde konsolidasyon ve kesme aşamalarındaki gerilme durumları gösterilmektedir. Burada;

u_c = hücre basıncı etkisindeki numunede oluşan boşluk suyu basıncı

Δu_d = deviatör gerilme etkisindeki numunede oluşan boşluk suyu basıncı olarak ifade edilebilir.

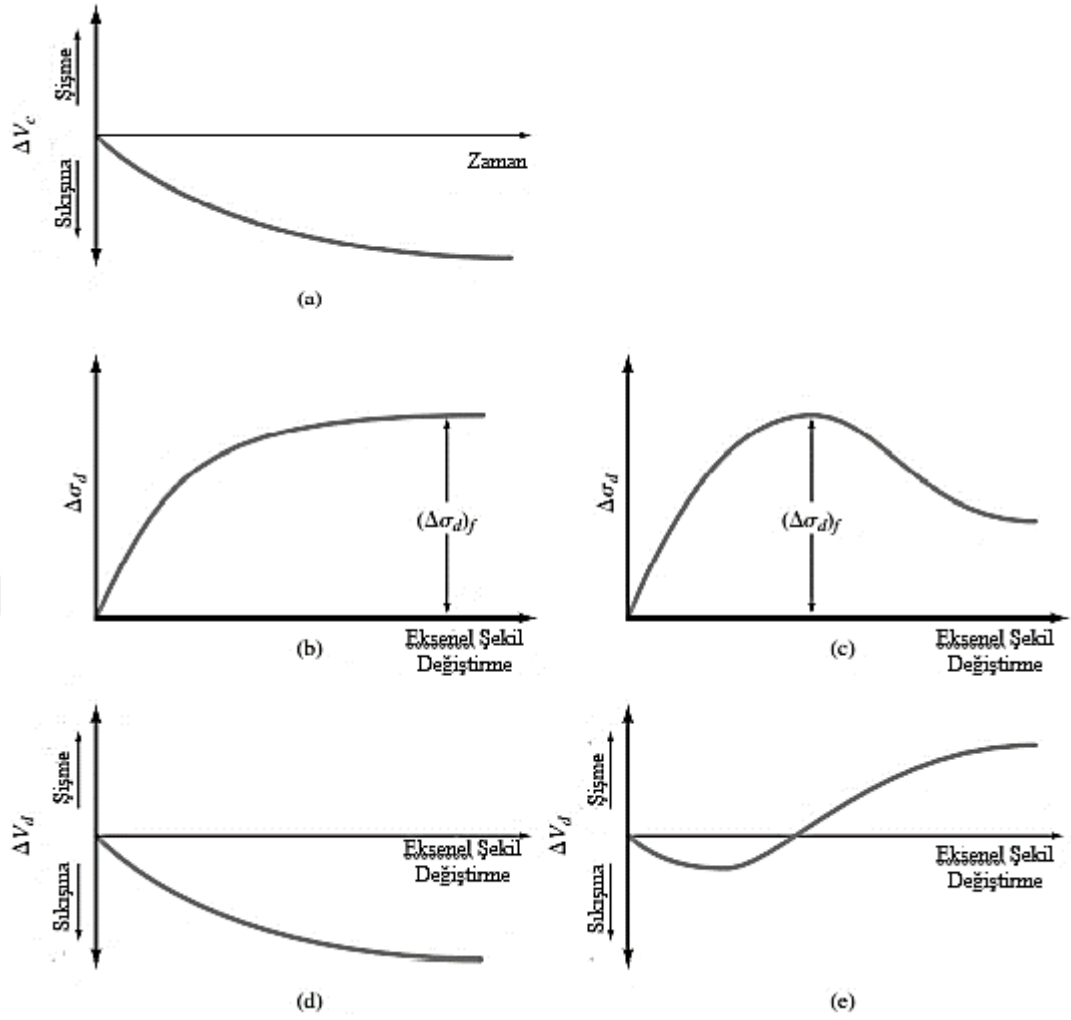


Şekil 2.4. Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyi: (a) hücre basıncına maruz kalan numune; (b) deviatör gerilme uygulanmış numune

CD deneyinde numune öngörülen basınçta konsolide edilmekte ve sonra da drenaj koşulları tümüyle sağlanarak uygulanan kesme gerilmelerinin boşluk suyu basıncını arttırmaması için numune yeterince düşük sabit bir hızda kesilmektedir. Böylece elde edilecek parametreler sadece efektif gerilme türünden olacaktır (Önalp, 2013).

Konsolidasyon sırasında numunede meydana gelen hacim değişikliği (ΔV_c) boşluk suyunun drene olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.5.a). Deviatör gerilme ($\Delta\sigma_d$) CD deneyi sırasında çok yavaş oranda arttırılmaktadır. Numunenin kesilmesi sırasında aşırı boşluk suyu basınçlarının oluşması efektif gerilme değerlerinin yanlış ölçülmesine neden olacaktır. Numunenin yavaş kesilmesi neticesinde drenaja izin verilmesi boşluk suyu basıncında değişimin oluşmamasını sağlamaktadır ($\Delta u_d = 0$).

Şekil 2.5.b’de gevşek kum/normal konsolide kil için; Şekil 2.5.c’de sıkı kum/aşırı konsolide kil için deviatör gerilmenin deformasyonla olan ilişkisi grafiği verilmiştir. Aynı şekilde zemin danelerinin birbirine yakınlık ilişkisinin, hacim değişimi (ΔV_d) üzerindeki etkisi Şekil 2.5.d ve e’de gösterilmiştir (Das, 2008).



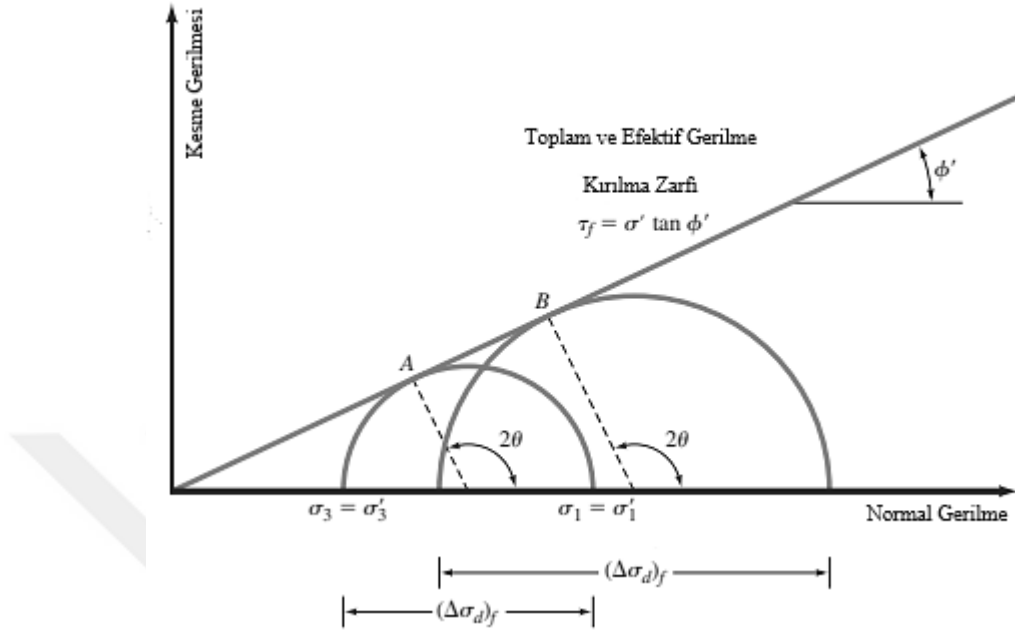
Şekil 2.5. Konsolidasyonlu-Drenajlı basınç deneyi: (a) hacim değişimi grafiği; (b) gevşek kum ya da normal konsolide kildeki deviyör gerilme-deformasyon grafiği; (c) sıkı kum ya da aşırı konsolide kildeki deviyör gerilme-deformasyon grafiği; (d) gevşek kum ya da normal konsolide kildeki hacim değişimi; (e) sıkı kum ya da aşırı konsolide kildeki hacim değişimi (Das, 2008). (ΔV_v : numunedeki hacim değişimi, ΔV_d : deviyör gerilmenin uygulanmasıyla oluşan hacim değişimi, $\Delta \sigma_d$: deviyör gerilme, $(\Delta \sigma_d)_f$: kırılmanın olduğu andaki deviyör gerilme)

Deney sırasında boşluk suyu basınçlarının oluşmaması sebebiyle Denklem 2.6 ile toplam ve efektif çevresel gerilme, Denklem 2.7 ile kırılma anındaki toplam ve efektif eksenel gerilme ifade edilmiştir.

$$\sigma_3 = \sigma'_3 \quad (2.6)$$

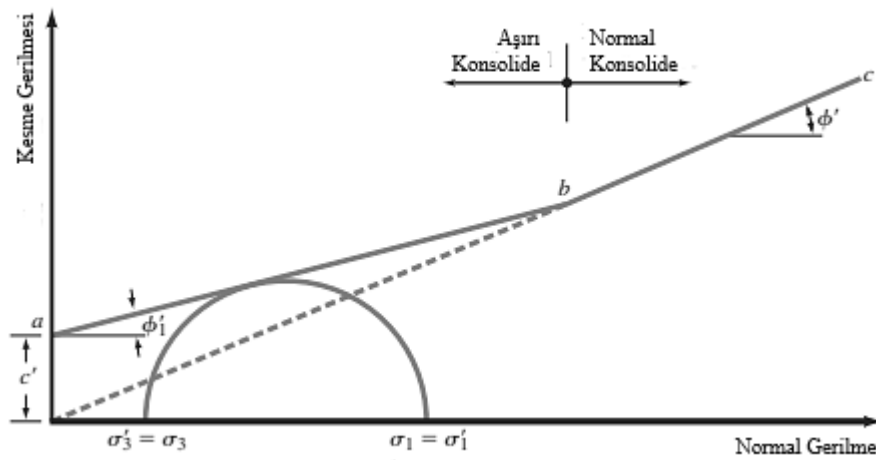
$$\sigma_3 = \sigma_3 + (\Delta \sigma_d)_f = \sigma'_1 \quad (2.7)$$

Efektif üç eksenli deneylerde kırılma anında oluşan σ_1' büyük asal gerilmeyi, σ_3' küçük asal gerilmeyi ifade etmektedir.



Şekil 2.6. Kum ve normal konsolide killerde yapılan drenajlı deneyin efektif gerilme kırılma zarfı (Das, 2008)

Çevre basıncını değiştirerek benzer numuneler üzerinde birkaç deney gerçekleştirilebilir. Her deney için kırılmalarındaki büyük ve küçük temel gerilmelerle, Mohr daireleri çizilebilir ve kırılma zarfları elde edilebilir. Şekil 2.6., kum ve normal konsolide kilde yapılan deneyler için elde edilen efektif gerilme kırılma zarfını göstermektedir.



Şekil 2.7. Aşırı konsolide killerde kırılma zarfı (Das, 2008)

Aşırı konsolidasyon, kil $\sigma_c (= \sigma'_c)$ bir çevre basıncı altında konsolide edilip ardından çevre basıncının $\sigma_3 (= \sigma'_3)$ değerine azaltılmasıyla oluşur. Bu tür aşırı konsolide kil örneklerinin drenajlı üç eksenli hücre kesme deneylerinden iki farklı kırılma zarfı elde edilmesi söz konusu olabilir (Şekil 2.7.'de ab ve bc). ab kısmı, bir kohezyon kesişimiyle daha düz bir eğime sahiptir ve bu kırılma zarfı için kayma mukavemeti denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.8)$$

Kırılma zarfının bc kısmı, normal konsolide bir zemini temsil eder ve kohezyon oluşmadığı için denklemin 2.9'daki gibi olması beklenir.

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' \quad (2.9)$$

Killi bir zemin üzerinde yapılan Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli bir deneyin tamamlanması birkaç gün sürebilir. Zemin numunesinden tam drenajı sağlamak için çok yavaş bir oranda deviatör gerilme uygulamak için zamana ihtiyaç vardır. Bu nedenle, CD tipi üç eksenli deney çok yavaş gerçekleştiğinden yaygın olarak kullanılmamaktadır (Das, 2008).

2.3.2. Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi

Kayma direnci parametrelerine temellerin tasarımı, uzun vadede dolgu ve barajlar ile doğal yamaçların stabilitesinin değerlendirilmesi gibi zemin mekaniğinin pek çok alanında ihtiyaç duyulmaktadır. Pek çok mühendis bu parametrelerin elde edilmesinde üç eksenli hücre kesme deneyi ve serbest basınç deneyi gibi geleneksel deneylerden yararlanır. İlgili mühendis arazi durumunun simüle edilmesi için en uygun deney tipini ve drenaj tipini seçerek deneyler sonucunda kırılma zarfı, kohezyon ve kayma direnci açısını elde eder. Bu deneyler sırasında arazinin durumunu temsil edecek iki veya üç numune oluşturulmalıdır ve ayrı ayrı deneye tabi tutulmalıdır. Aynı katmandan üç numunenin alınmasında zorluklar çıkabilir. Kimi zaman aynı derinlikte ve aynı

katmanda birkaç numune alınmalıdır. Bu standart uygulama hem zaman alıcı hem de pahalıdır.

Zamandan tasarruf yapmak ve maliyeti düşürmek adına arazi durumunu temsil eden bir numune üzerinde yapılacak laboratuvar deneyleri sayesinde de kayma direnci parametrelerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemle tek bir numune üzerinde yapılan deneyler çok aşamalı (*multistage*) olarak adlandırılmaktadır. Çok aşamalı deneyde de numune, geleneksel deneyde olduğu gibi önce doyurulur, ardından konsolide edilir ve belirlenmiş bir deformasyon miktarına kadar kesilir. Daha sonra hücre basıncı arttırılarak tekrar konsolidasyona bırakılır ve boşluk suyu basıncının dengeye gelmesine izin verilir. Aynı işlem daha sonra farklı çevre basıncı veya basınçları için tekrarlanır. Deney, genelde üç aşamada yürütülür. Numune, son aşamadaki çevre basıncında yenilene kadar kesilir. Bu, numune hazırlama ve kurulum zamanını ve maliyetini azaltmada bariz bir avantaj oluşturur. Lumb (1964) özellikle örnek almanın hem zor hem de pahalı olduğu doymuş kumlu bir ortamda veya biçimlendirmek için şekillendirilmesi gereken kırılmalı ya da taşlı zeminlerin deneylerinde avantajlı olduğuna işaret etmektedir. Çok aşamalı deney, nispeten yeni bir deney değildir. İlk yayınlanan çalışma 1950’de DeBeer tarafından yapılmıştır. DeBeer (1950)’in çalışmasında çoğu deney kohezyonsuz zeminler üzerinde yapılmış ve elde edilen sonuçlar umut verici görülmüştür (Gullic, 1970).

Lumb (1964), Kenney ve Watson (1961), Watson ve Kirwan (1962) ve Ruddock (1966) tarafından yapılan çalışmalarda; üç numune seti kullanılarak yapılan geleneksel yöntemler ile elde edilen efektif kayma mukavemeti parametrelerinin (c' , ϕ'), çok aşamalı yöntemle elde edilen değerlere pratik olarak benzer olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak çok aşamalı deneylerle elde edilen sıkışabilirlik, genişleme, boşluk suyu basıncı ve boşluk oranı değişimleri gibi veriler geleneksel yöntemlerle elde edilenlerle tam olarak karşılaştırılamamaktadır.

Çok aşamalı (*multistage*) deneyin temel avantajı, deney için yalnız bir numunenin gerekli olması, zamandan ve malzemeden tasarruf sağlamasıdır. Bu özellikle küçük bir örnekte temsil edilemeyen, kayalık killerde çakıl veya çatlaklar gibi nispeten büyük

ölçekli özellikler içeren zeminler için geçerlidir. Çok aşamalı deneyler, genel olarak düşük duyarlılığa sahip ve kararlı bir yapıya sahip olan, kesilme için az miktarda deformasyonun ve hacim değişikliğinin yeterli olduğu zeminlerle sınırlandırılmalıdır (Head ve Epps, 2014).

Head ve Epps (2014) çok aşamalı yöntemin kullanılabilmesi için Konsolidasyonlu-Drenajsız (CU) deney prosedürlerinin takip edilerek yüksek derecede doymuş numuneler üzerinde çalışılması gerektiğini ifade etmiştir. Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD) deneylerinde numune, deneyin her aşamasında farklı hacimlerde olacağından her aşamadaki farklı durumun göz ardı edilmemesi gerektiğine değinmiş ve bu sebeple CD deneylerinde kullanılacak çok aşamalı yöntemin deneyi yapan kişinin bilgisiyle yakından ilişkili olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Kenney ve Watson (1962) da çalışmalarında çok aşamalı deney yönteminin drenajsız deneylerde olumlu sonuçlar verdiği, ancak drenajlı deneylerde yalnızca düşük hassasiyetli zeminler için uygulanması gerektiğine değinmişlerdir. Ayrıca drenajlı koşullardaki deneyin, göçme durumunda küçük hacim değişikliği gösteren ve bu nedenle kararlı yapıda olan zeminler için geçerli olduğunu vurgulamışlardır.

Gräsle (2011) da yine benzer şekilde çalışmasında yenilme anında birim şekil değiştirmesinin %5'ten daha az olduğu hassas zeminlerin çok aşamalı deneylere uygun olmadığını belirtmiştir. Ancak %8'den daha fazla birim şekil değiştirmeye direnebilen düşük ve orta plastisiteli killi ve siltli-killi örneklerde çok aşamalı deney prosedürünün uygulanabilirliğine değinmiştir.

Çok aşamalı deney yönteminde dikkat edilmesi gereken önemli diğer bir konu da deney aşamalarının (stage) sonlandırılmasıdır. Numunenin deforme olmadan diğer aşamalara geçilmesi gerekmektedir.

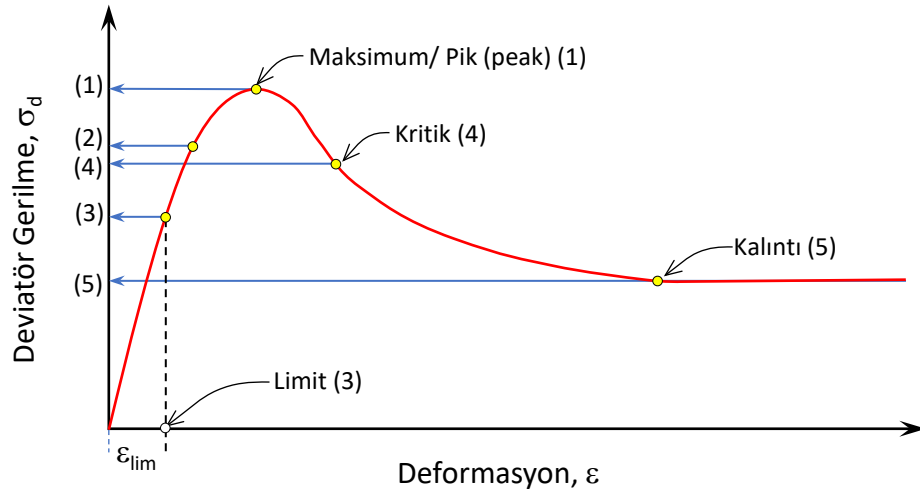
2.3.2.1. Çok aşamalı deneyin sonlandırılması

Çok aşamalı deney yönteminde son aşamaya kadar olan ilk ve ara aşamalarda numunede kırılma gözlenmemelidir. Bu sebeple kesmenin ilk ve ara aşamalarında kesme işlemi sonlandırılana dek numunenin bozulmamış olması çok aşamalı deney

yöntemiyle elde edilen sonuçların doğruluğunu güçlendirecektir (Sharma ve ark. 2011).

Yükleme sürecinin son aşamadan öncedeki tüm aşamalarda sonlandırılacağı deformasyon değeri bu yöntemin en önemli noktalarından biridir. Kesmenin sonlandırılacağı noktanın doğru bir şekilde belirlenmesi deneyin doğru sonuçlar vermesini sağlayacaktır (Khosravi ve ark., 2012). Kesme aşamasının erken bitirilmesi beklenenden daha az deviatör gerilmeye ve doğru olmayan kayma direnci parametrelerinin elde edilmesine neden olacaktır. Kesme aşamasının daha uzun sürmesi ise çevre basıncının son aşamaya göre daha düşük olduğu ilk ve ara aşamalarda numunenin erken bozulmasına ve ardından son aşamalarda daha yüksek çevre basınçlarında düşük deviatör gerilmelerinin elde edilmesine neden olarak yanlış kayma direnci parametrelerine sebep olacaktır (Banerjee ve ark., 2020). Zemin yapısındaki geri döndürülemez değişiklikler, geleneksel üç eksenli deneylere kıyasla sonraki kesme aşamalarında kayma mukavemetinin eksik tahmin edilmesine ve daha büyük birikmiş gerilmeye neden olabilmektedirler (Taheri ve Tatsuoka, 2012).

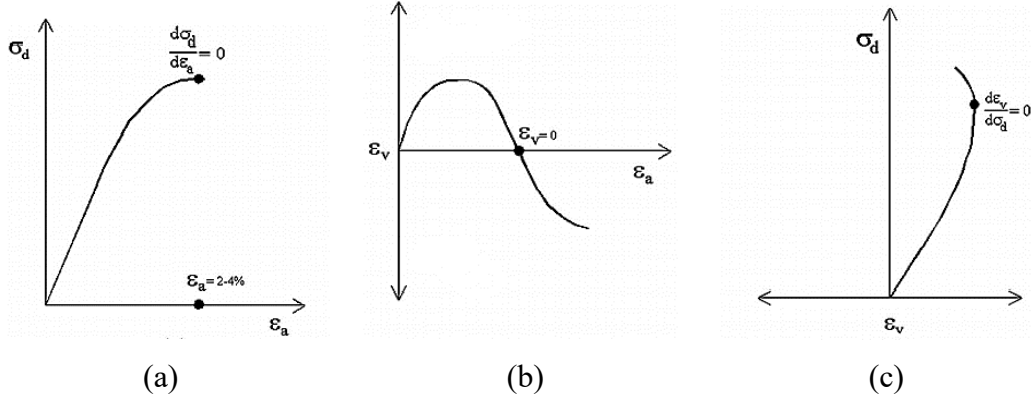
Head ve Epps (2014)'e göre üç aşamadan oluşan çok aşamalı deney yönteminde, deneyin ilk iki aşamasında aşırı deformasyondan kaçınılmalı ve bu aşamalar pik deviatör gerilmeye ulaşmadan hemen önce kesilmelidir. Sridharan ve Rao (1972), çok aşamalı deneylerde kesme aşamasının sonlandırılma noktasının numunede yenilmenin gerçekleştiği nokta değil yenilmeye yakın noktada olması gerektiğini belirtmişler ve bu durum için eksenel deformasyonun %3-4 aralığında tutulmasını önermişlerdir.



Şekil 2.8. Zeminler için idealize edilmiş göçme kriterleri

Bir zeminin kayma mukavemetinin belirlendiği gerilme-deformasyon grafiği Head ve Epps (2014)'in çalışmasında Şekil 2.8.'deki gibi verilmiştir. Bu grafik yardımıyla beş farklı göçme kriteri açıklamıştır. Şekilde gösterilen 2 ile 3 noktalarındaki göçme (kırılma) kriterlerinin çok aşamalı deney yöntemlerinde de kullanılabilir olduğuna işaret etmişlerdir. Buna göre, 2 numaralı maksimum gerilme oranı kriteri, diğer parametrelerle veya farklı deney türleri arasında daha iyi bir kayma mukavemeti korelasyonu sağlayabilmektedir ve çok aşamalı drenajsız üç eksenli deneylerde bir kriter olarak kullanılabilir. 3 numaralı limit deformasyon kriterinin ise çok aşamalı drenajlı üç eksenli deneylerde faydalı olabilecektir.

Ho ve Fredlund (1982); Kenney ve Watson (1961); Kim ve Ko (1979); Kovari ve ark. (1983); Krahn ve ark. (1989); Rahardjo ve ark. (1995)'in çalışmalarında gerilme-şekil değiştirme eğrisinin yatay seyrettiği noktada ($d\sigma_d/d\varepsilon_a = 0$; Şekil 2.9.a) kesme durdurulmuştur. Eğrinin yatay seyretmeye başladığı noktada deformasyon miktarı %2-%4 aralığındadır. Numune üzerinde aşırı deformasyonların oluşmaması numunenin kesilmeden diğer aşamaya geçilebilmesine olanak sağlamaktadır (Sharma ve ark., 2011).



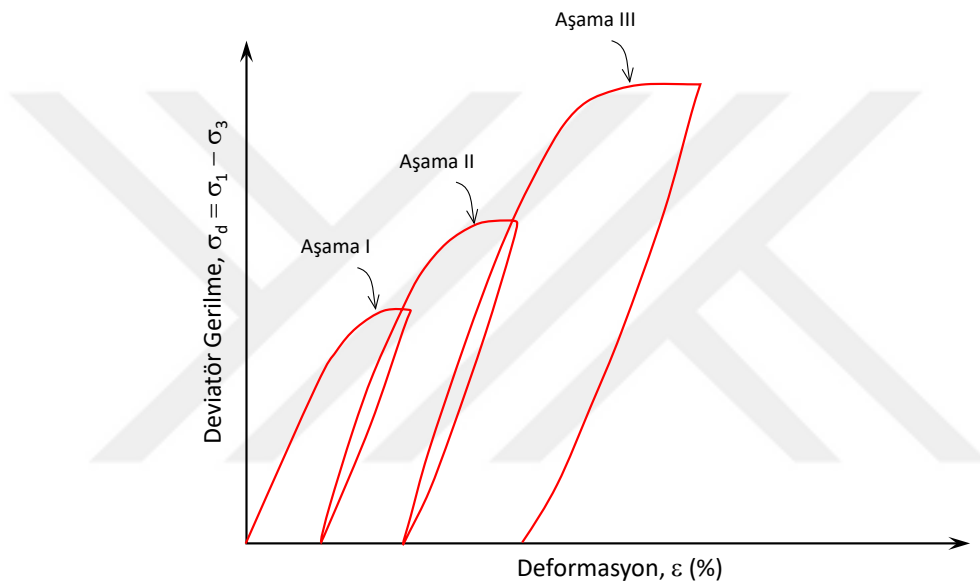
Şekil 2.9. Önceki çalışmalarda kullanılmış deney sonlandırma kriterlerinin şematik gösterimi (Sharma, 2011)

Crawford ve Wylie (1987), sağlam kayalar üzerinde gerçekleştirdikleri çok aşamalı drenajlı deneylerde deneyi durdurmak için hacimsel deformasyonu referans olarak kullanmışlar ve hacimsel deformasyon negatif hale geldiğinde deneyi durdurmuşlardır ($\epsilon_v = 0$; Şekil 2.9.b). Daha sonra bir sonraki aşamaya geçip çevre gerilmesini arttırmadan önce deviatör gerilmeyi boşaltmışlardır. Pagoulatos (2004), Berea kumtaşı üzerinde çok aşamalı drenajlı deneyleri gerçekleştirmiş ve bir sonraki aşamaya geçmek için sonlandırma kriteri olarak $d\sigma_v/d\epsilon_d = 0$ (Şekil 2.9.c) değerini kullanmıştır. Bu kriter, tam olarak kesilmenin olmadığı noktaları vermiştir, bu nedenle ilk ve ara aşamaların sonlandırma noktalarıyla çizilen Mohr-Coulomb kırılma zarfının son aşamadaki sonlandırma noktasıyla kesişebilmesi için kırılma zarfının yukarı kaydırılması gerekmiştir.

Kesmenin durdurulmasının ardından oluşan deviatör gerilme kaldırılmakta ve ardından çevresel gerilme bir sonraki aşama için gereken gerilme değerine yükseltilmektedir (Döngüsel yükleme yöntemine göre, Bölüm 2.3.2.2.). Aynı adımlar son aşamaya kadar tekrarlanmakta, son aşamada ise numune kesilene kadar devam edilmektedir. Büyük ve küçük asal gerilmeler her aşamadaki uç noktalara karşılık gelen göçme gerilmeleri olarak kabul edilir ve Mohr-Coulomb kayma dayanımı parametreleri bu gerilmeler kullanılarak tahmin edilir (Sharma ve ark., 2011).

2.3.2.2. Çok aşamalı deneyde yöntemler

Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinde, bir sonraki aşamaya geçiş sırasında numunenin üzerindeki deviatör gerilmenin devam ettirilip ettirilmemesi iki farklı yöntemin multistage deneylerde uygulanabilmesini getirmektedir. Ho ve Fredlund (1982), ilk yöntem olarak döngüsel yükleme metodunu (*Cyclic Loading Method*) önermiştir. Bu yöntemde aşama sonlandırıldığında deviatör gerilme tamamen boşaltılır ve diğer konsolidasyon aşamasına geçilir (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Çok aşamalı deneylerde döngüsel yükleme metoduna göre ideal gerilme-deformasyon grafiği (Ho ve Fredlund, 1982)

Bir diğer yöntem olarak devamlı yükleme metodu (*Sustained Loading Method*) önerilmiştir. Devamlı yükleme metodunda aşama sonlandırıldığında deviatör yük korunmaya devam ederken bir sonraki konsolidasyon aşamasına geçilir. İkinci yöntemde numune üzerinde biriken gerilmenin numunenin deformasyonunu devam ettirmesi sebebiyle döngüsel yükleme metodu çok aşamalı deneylerde tercih edilmektedir.

Mohr-Coulomb kırılma zarfının çizilebilmesi için üç veya daha fazla deney gereklidir. Deneylerde uygulanacak aşamaların sayısı zemine göre farklılık gösterebilmektedir. Numunenin dayanabileceği aşama sayısı zemine bağlıdır, ancak çoğu zemin için üç

adet aşama uygulanmasının yeterli olduğu düşünülmektedir. Opalinus kili gibi zemin tiplerinin dört aşamaya kadar doğru sonuçlar verdiği bilinmektedir (Gräsle, 2011).

2.3.2.3. Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinde göçme anındaki kırılma noktasının bulunması

Geleneksel deneylerde %20 deformasyona kadar numunenin gerilme alması sağlanır ve etki eden en büyük deviatör gerilme ile numuneye uygulanan çevre gerilmesinin toplamı büyük asal gerilmeyi oluşturur. Bu sayede kırılma zarfının oluşturulması ve zeminin kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenmesi sağlanır. Çok aşamalı deneylerde ise ilk ve ara aşamalarda numunenin deformasyonunun %2-4 aralığında tutulması ile numunenin kırılmaya çok yakın durumda iken aşamanın sonlandırılması ve diğer aşamaya geçilmesi amaçlanır. Böylece numunede plastik deformasyon gerçekleşmemiş olur. Bu durum için Sridharan ve Rao (1972) yenilme noktasının ve bu noktadaki deviatör gerilmenin tahmini için Kondner (1963)'in zeminlerin gerilme-deformasyon eğrilerinin yaklaşık olarak dikdörtgen hiperboller ile hesaplanabileceği yöntemi önermiştir. Ancak bu yöntemin verilerinin doğruluğunun diğer bir geleneksel deneyin yapılmasıyla güçlendirilebileceğine işaret etmektedir. Denklem 2.9'da Kondner metodunun matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\varepsilon_a \quad (2.9)$$

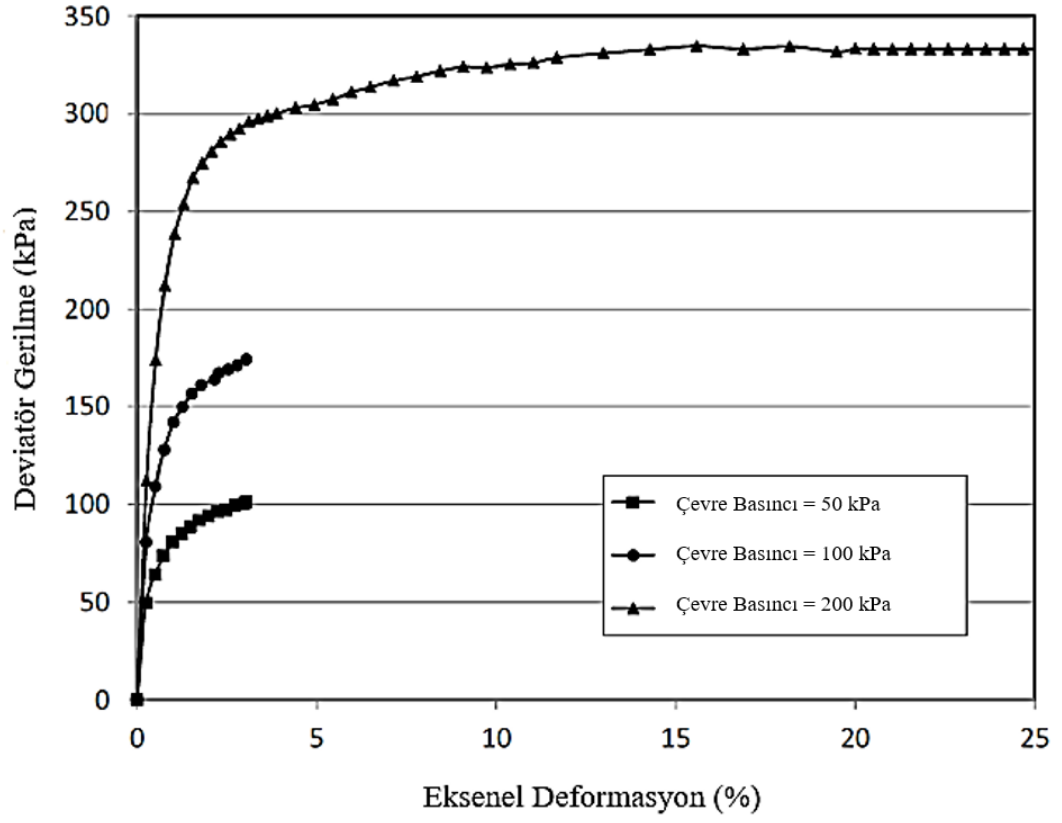
Burada;

ε_a : eksenel deformasyon

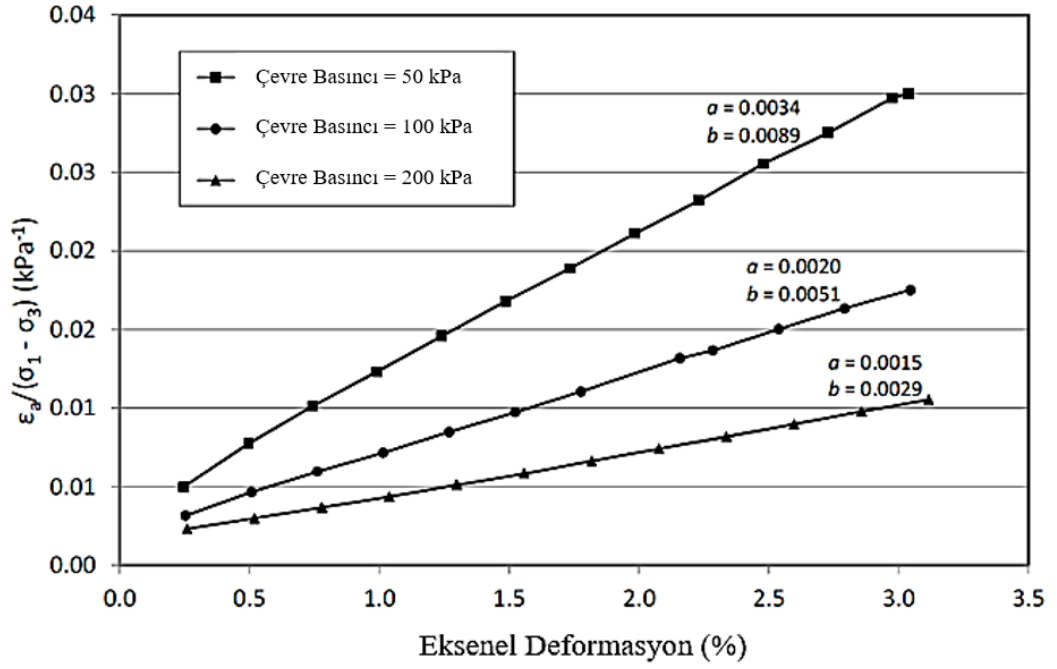
$\sigma_1 - \sigma_3$: Deviatör gerilme

a ve b : Deneyisel olarak Kondner lineerizasyonundan elde edilen ampirik sabitlerdir.

Y ekseninde $\varepsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3)$, x ekseninde ε_a ile oluşturulan grafikte deneysel verilerin oluşturduğu doğrusal eğrinin y eksenini kestiği nokta a değerini, doğrusal eğrinin eğimi ise b değerini vermektedir. Shahin ve Cargeeg (2011) çalışmalarında, çok aşamalı deneyin Şekil 2.11.'deki deviatör gerilme-deformasyon grafiği ile oluşturdukları hiperbolik lineerizasyon eğrilerini Şekil 2.12.'de göstermişlerdir.

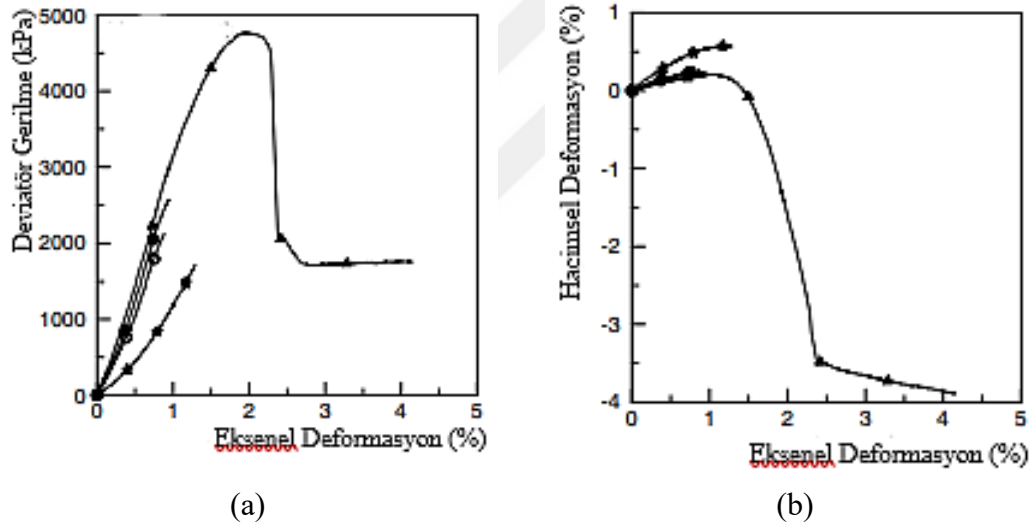


Şekil 2.11. Çok aşamalı deney gerilme-deformasyon grafiği (Shahin ve Cargeeg, 2011)



Şekil 2.12. Hiperbolik lineerizasyon eğrileri (Shahin ve Cargeeg, 2011)

Sharma (2011) çalışmasında, Saeedy ve Mollah (1988) ve Pagoulatos (2004) tarafından önerilen yöntemi kullanmış ve açıklamıştır. Buna göre hacimsel deformasyon-eksenel deformasyon grafiklerinde eğrinin yataya ulaştığı ($\Delta\epsilon_v / \Delta\epsilon_a = 0$) nokta ilk ve ara aşamalar için sonlandırılma noktaları olarak belirlenmekte, son aşamada ise yaklaşık %20 deformasyona kadar devam ettirilmektedir. İlk ve ara aşamaların sonlandırıldığı noktalardaki gerilme değerleri ile kırılma zarfı çizilir, daha sonra bu zarf, son aşamadaki maksimum deviator gerilme ile oluşturulmuş Mohr dairesine teğet olacak şekilde aynı açıyla yukarı taşınarak nihai kırılma zarfı oluşturulur. Şekil 2.13.a'da çok aşamalı deneylerin her aşaması, 0 deformasyondan başlatılarak grafikte gösterilmiştir. Şekil 2.13.b'de verilen grafik ile kullanılan deney sonlandırma yöntemine göre aşamanın bitirilip yeni aşamaya geçilmesine karar verilmiştir.



Şekil 2.13. Çok aşamalı deneylerde hacimsel deformasyon ilişkisi (Sharma, 2011)

2.4. Üç Eksenli Hücre Kesme Deneylerinde Deney Hızının Belirlenmesi

İnce daneli zeminlerde stabilite analizleri toplam gerilmelere ve efektif gerilmelere göre yapılabilir. Yüklemin hızlı olduğu durumlarda drenajsız koşullara göre (toplam gerilmeler), yüklemenin yavaş olduğu durumlarda drenajlı koşullara göre (efektif gerilmeler) tasarım yapmak önemlidir. İnce daneli zeminlerde, özellikle killerde, permabilite katsayısının düşük olması boşluk suyu basıncının sönmülmesinin iri daneli zeminlerin aksine oldukça uzun sürmesine neden olmaktadır. Bu noktada

deformasyon hızının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan deformasyon hızı ASTM (D7181) standardında belirtilen Denklem 2.10 ile belirlenmiştir.

$$\varepsilon' = \frac{4\%}{16 \times t_{90}} \quad (2.10)$$

Burada;

ε' = deformasyon hızı

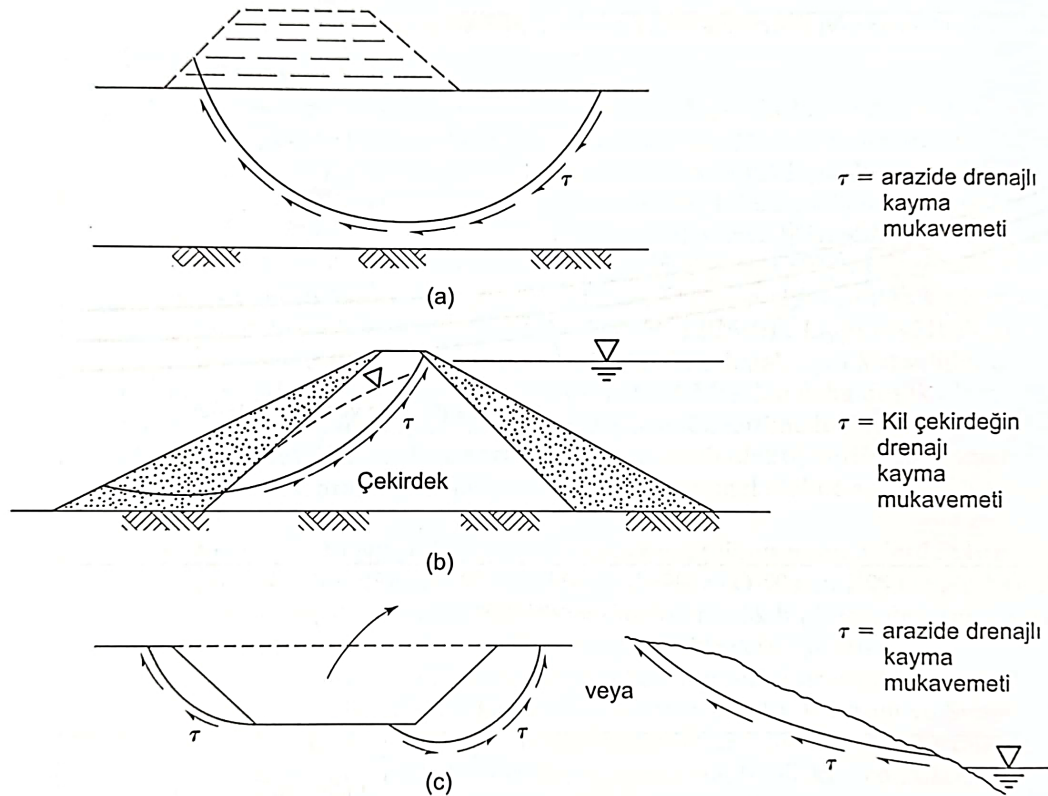
t_{90} = konsolidasyon deneyinde, zeminin %90 konsolidasyonunun tamamlanması için gerekli süre olarak ifade edilmektedir.

Denklem 2.10'da verilen %4 (0,04) değeri yenilmenin başladığı deformasyon değeri olarak varsayılmıştır. Eğer hesap yapılan deformasyon değeri farklı ise bu değer değiştirilmesi gerekmektedir. CD deneylerinin konsolidasyon aşaması sonucunda elde edilen konsolidasyon grafiğinden yararlanılarak elde edilen t_{90} parametresi ASTM (D2435) standardına göre belirlenmiştir. Bölüm 4.2.1.'de bu çalışma kapsamında yapılan üç eksenli hücre kesme deneylerinin konsolidasyon aşaması ile belirlenen deney hızlarına yer verilmiştir.

2.5. Mühendislik Uygulamalarında Efektif Parametrelerin Kullanımı

Temeller, dolgular, yamaçlar gibi yapılarda stabilite analizleri yapılırken toplam gerilme veya efektif gerilmeye bağlı kayma mukavemetlerinden yararlanılır. Toplam gerilme yaklaşımında drenaja izin verilmez ve numunedeki boşluk suyu basıncı ile efektif gerilmenin arazideki şartlarla aynı durumda olduğu varsayılmaktadır. Efektif gerilme yaklaşımında ise drenaja izin verilmektedir. Zemine uygulanan başlangıç gerilmesinin ve toplam gerilmenin bilindiği varsayılarak zemine etkiyen efektif gerilmeler hesaplanabilir. Ancak bu durumda da tasarım sırasındaki ve inşaat öncesindeki arazi boşluk suyu basınçlarının tahmin edilmesi kolay olmamaktadır. Bu sebeple drenajlı kayma mukavemeti yalnızca laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmektedir.

CD deneylerinin kullanıldığı mühendislik uygulamalarına toprak dolgu barajlarda uzun süreli ve devamlı sızma durumu, hem yumuşak hem de katı killerde yapılan kazılar, şevlerin uzun süreli stabilitesi örnek verilebilir. Düşük geçirimliliğe sahip zeminlerin laboratuvar ortamında yürütülen CD deneylerinde kesme sırasında numunede boşluk suyu basıncının gelişmediğine emin olmak gerekmektedir. Bu durum CD deneylerinin neden çok yavaş gerçekleşmesi gerektiğini açıklar niteliktedir. CD analizleri için bazı örnekler Şekil 2.14.'te verilmiştir (Holtz ve ark., 2011).



Şekil 2.14. Killerde bazı CD stabilite analizleri: (a) yumuşak kil çökeli üzerine kademeler halinde çok yavaş inşa edilen toprak dolgu; (b) devamlı sızıntı bulunan toprak dolgu baraj; (c) kilde kazı ya da doğal şev (Holtz ve ark., 2011)

Önalp (2013) de CD deneylerinde boşluk suyu basıncının artmaması için numunenin yeterince düşük hızda kesilmesi gerektiğini belirtmiştir. Böylece elde edilen parametreler efektif gerilme cinsinden olmaktadır. CD analizlerinin kullanıldığı mühendislik uygulamalarını tabakalar halinde yavaş yükselen dolgu altında yumuşak kilin kayma mukavemetinin belirlenmesi, sürekli sızıntı kuvvetleri etkisindeki barajların kil çekirdeğinin kayma mukavemetinin elde edilmesi ve kilde kazı ya da

doğal yamaçta drenajlı kayma mukavemetinin bulunması gibi problemlerle belirtmiştir.



BÖLÜM 3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında Adapazarı siltine farklı oranlarda kil katılmasıyla hazırlanan konsolide edilmiş kil numunelerde kayma direnci parametreleri geleneksel ve çok aşamalı (*multistage*) yöntemlerle elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem uygulanarak Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleri (CD) yapılmıştır.

3.1. Kullanılan Numunelerin Fiziksel Özelliklerinin Tayini

Üç eksenli hücre kesme deneyinde kullanılacak numunelerin endeks özelliklerinin tayin edilmesi amacıyla numuneler üzerinde TS1900-1 uyarınca piknometre deneyi, likit limit deneyi, plastik limit deneyi ve hidrometre deneyi uygulanmıştır. Numuneler TS 1500'e göre sınıflandırılmış ve plastisite kartındaki yerleri belirlenmiştir. Kıvam limitleri ve zemin sınıfları çizelgede belirtilmiştir. Bölüm 4.1.'de bu çalışma kapsamında kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerine değinilmiştir.

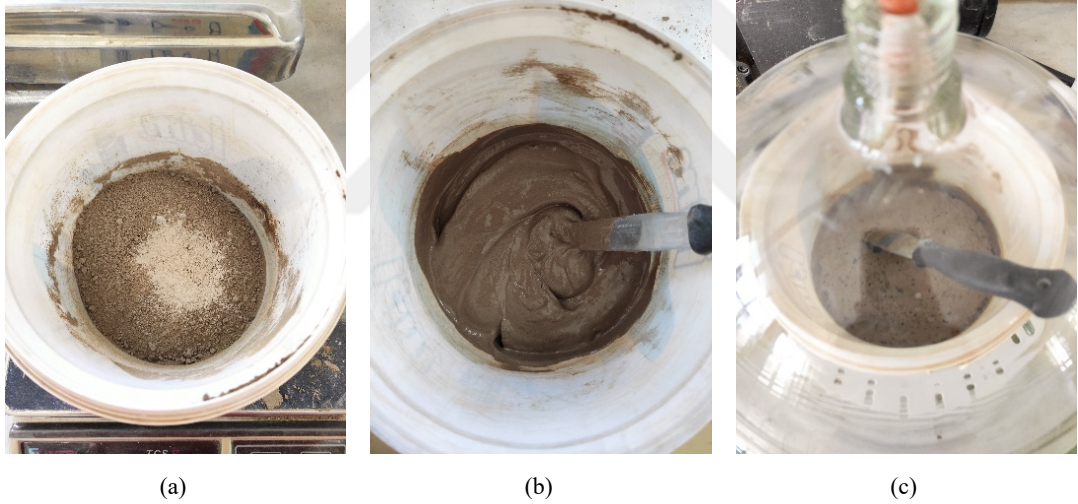
3.2. Numune Hazırlama Yöntemi (Bulamaç/Slurry Yöntemi)

Bu çalışmada kullanılan numuneler Adapazarı siltine belirli oranlarda bentonit kili ile karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Yalnızca silt ile oluşturulan numune tek başına ayakta kalamaması sebebiyle ancak dondurularak deney hücresine yerleştirilebilir hale gelmektedir. Ayrıca numunenin kendi ağırlığı ile ayakta durabilmesi için siltin içine bir miktar bentonit kili karıştırmak ikinci seçenek olarak görülebilir. Numunenin dondurulmasına gerek kalmadan ayakta kalabilecek en düşük bentonit kil oranı ağırlıkça %2 olarak belirlenmiştir. Silt zemin içine bentonit kili karıştırılmış (Şekil 3.1.a), oluşturulan toplam kuru zeminin likit limit değerinin 1.5 katı kadar (kuru numune ağırlığının yaklaşık %45'i kadar) ağırlıkta damıtık su ilave edilerek Şekil

3.1.b’de gösterilen şekilde bulamaç (*slurry*) yöntemindeki genel uygulama takip edilerek bulamaç çamuru oluşturulmuştur. Bulamaç yöntemi numunenin kısa sürede hazırlanmasını, homojen bir yapıda olmasını ve daha başlangıçta doygun olmasını sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında tüm numunelerin bulamaç çamuru haline getirilmesi için kullanılan miktarlar Tablo 3.1.’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Bulamaç çamuru için bileşenlerin miktarları

Bentonit Kili Oranı	Silt Ağırlığı (gr)	Bentonit Kili Ağırlığı (gr)	Toplam Kuru Numune Ağırlığı (gr)	Su Ağırlığı (gr)
%2	400	8	408	183.6
%5	400	20	420	189
%10	400	40	440	198



Şekil 3.1. Bulamaç yöntemiyle numune hazırlanması

Hazırlanan bulamaç çamuru desikatörde 10 dk süre boyunca vakuma bırakılarak hava boşlukları giderilmiştir (Şekil 3.1.c). Uygulanan numune hazırlama sürecinin ardından karışım konsolide edilmeye hazır hale gelmiştir. Konsolidasyon hücresinin alt kısmına sırasıyla poroz taş ve filtre kâğıdı yerleştirilmiştir. Konsolidasyon hücresine yerleştirilmek için hazırlanan numune üç safhada ve her seferinde içerisinde boşluk kalmayacak şekilde spatula yardımıyla düzeltilerek konsolidasyon hücresine yerleştirilmiştir (Şekil 3.2.). Konsolidasyon hücresindeki numunenin yüksekliği 13 ila

14 cm arasında tutulmuştur. Bu sayede numunenin CD deneyleri öncesinde tıraşlanmaya gerek kalmadan 10 cm boyda olması amaçlanmıştır.

Hücredeki numunenin üzerine sırasıyla filtre kâğıdı, poroz taş ve yükleme başlığı yerleştirilmiş, numunenin kurumaması için hücre ağzına kadar su ilave edilip hücre kapatılmıştır. Konsolidasyon yüklemesine hazır hale gelen numune askıya alınmış (Şekil 3.2.), sırasıyla 1, 3, 5, 10, 20 kg yüklenerek bir hafta süre boyunca konsolide olması sağlanmıştır. Aynı adımlar bentonit kili oranı %5 ve %10 ile hazırlanan diğer tüm numunelere uygulanmış ve numuneler geleneksel ve çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerine hazır hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra numune TS1900-2 uyarınca CD deneyine tabi tutulmak için hazırlanmaya başlanmıştır.



Şekil 3.2. Konsolidasyon hücresindeki numune

3.3. Üç Eksenli Hücre Kesme Deneyi

Üç eksenli hücre kesme deneylerinin temel hedefi numunenin arazideki yükleme ve drenaj koşullarına maruz bırakılmasıdır. Böylelikle kayma mukavemeti parametreleri gerçek değerine en yakın sonuçları verecektir (Tan, 2013). Bu çalışma kapsamında da kayma mukavemeti parametrelerinin belirlenebilmesi için üç eksenli hücre kesme deneyi kullanılmıştır. Bölüm 2.3.2.'de bahsedilen çok aşamalı deneylerin de

kullanılmasıyla mukavemet parametrelerinin daha hızlı ve ekonomik olarak elde edilmesi bu çalışmanın amaçlarındandır. Bölüm 3.2.'de açıklanmış olan numune hazırlama yöntemiyle elde edilmiş numunelerin üç eksenli hücre kesme deney aletine yerleştirilmesi bu bölümde ele alınmıştır.

Bu çalışmada geleneksel ve çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinin yürütülmesi için SAÜ Geoteknik Laboratuvarı bünyesinde bulunan üç eksenli hücre kesme deney aleti kullanılmıştır.

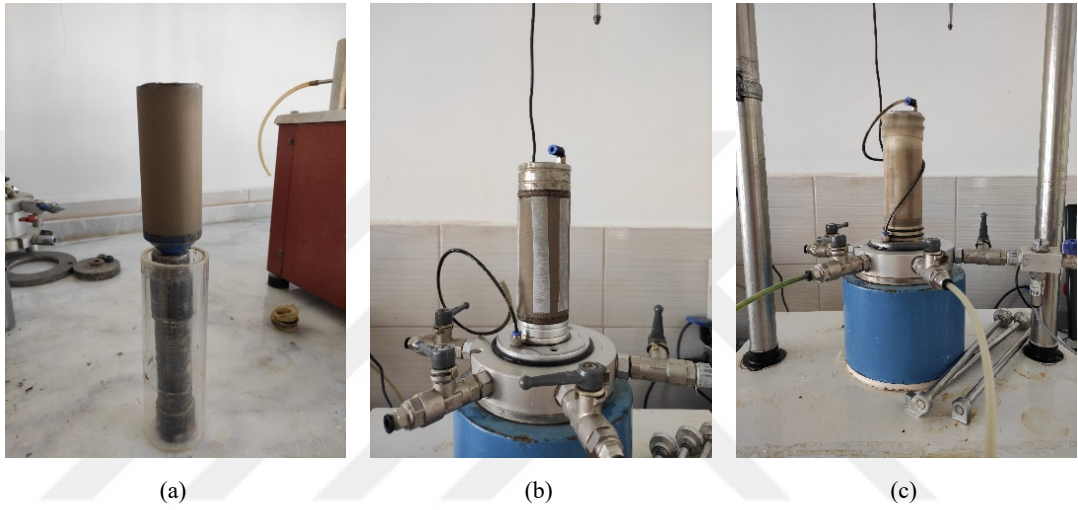
Şekil 3.3.'te SAÜ Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan üç eksenli hücre kesme deney düzeneği görülmektedir. 1 ve 2 numaralı basınç sağlarlar ile sırasıyla geri ve hücre basınçlarının oluşturulması sağlanmaktadır. 3 numaralı ünite hacim değişiminin ölçülmesini sağlamaktadır. Yükleme sistemi (ELE) 4 numara ile gösterilmiştir. 5 numaralı ünite (ELE-ADU), bilgisayar aracılığıyla deney işlemlerinin takip edilmesini ve deneyin yürütülmesini sağlayan veri işleyicidir. DS7 yazılımı ile geoteknik deneylerin yürütüldüğü deney aletinde, BS standartlarına göre veriler işlenmektedir.



Şekil 3.3. Üç eksenli hücre kesme deney düzeneği

3.3.1. CD deneyi için numune hazırlanması ve hücreye yerleştirilme

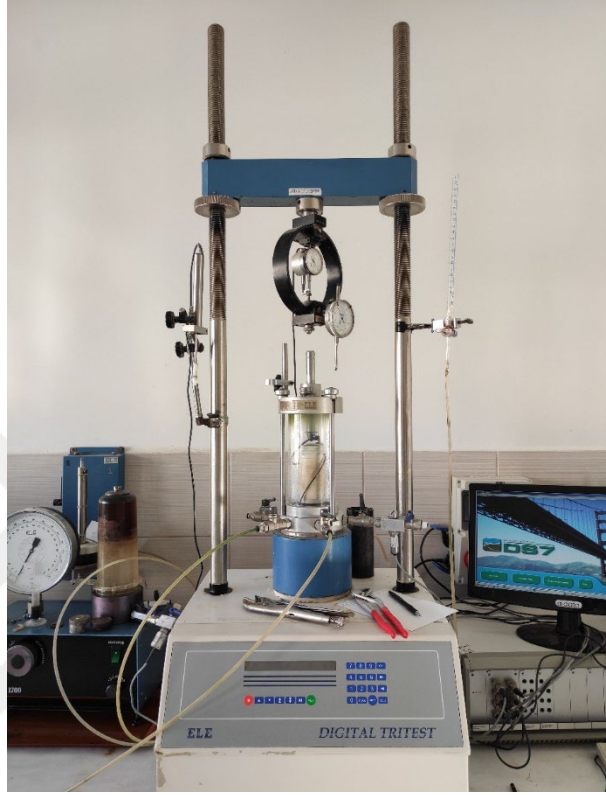
Ön konsolidasyon işlemi tamamlanan numunenin deney aletine yerleştirilmesinden önce deney aletinde hava boşluklarının engellenmesi için deney aletinin doygun duruma getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla hücre basıncı, geri basınç ve boşluk suyu basınçlarının oluşturulduğu hatlara su verilerek deney aleti doyurulmuştur.



Şekil 3.4. CD deneyi öncesi numunenin hazırlanması

Deney aletinin deney öncesi doyurulmasından sonra, ön konsolidasyon süreci tamamlanmış numune konsolidasyon hücresinden krika yardımıyla çıkarılmıştır (Şekil 3.4.a). Hücreden çıkarılan numunenin ağırlık ve yükseklik ölçümleri numunenin su muhtevasında değişiklik olmaması için vakit kaybedilmeden yapılmıştır. Numunenin alt ve üst kısmına sırasıyla filtre kâğıdı ve poroz taş, numunenin çevresine de drenajın hızlanmasını sağlamak amacı ile filtre kâğıdı yerleştirilmiştir. Ardından Şekil 3.4.b’de görüldüğü gibi deney aletine yerleştirilen numunenin üstüne başlık yerleştirildikten sonra membran geçirilmiş, membranın alt ve üst kısımlarda ikişer tane olacak şekilde plastik halkalar (o-ring) geçirilerek numunenin hücre içindeki sıvıyla ilişkisinin tamamen kesilmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.4.c). Numune, deney aletine yerleştirilmesinin ardından deney aletinin kurulumuna geçilmiştir.

Deney aletinde çevre basıncı oluşturulacak deney hücresi, deney aletine konulduktan sonra iyice sıkıştırılarak izole bir ortam oluşturulmuştur. Deney hücresi su ile doldurulmuş ve bilgisayar destekli CD deneyinin kurulumuna geçilmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Üç eksenli hücre kesme deney aleti

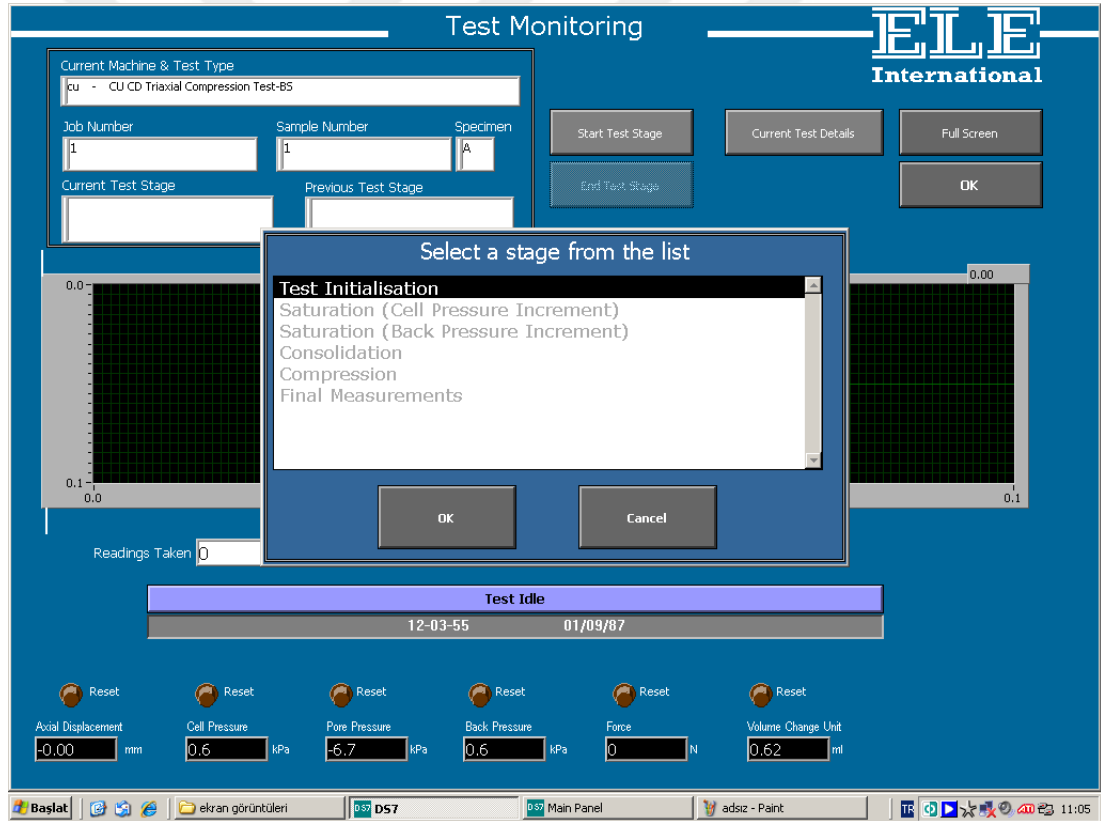
Bu çalışma kapsamında yapılan geleneksel ve çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinde, belirtilen numune hazırlama ve deney aletine yerleştirilme adımları birbirinden farksız olarak uygulanmıştır.

3.3.2. Geleneksel CD deneyinin yapılması

Bilgisayar destekli üç eksenli hücre kesme deney sistemi, manuel olarak yürütülen üç eksenli hücre kesme deneyinin hazır yazılım desteğiyle gerçekleştirilmesini ve deney verilerinin otomatik olarak kaydedilmesini sağlamaktadır. Deneye tabi tutulacak numunelerin bilgileri bilgisayar yazılımına tanımlanarak istenilen şartlarda deney gerçekleştirilir. Hücre basıncı ve geri basınç oluşturan 2 adet basınç ünitesi, hacim değişimini ölçen 1 adet hacim değişimi (*Volume Change*) ünitesi, kesme yapılan 1 adet

yükleme ünitesi, verilerin işlendiği bir ünite (ADU) ve bilgisayarın oluşturduğu deney düzeneği ile deney kontrolü sağlanmaktadır.

Bu yazılımda deney süreci altı aşamaya ayrılmıştır (Şekil 3.6.). İlk aşamada (*Test Initialisation*) deneye tabi tutulan numunenin çap, boy ve ağırlık değerleri ile numunenin doyurma aşamasında maruz kalacağı hücre ve geri basınçlarının değişimleri ile kesme aşamasında maruz kalacağı efektif gerilme değerleri tanımlanmıştır (Şekil 3.7.). Bu aşamada hücre basıncı, geri basınç ve boşluk suyu basınçlarının ölçüldüğü transdüşerlerin kalibre edilmesi için tüm vanalar kapalıyken açık hava basıncına maruz kalan transdüşerlerin sıfırlanması, ardından da deney hücresinin çevre basıncı oluşturması için su ile doldurulması gerekir.



Şekil 3.6. Deney aşamaları

Test Monitoring

Current Machine & Test Type: cu - CU CD Triaxial Compression Test-B5

Job Number: 1 | Sample Number: | Specimen: | Start Test Stage | Current Test Details | Full Screen

Test Initialisation

Physical Properties

Diameter	Sample Weight	Drainage	Membrane Thickness
50.00 mm	420.13 g	TOP	0.00 mm
Height	Bulk Density	Side Drains	
108.80 mm	1.97 Mg/m3	☒	

Test Conditions

Cell Pressure Increment Steps	Back Pressure Differential
50.0 kPa	10 kPa
Required Effective Stress	
100.0 kPa	

Read

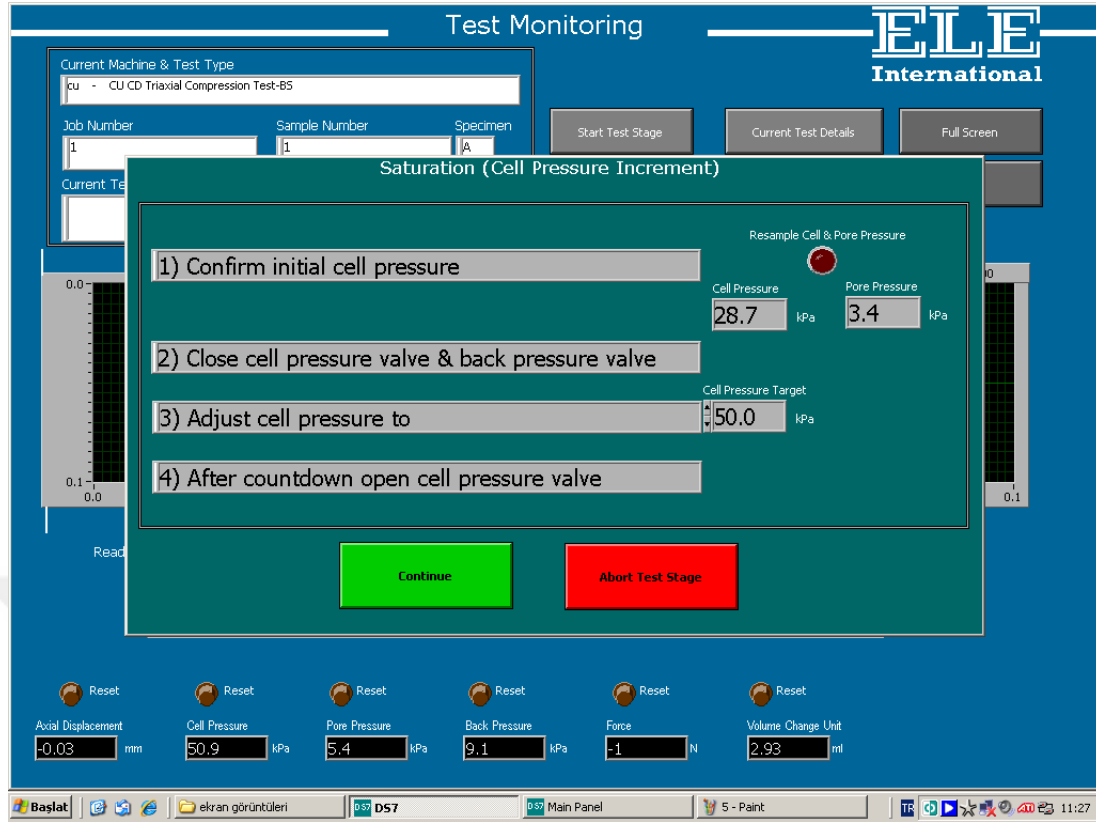
Reset **Reset** **Reset** **Reset** **Reset** **Reset**

Axial Displacement	Cell Pressure	Pore Pressure	Back Pressure	Force	Volume Change Unit
-0.00 mm	0.6 kPa	-6.8 kPa	1.0 kPa	0 N	0.66 ml

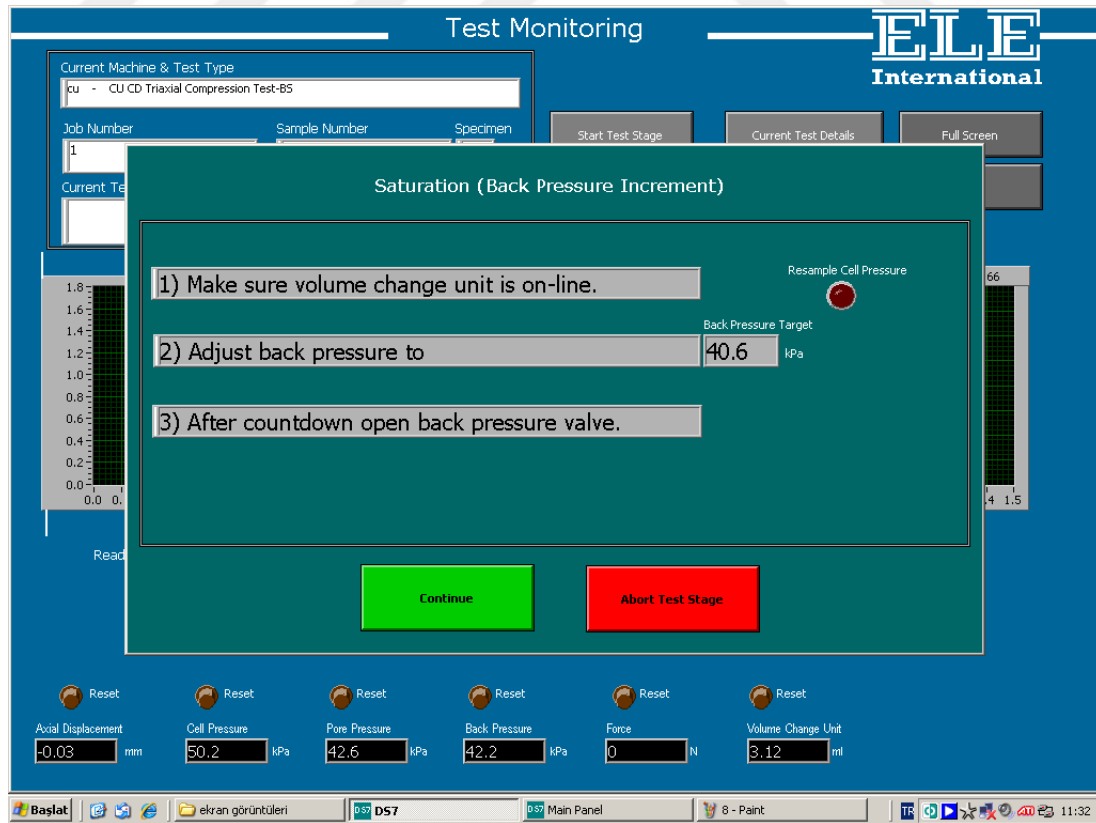
Windows Taskbar: Başlat | ekran görüntüleri | D57 | Main Panel | adsız1 - Paint | 11:07

Şekil 3.7. Numunenin fiziksel özelliklerinin yazılıma girilmesi

İkinci aşama hücre basıncının 50 kPa olarak ayarlanması ve numuneye verilmesi (*Cell Pressure Increment*) (Şekil 3.8.), üçüncü aşama geri basıncın 40 kPa olarak ayarlanması ve numuneye verilmesi (*Back Pressure Increment*) (Şekil 3.9.) adımlarıdır. İkinci ve üçüncü aşamalarda numune doyurulmaktadır. Test Initialisation kısmında numuneye verilecek hücre basıncının ve geri basıncın farkı 10 kPa olarak belirlendiği için hücre basıncı 500 kPa, geri basınç da 490 kPa olana kadar 50 kPa'lık arttırmalar yapılarak numunenin doyurulması sağlanmaktadır. Her Hücre Basıncı Artışı (*Cell Pressure Increment*) adımı Skempton bağıntısı ($B = u_w / \sigma_3$) ile numunenin doygunluk oranı belirlenmiştir. Tüm deneylerde doyurma aşamasında B değeri tüm numunelerde 0,95 ve üzeri değerlerde tespit edilmiştir. Deneye tabi tutulan deney numuneleri doygun olduğu için ikinci ve üçüncü aşamayı kapsayan doyurma süreci 3-5 saat aralığında sürmüştür. Bu sürenin, doygun olmayan bir numunenin doyurulması için gereken süreden çok daha az olduğu söylenebilir. Zira bulamaç tekniğinin avantajlarından biri de deney öncesinde numunenin neredeyse doygun olmasıdır.



Şekil 3.8. Hücre basıncı veri giriş ekranı

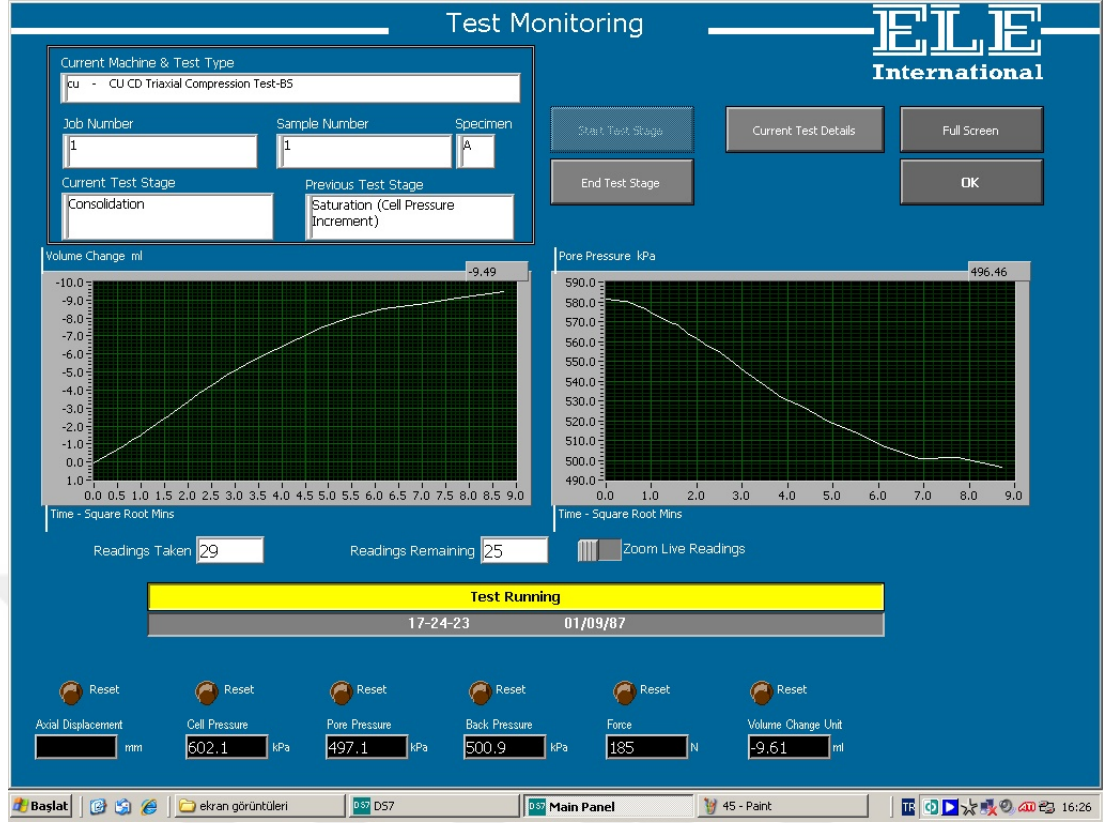


Şekil 3.9. Geri basınç veri giriş ekranı

Bu kısma kadar olan tüm adımlar bu çalışma kapsamında yürütülen geleneksel ve çok aşamalı (*multistage*) üç eksenli hücre kesme deneylerinde aynı yürütülmüştür. Çok aşamalı deneylerdeki konsolidasyon ve kesme adımlarındaki farklılıklara Bölüm 3.3.3.'te değinilmiştir.

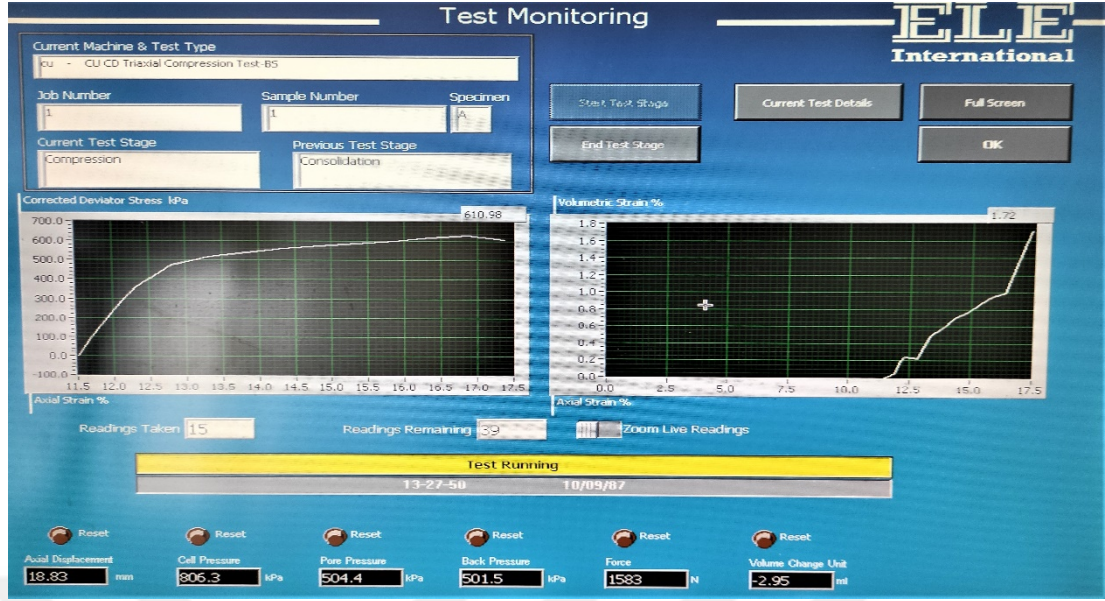
Dördüncü aşama doyurulmuş numunenin konsolide edildiği (*Consolidation*) adımdır. Numune belirlenen efektif çevre basıncında karekök-zaman grafiği eşliğinde konsolide edilir. 100 kPa'lık efektif gerilmelerde numunenin konsolide edilmesi ve kesilmesi gerçekleşecekse hücre basıncı 600 kPa ve geri basınç 500 kPa olarak ayarlanır. 200 kPa ve 300 kPa'lık efektif gerilmelerde konsolidasyon ve kesme sırasında geri basınç 500 kPa, hücre basıncı ise sırasıyla 700 kPa ve 800 kPa olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.10.'da %5 bentonit ile hazırlanmış numunenin 100 kPa deviatör gerilme ile konsolidasyon aşaması verilmiştir.

Bu çalışmada konsolidasyon süresi %2 bentonit ile hazırlanmış numunelerde 1-2 saat, %5 bentonit ile hazırlanmış numunelerde 2-4 saat arasında, %10 bentonit ile hazırlanmış numunelerde 6-8 saat arasında değişmiştir. Konsolidasyon süresinin numunenin içeriğindeki kil oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.10. Konsolidasyon aşaması grafikleri

Beşinci aşama konsolide edilmiş numunenin kesildiği (*Compression*) adımdır. Numune, belirlenen hızda ve %20 belirlenen deformasyon düzeyine kadar kesmeye tabi tutulmuştur. Konsolidasyon aşamasında uygulanan efektif gerilme kesme sırasında da uygulanmıştır. Şekil 3.11.'de %2 bentonitle hazırlanmış numunede 300 kPa'lık deviatör gerilme ile kesilmiş numunenin grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kesme aşaması grafikleri

3.3.3. Çok aşamalı CD deneylerinde konsolidasyon ve kesme aşamaları

Çok aşamalı Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneylerinde aynı numune üzerinde 100, 200, 300 kPa'lık efektif gerilmeler oluşturulmaktadır. Bu sebeple çok aşamalı deneyin doyurma ve konsolidasyon aşamaları 100 kPa efektif gerilme ile aynı olacak şekilde başlatılmıştır. Ardından 100 kPa efektif gerilme ile kesme aşaması belirli deformasyon miktarına kadar sürdürülmüş ve aynı numune 200 kPa efektif gerilme ile tekrar konsolide edilmiştir. 200 kPa efektif gerilme ile konsolide olmasının ardından 200 kPa efektif gerilmede tekrar belirli deformasyon düzeyine kadar kesilen numune bu sefer 300 kPa efektif gerilme ile konsolide edilip numunede gerçekleşen deformasyon düzeyi %20 olana kadar kesme işlemi devam ettirilmiştir.

Çok aşamalı deneylerde aşamalar sırasında deformasyon miktarları farklı tutularak numunelerde meydana gelecek farklılıkların irdelenmesi bu çalışmanın konusu olmuştur.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışma kapsamında Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda silt ve bentonit kiliyle hazırlanmış numunelerde endeks özelliklerinin belirlenmesi için TS 1900-1'e göre likit limit, plastik limit, piknometre ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek amacıyla geleneksel CD deneyleri yapılmış ve ayrıca CD deneyleri çok aşamalı olarak da uygulanmıştır. Geleneksel CD deneyleri üç farklı kil oranıyla hazırlanmış numuneler üzerinde üçer adet olmak üzere toplamda 9 adet, çok aşamalı CD deneyleri ise 9 adet yapılmıştır. Yapılan tüm deneylerin sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.1. Sınıflandırma Deneyleri

Zeminin mühendislik özelliklerinin ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla zeminler gruplara ayrılarak incelenmektedirler. Zeminlerin sınıflandırılmasında evrensel bir dil oluşturulabilmesi adına belirli standartlara uygun olarak yürütülen sınıflandırma deneyleri kapsamında zeminleri tanımlamak mümkün olmaktadır. Zemin cinsinin ve dane çapı dağılımlarının belirlenmesi için devam eden bölümlerde bahsedilmiş olan sınıflandırma deneyleri yapılmış ve deney sonuçları ilgili bölümlerde verilmiştir.

4.1.1. Özgül ağırlık

Zeminlerin en temel endeks özelliklerinden biri olan özgül ağırlık, zemin danelerinin hava ve su içermeyen kısmının birim hacimdeki miktarıdır. Özgül ağırlık tayini için piknometre deneyleri yapılmaktadır. TS 1900-1 uyarınca yapılmış piknometre deneylerinden elde edilen sonuçlar bu çalışma kapsamında kullanılmış olan %2, %5 ve %10 bentonit katkılı numuneler için özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2.66, 2.67 ve

2.65 bulunmuştur. Özgül ağırlık deneyleri aynı karışım oranında hazırlanmış numune üzerinde üçer adet olacak şekilde toplamda 9 adet yapılmıştır. Burada sunulmuş olan özgül ağırlık değerleri ortalama değerlerdir.

4.1.2. Kıvam limitleri

İnce daneli zeminlerin sınıflandırılmasında dane çapı dağılımından ziyade Atterberg kıvam limitleri kullanılır. Zeminin farklı su muhtevalarındaki kıvamı zeminin katı, plastik veya sıvı davranış göstermesine sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan numunelerin likit limit ve plastik limiti tayinleri yapılmış ve plastisite kartındaki yerleri belirlenmiştir.

TS 1900-1 uyarınca Casagrande yöntemiyle yapılan likit limit tayininde 25 vuruşa karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit olarak belirlenmiştir. Tek seferde 25 vuruşu yakalamak zor olacağından Casagrande likit limit deneyi aynı karışım oranında hazırlanmış numune üzerinde farklı su muhtevalarında olmak üzere dörder kez tekrarlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan numunelere ait likit limit ve plastik limit değerleri Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

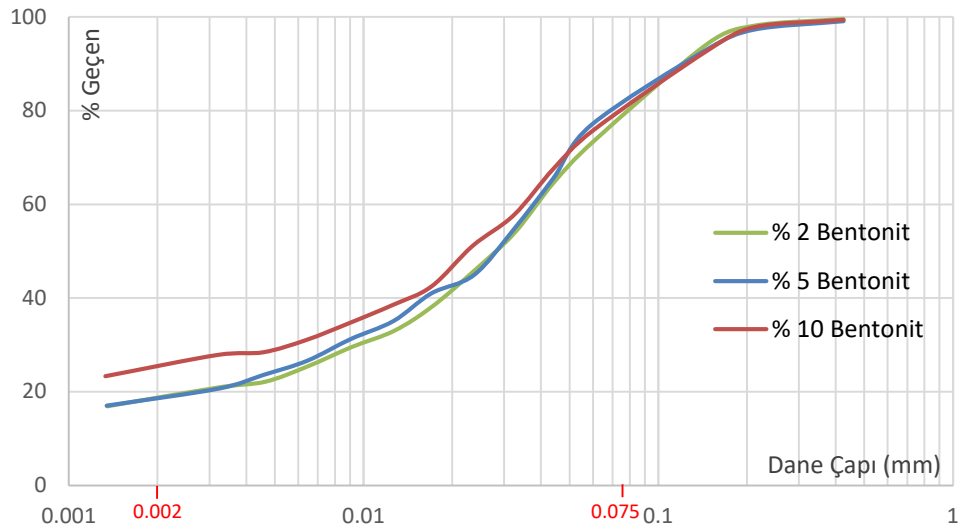
Tablo 4.1. Numunelerin zemin sınıfları

Bentonit Kili Oranı	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	Zemin Sınıfı
%2	30.3	22.85	7.45	CL
%5	31.6	20.61	10.99	CL
%10	34.5	20.03	14.47	CL

4.1.3. Dane çapı dağılımı

Dane çapı dağılımı, belirli çaplardaki dane gruplarının, zeminin toplam kuru kütleline oranla yüzde olarak belirtilmesidir. Bu çalışmada kullanılan zemin ince daneli olduğu için dane çapı dağılımının bulunmasında çöktürme yöntemlerinden biri olan

hidrometre metodundan da yararlanılmıştır. Deney TS 1900-1 uyarınca yürütülmüş ve farklı karışım oranında hazırlanmış zemin numunelerinin içerdiği kil, silt ve kum oranları Tablo 4.2.'de verilmiştir. Dane çapı 0.0075 mm'den büyük daneler kum ve çakıl, küçük daneler ise kil ve silt boyutundaki zemini oluşturmaktadır. 0.002 mm'den küçük boyutlu zemin daneleri kil, 0.002 mm-0.075 mm boyutları arasındaki malzeme de silt olarak nitelendirilmektedir. Hidrometre deney sonucuna ait dane çapı dağılımı grafiği Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelerin dane çapı dağılım grafiği

Tablo 4.2. Numunelerde bulunan kil, silt ve kum oranları

Bentonit Kili Oranı	Kil Oranı (%)	Silt Oranı (%)	Kum Oranı (%)
%2	19	59	22
%5	19	63	18
%10	25	55	20

Yapılan hidrometre analizlerine göre %2 ve %5 bentonit ile hazırlanan numunelerde dane çapı dağılımlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

Adapazarı siltine bentonit kili karıştırılmasıyla oluşturulan zeminin CL sınıfına ait olduğu görülmüştür. Bu sebeple çalışmada kullanılan zemin kil olarak adlandırılacaktır.

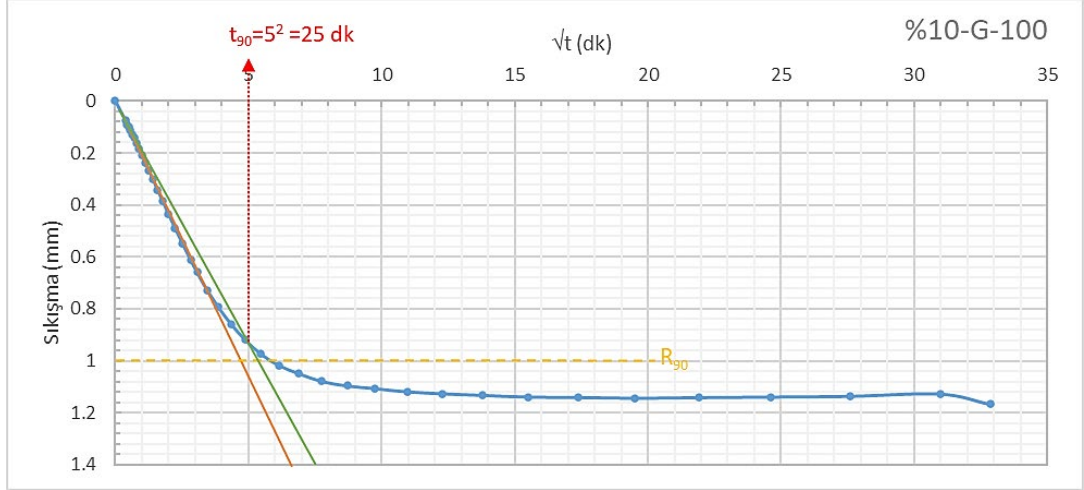
4.2. Üç Eksenli Hücre Kesme Deney Sonuçları

Bu çalışma kapsamında silt ağırlığı sabit tutulmuş ve bentonit kili oranı silt ağırlığının %2, %5 ve %10'u olarak belirlenerek numuneler oluşturulmuştur. Bu üç tip numunede efektif gerilme değerleri 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa olmak üzere 3'er tane geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi ASTM (D7181) uyarınca yapılmıştır. Bölüm 4.2.2.'de geleneksel şekilde yapılmış olan üç eksenli hücre kesme deneylerinin sonuçları verilmiştir.

%2 oranında bentonit kiliyle hazırlanmış numunelerde 5 adet döngüsel yükleme metodu, 1 adet devamlı yükleme metodu; %5 oranında bentonit kiliyle hazırlanmış numunelerde 3 adet döngüsel yükleme metodu; %10 oranında bentonit kiliyle hazırlanmış numunede 1 adet döngüsel yükleme metodu uygulanmıştır. Bu deneyler farklı deformasyon oranlarında uygulanarak çalışma genişletilmiştir. Bölüm 4.2.3.'te çok aşamalı yapılmış olan üç eksenli hücre kesme deneyleri sonuçları verilmiştir.

4.2.1. CD deneylerinde kesme hızının belirlenmesi

CD deneylerinde kesme hızı ASTM (D2435, D7181) standardı takip edilerek belirlenmiştir. %10 bentonit ile hazırlanmış numunede 100 kPa deviatör gerilme ile yapılmış geleneksel deneyde konsolidasyon aşamasında elde edilen grafik Şekil 4.2.'de verilmiştir. Bu grafiğe göre t_{90} değeri 25 dk olarak belirlenmiştir. Denklem 2.10'da belirtilen deformasyon değeri tüm deneyler için %3 kabul edilerek deformasyon hızı bulunmuştur. Çok aşamalı deneylerde denenen en küçük deformasyon aralığı %2.5-3'tür (Bölüm 4.2.3.). Ek olarak CD deneylerinde boşluk suyu basınçlarının oluşması ihtimalini daha az tutmak adına düşük hızla kesilmesi istenmesi sebebiyle Denklem 2.10'daki deformasyon değeri %3 alınmıştır.



Şekil 4.2. %10-G-100 deneyi konsolidasyon grafiği

Şekil 4.2.'de bulunuşu gösterilen t_{90} parametresi %2, %5 ve %10 bentonitle hazırlanmış 100, 200 ve 300 kPa deviator gerilme uygulanmış tüm geleneksel üç eksenli hücre deneylerinin konsolidasyon aşamaları için elde edilmiştir. Numunelerin boyları 100 mm kabul edilerek bulunan t_{90} değerleri ve deformasyon hızları Tablo 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Deney hızları

	t_{90} (dk)	Hız, ϵ' (mm/dk)
%2-G-100	25	0.0075
%2-G-200	49	0.0038
%2-G-300	25	0.0075
%5-G-100	16	0.0117
%5-G-200	36	0.0052
%5-G-300	144	0.0013
%10-G-100	25	0.0075
%10-G-200	100	0.0019
%10-G-300	81	0.0023

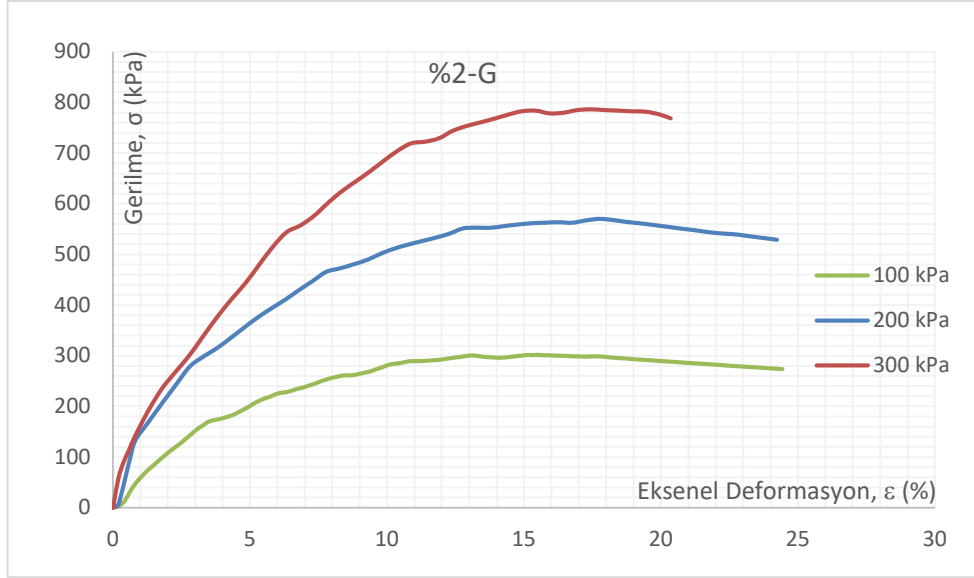
Deformasyon hızının bulunmasında kullanılan t_{90} değerlerinin belirlenmesi deneyi yürüten kişiye oldukça bağlıdır ve yapılan seçimlerdeki küçük farklılıklar dahi sonuçları büyük oranda etkilemektedir.

Literatürde yapılmış çalışmalarda kullanılan deformasyon hızları incelendiğinde, Ho ve Fredlund (1982) doygun olmayan zeminler üzerinde yaptıkları çok aşamalı deneylerde deformasyon hızı seçimi için konsolidasyon katsayısından yararlanmışlar ve deney hızını 0.001 mm/dk olarak belirlemişlerdir. Banerjee ve ark. (2020) doygun olmayan killi siltli zemin üzerinde çok aşamalı Konsolidasyonlu-Drenajlı deneyler yapmışlar ve deney hızı olarak 0.003 %/dk kullanmışlardır. Hormdee ve ark. (2012) siltli killi zeminler üzerinde yaptıkları çok aşamalı deneylerde deformasyon hızı olarak 0.002 %/dk almışlardır. Sharma ve ark. (2011) siltli kumlar üzerinde yapılan çok aşamalı Konsolidasyonlu-Drenajlı deneylerde her yükleme aşamasını sonlandırabilmek ve ardından diğer aşamaya geçebilmek için yeterli zaman kalması amacıyla deformasyon hızını 0.005 %/dk olarak belirlemişlerdir. Aynı zamanda genel laboratuvar deneylerinde Skempton (1985) hız değeri olarak 0.005 mm/dk değerini önermiştir.

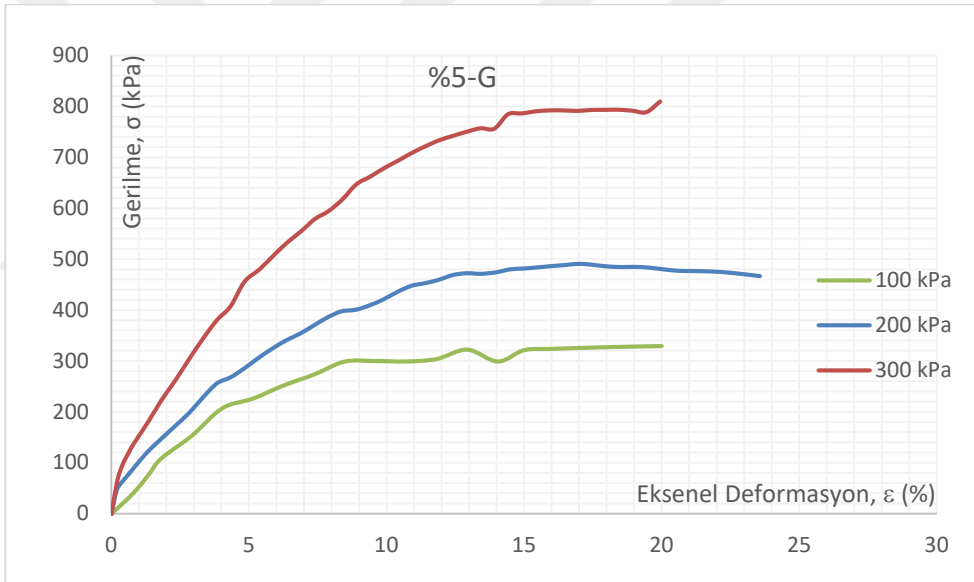
Tablo 4.3.'te verilen deformasyon hızları değerlerinde boşluk suyu basınçlarının değerlerini arttırmayacak değerin 0.005 mm/dk olacağı kabul edilerek bu değer, geleneksel ve çok aşamalı deneylerde kullanılan deformasyon hızı değeri olarak seçilmiştir.

4.2.2. Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyleri sonuçları

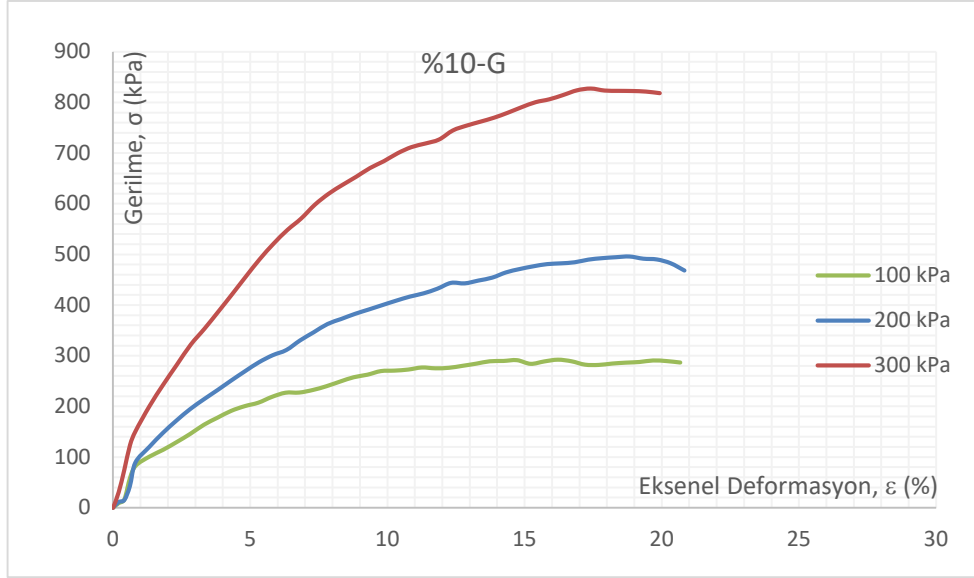
Bu çalışmada çok aşamalı deneylerin klasik değerlerle karşılaştırılabilmesi için geleneksel üç eksenli deneyler de yapılmış, zeminin kayma direnci parametreleri belirlenmiştir. DS7 yazılımının kullanmış olduğu BS standartları ile hesaplanan konsolide olmuş boyutlar kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Geleneksel Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleri (CD) sonucunda elde edilmiş gerilme-eksenel deformasyon grafikleri %2 bentonit ile hazırlanmış numune için Şekil 4.3.'te, %5 bentonit ile hazırlanmış numune için Şekil 4.4.'te ve %10 bentonit ile hazırlanmış numune için Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.3. %2-G deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiği

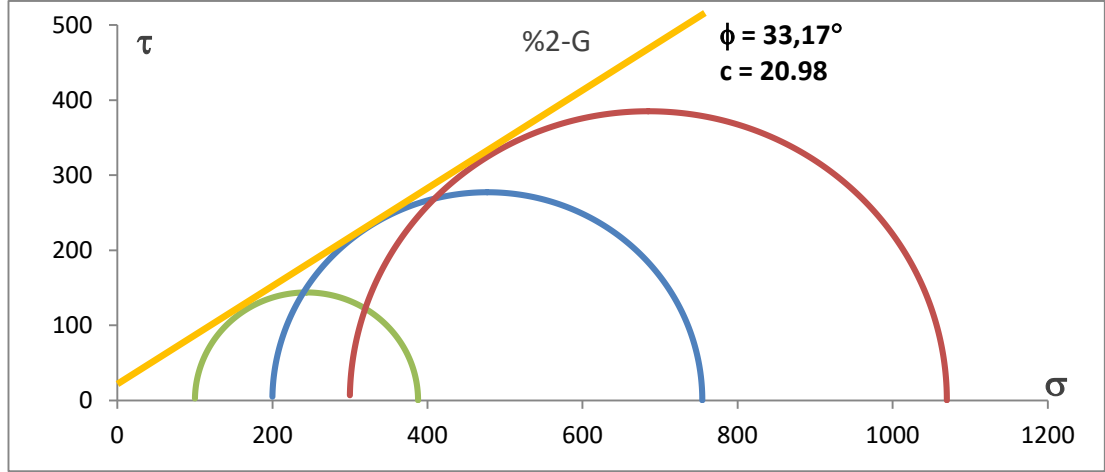


Şekil 4.4. %5-G deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiği

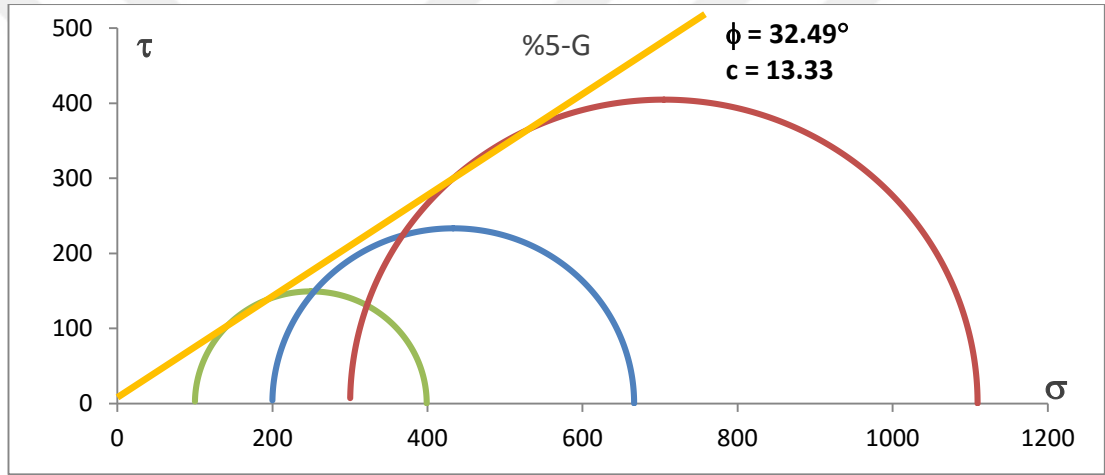


Şekil 4.5. %10-G deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiği

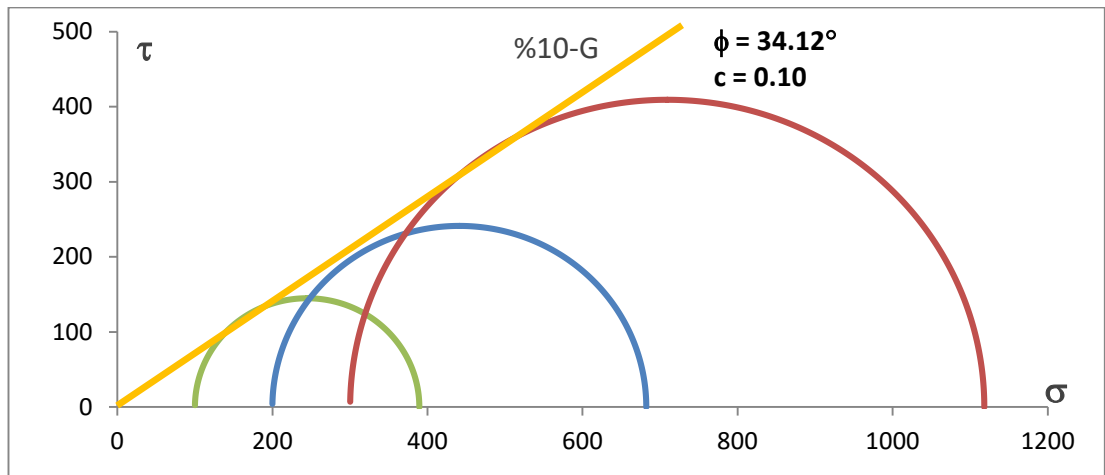
Göçme kriteri olarak %20 deformasyon sırasında zemininin aldığı en büyük deviatör gerilme belirlenmiştir. Bu kritere bağlı kalındığında elde edilen gerilme-eksenel deformasyon eğrilerinde maksimum deviatör gerilmenin %20 deformasyon noktasında olduğu görülmüştür. Buna göre, %20 deformasyona denk gelen gerilmeler ile Mohr-Coulomb kırılma zarfları oluşturulmuş ve kayma mukavemeti parametreleri analitik yöntemle belirlenmiştir. Kayma mukavemeti parametreleri analitik yöntemle belirlenirken sırasıyla 100 kPa-200 kPa; 200 kPa-300 kPa; 100 kPa-300 kPa değerlendirilmeleri yapılarak kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınarak nihai kayma mukavemeti parametrelerine ulaşılmıştır. Aynı zamanda deney sonuçlarının grafik değerlendirme sonuçları da Şekil 4.6., 4.7. ve 4.8.'de sunulmuştur.



Şekil 4.6. %2-G deneyleri için Mohr-Coulomb kırılma zarfı



Şekil 4.7. %5-G deneyleri için Mohr-Coulomb kırılma zarfı



Şekil 4.8. %10-G deneyleri için Mohr-Coulomb kırılma zarfı

%2 bentonit için elde edilen kırılma zarfı Şekil 4.6.'da gösterilmiştir, buna göre içsel sürtünme açısı 33.17° , kohezyon 20.98 kPa tespit edilmiştir. %5 bentonit için elde edilen kırılma zarfı Şekil 4.7.'de gösterilmiştir, buna göre içsel sürtünme açısı 32.49° , kohezyon 13.33 kPa bulunmuştur. %10 bentonit için elde edilen kırılma zarfı Şekil 4.8.'de gösterilmiştir, buna göre içsel sürtünme açısı 34.12° , kohezyon 0.10 kPa olarak belirlenmiştir.

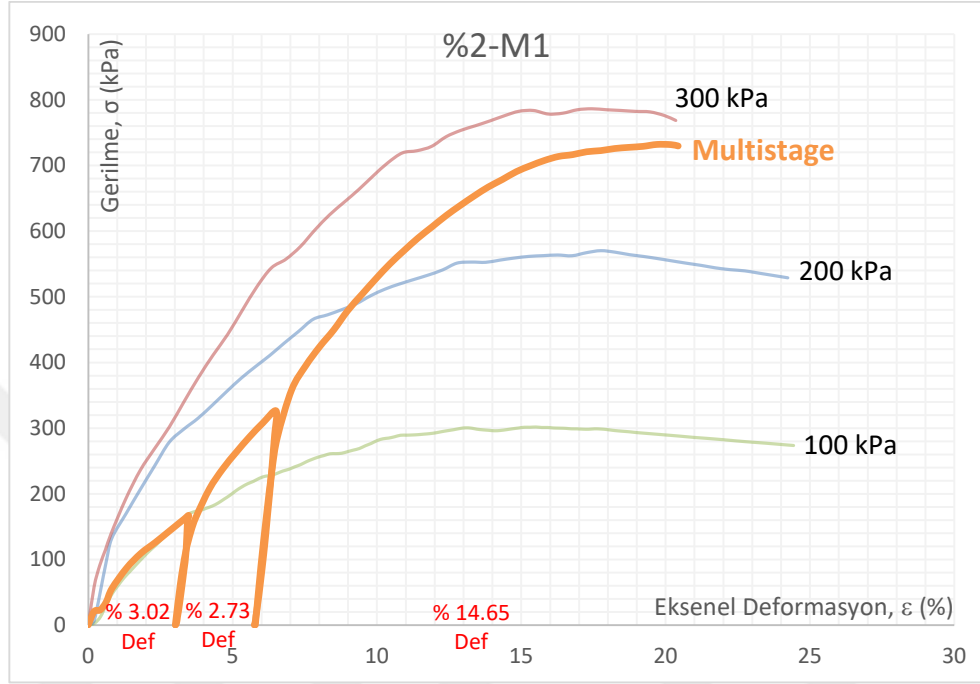
4.2.3. Çok aşamalı (Multistage) üç eksenli hücre kesme deneyi sonuçları

Bu çalışmanın asıl konusu olan çok aşamalı Konsolidasyonlu-Drenajlı üç eksenli hücre kesme deneyleri sonucunda elde edilmiş gerilme-eksenel deformasyon grafikleri bu bölümde yorumlanmıştır. Farklı deformasyon miktarlarında çok aşamalı deneylerde gözlenecek farklı sonuçların irdelenmesi amaçlanmıştır. Gerilme-deformasyon grafikleri oluşturulurken DS7 geoteknik deney yazılımının kullandığı BS standartlarında hesaplanan konsolide olmuş numune verilerinden yararlanılmıştır. Her aşama için birinci aşama sonunda belirlenen konsolide olmuş boyutlar kullanılarak gerilme-deformasyon grafiklerinin oluşturulması için hesaplar yapılmıştır. Şekil 4.12.'de gösterilen %2-M4 deneyi (%2 bentonitle hazırlanmış numunede yürütülen 4. çok aşamalı deney) haricindeki tüm deneyler döngüsel yükleme metodu kullanılarak, %2-M4 deneyi ise devamlı yükleme metodu kullanılarak yapılmıştır. Döngüsel yükleme metodlarının kullanıldığı deneylerde aşamalardaki deformasyon miktarları, aşamanın sonlandırıldığı ancak deviatör gerilmenin henüz sıfırlanmadığı noktaya kadar tanımlanmıştır. Devamlı yükleme metodunda ise aşamanın başlatıldığı ve sonlandırıldığı noktalar arası deformasyon miktarının belirlendiği kısımdır.

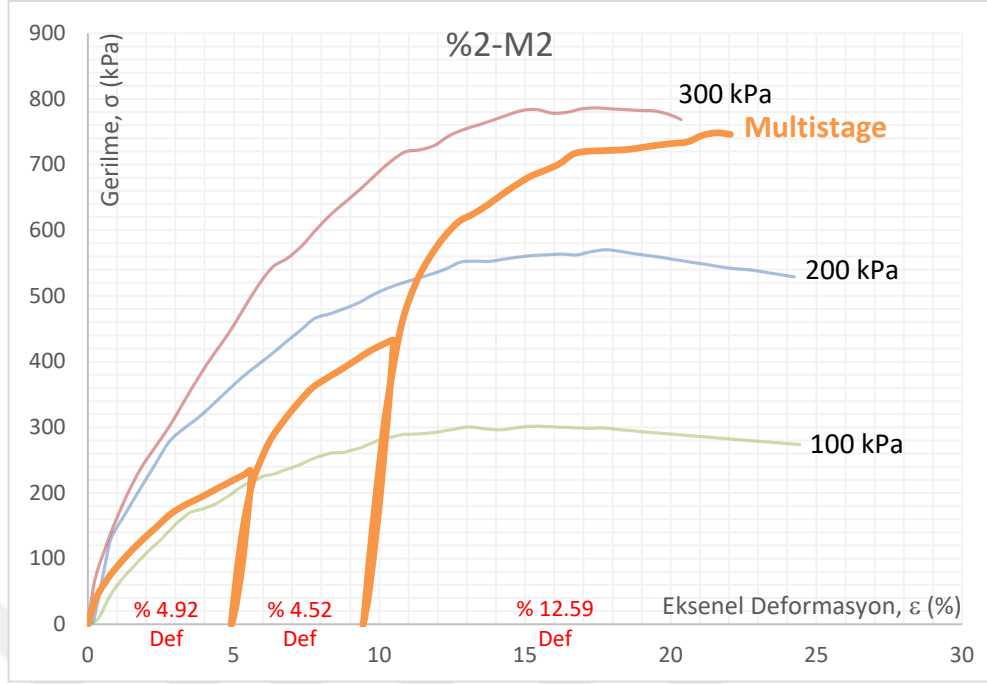
Şekil 4.9.'da %2-M1 olarak adlandırılan %2 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1, 2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %3.02, %2.73 ve %14.65 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.10.'da %2-M2 olarak adlandırılan %2 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1, 2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %4.92, %4.52 ve %12.59 olduğu görülmektedir.

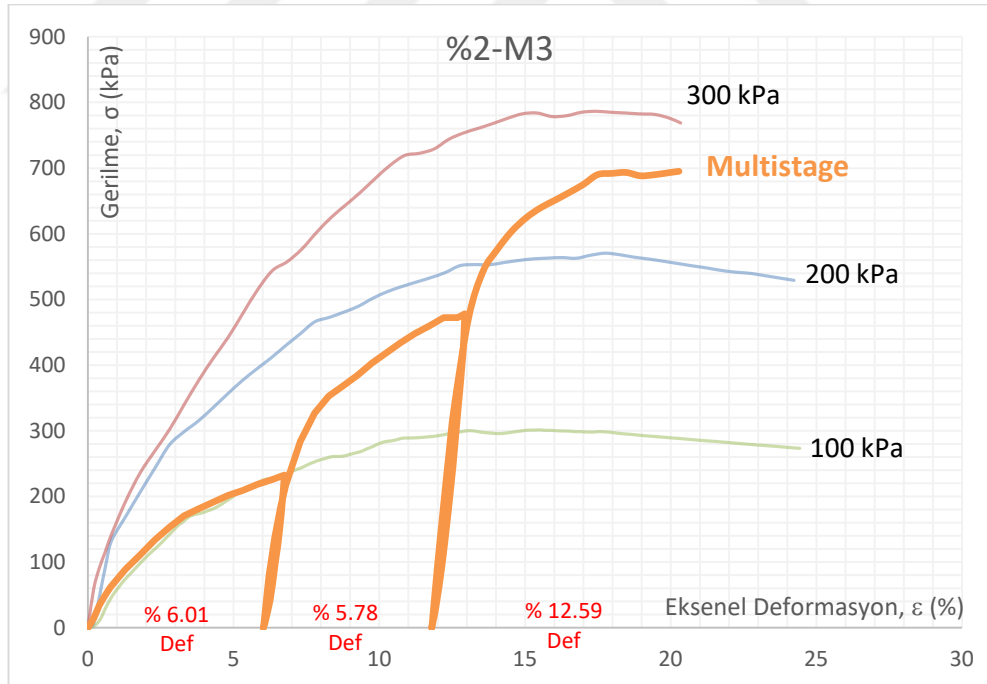
Şekil 4.11.'de %2-M3 olarak adlandırılan %2 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1, 2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %6.01, %5.78 ve %12.59 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.9. %2-M1 deneyi gerilme-eksel deformasyon grafiği

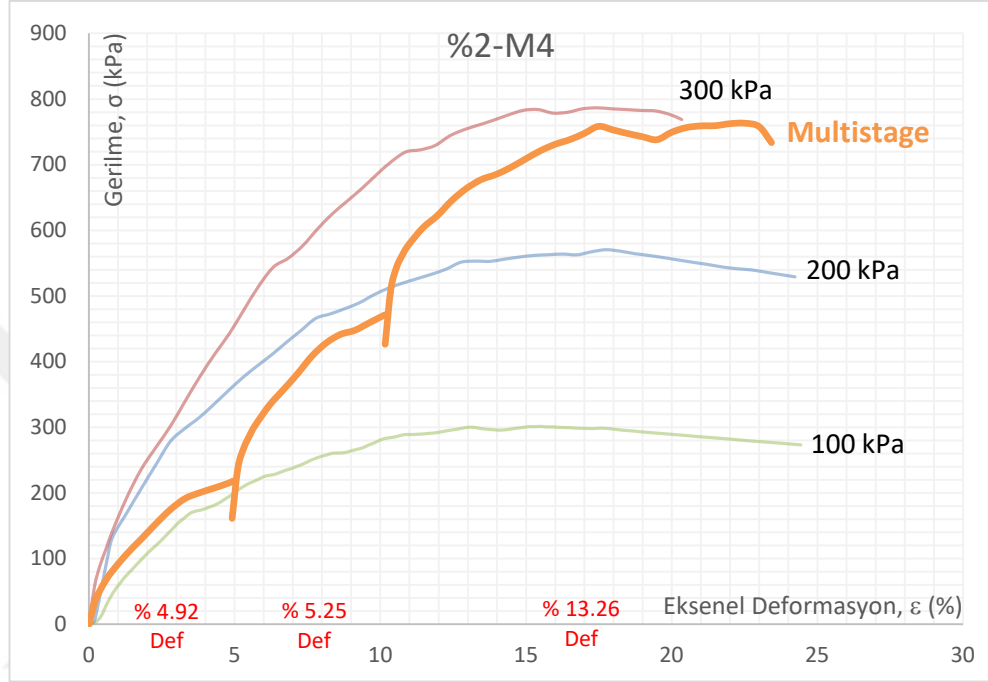


Şekil 4.10. %2-M2 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği



Şekil 4.11. %2-M3 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği

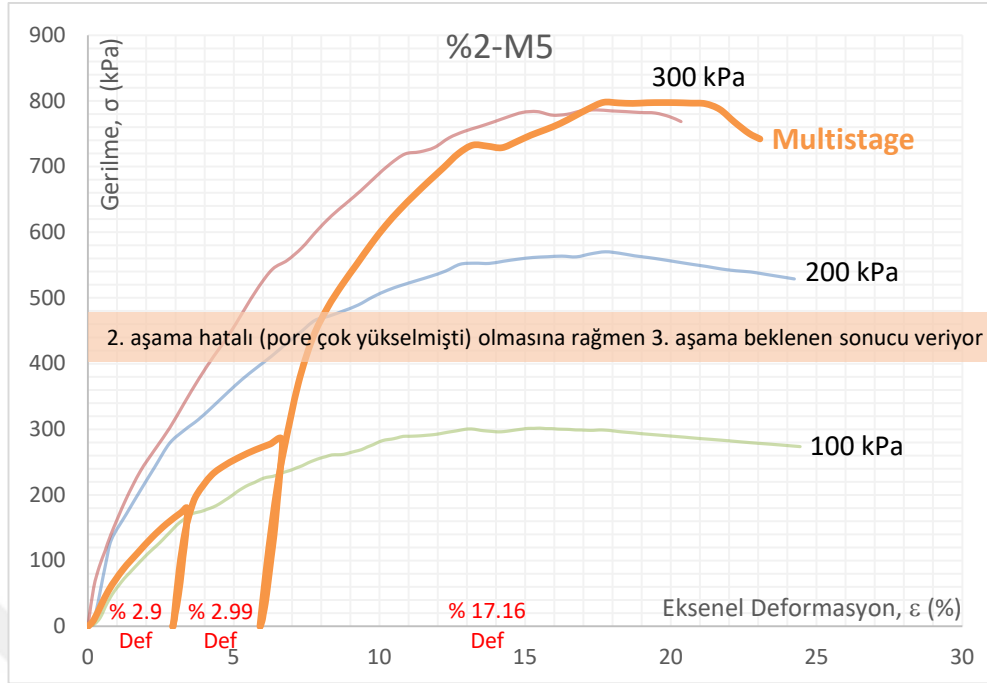
Şekil 4.12.'de %2-M4 olarak adlandırılan %2 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1,2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %4.92, %5.25 ve %13.26 olduğu görülmektedir. %2-M4 deneyi bu çalışma kapsamında yapılmış olan devamlı yükleme metodunun kullanıldığı tek deneydir.



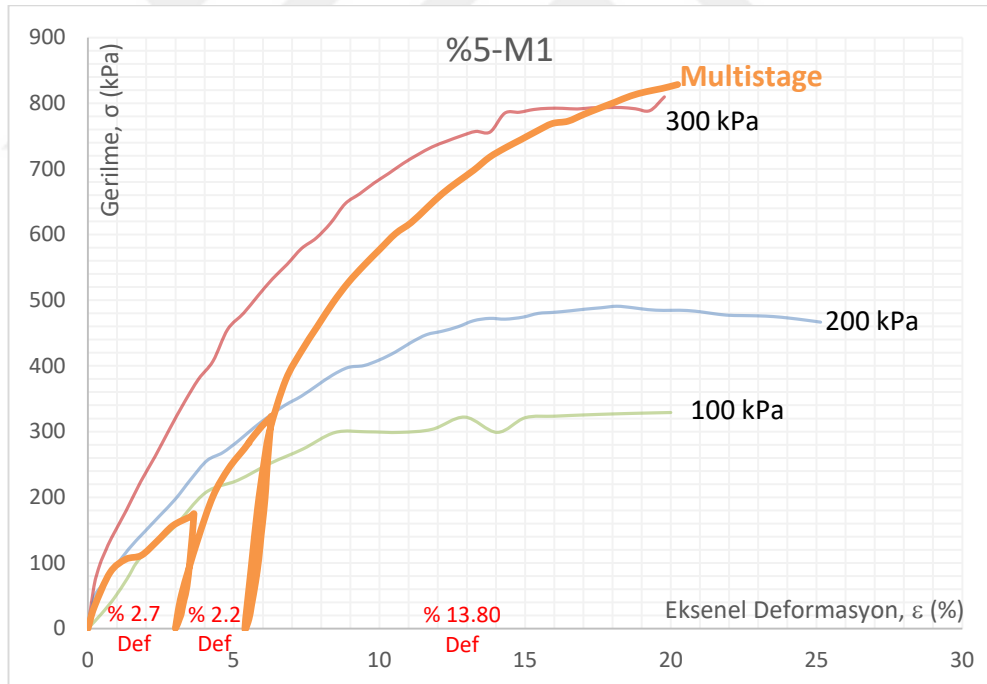
Şekil 4.12. %2-M4 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği

Şekil 4.13.'te %2-M5 olarak adlandırılan %2 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1,2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %2.9, %2.99 ve %17.16 olduğu görülmektedir. %2-M5 çok aşamalı deneyinin 2. aşaması sırasında boşluk suyu basıncının yükselmesi sonucu 2. aşamada numunenin aldığı gerilme miktarı olması gereken değerden çok daha düşük çıkmıştır. Ancak 3. aşamada elde edilen gerilme değerinin ise beklenen değerde çıktığı görülmektedir. Bu duruma çalışmanın sonuçlarının irdelendiği Bölüm 5.'te değinilmiştir.

Şekil 4.14.'te %5-M1 olarak adlandırılan %5 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1, 2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %2.7, %2.2 ve %13.80 olduğu görülmektedir.



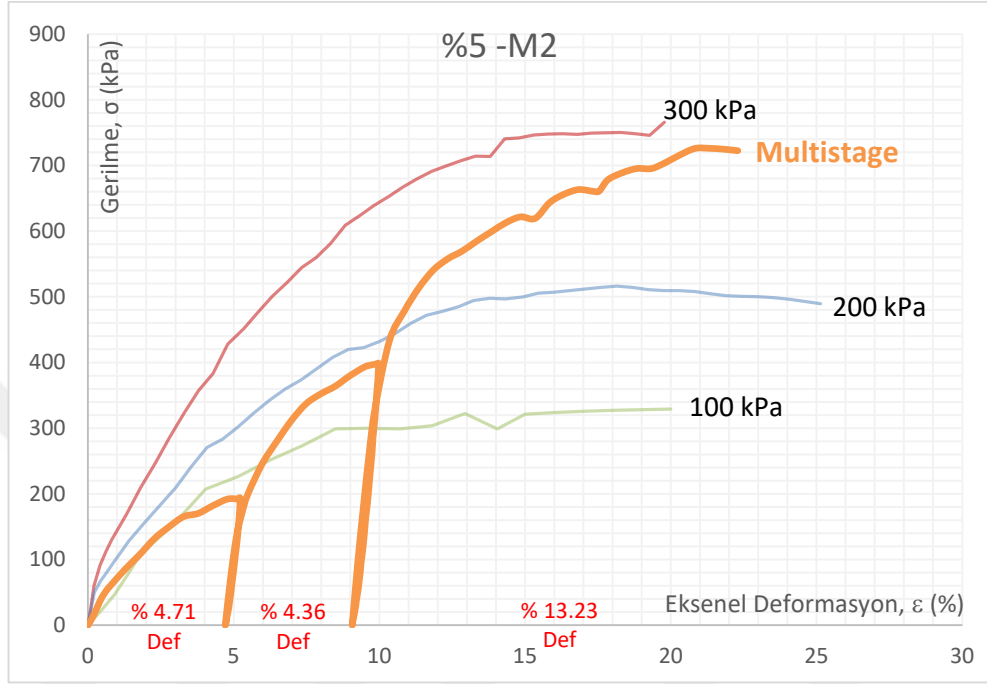
Şekil 4.13. %2-M5 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği



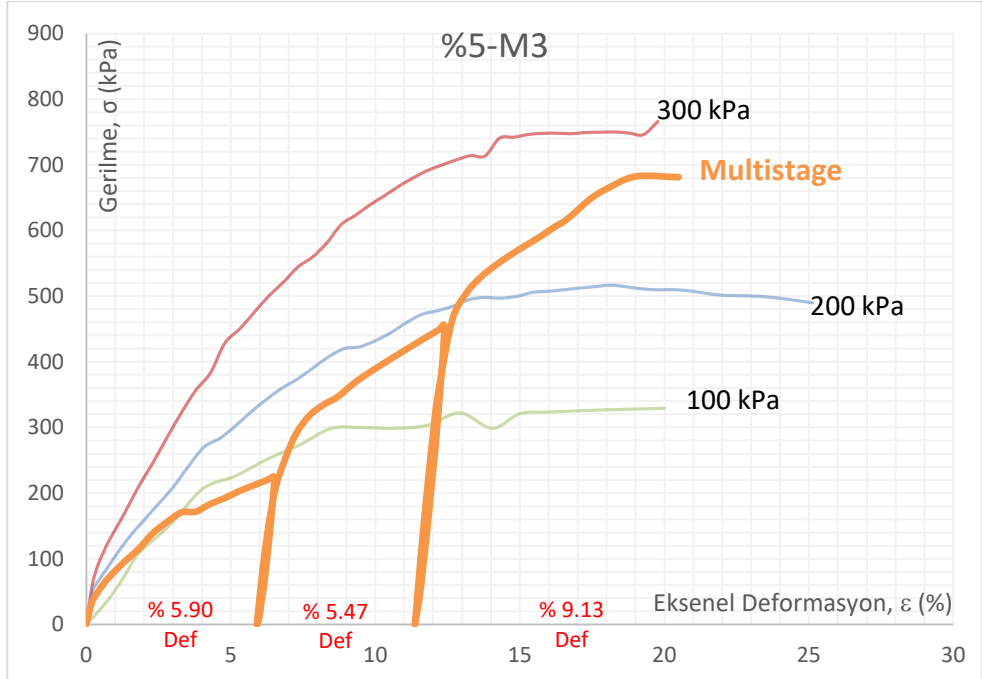
Şekil 4.14. %5-M1 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği

Şekil 4.15.'te %5-M2 olarak adlandırılan %5 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1,2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %4.71, %4.36 ve %13.23 olduğu görülmektedir.

Şekil 4.16.'da %5-M3 olarak adlandırılan %5 bentonit ile hazırlanmış numunede aşama 1, 2 ve 3 için deformasyon miktarlarının sırasıyla %5.90, %5.47 ve %9.13 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. %5-M2 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği



Şekil 4.16. %5-M3 deneyi gerilme-eksenel deformasyon grafiği

Geleneksel deneylere bakıldığında numunelerdeki farklı bentonit kili oranlarının oluşturulan zemin numunelerinde dayanıma etki etmediğine değinilmiştir. Bu sebeple aynı deformasyon miktarlarında çok aşamalı deneyleri gerçekleştirilen %2-M1, %5-M1, %10-M1 deneyleri incelendiğinde, %15 deformasyonda yaklaşık olarak aynı değerlerin elde edildiği söylenebilir.

Tablo 4.4. Çok aşamalı deneylerde %15 deformasyondaki gerilmeler

Numune	Aşama 1	Aşama 2	Aşama 3	%15 Deformasyondaki Gerilme (kPa)
	Deformasyon (%)			
%2-M1	3.02	2.73	14.65	695
%2-M2	4.92	4.52	12.59	682
%2-M3	6.01	5.78	12.59	624
%2-M4	4.92	5.25	13.26	709
%2-M5	2.9	2.99	17.16	748
%5-M1	2.7	2.2	13.8	747
%5-M2	4.71	4.36	13.23	619
%5-M3	5.9	5.47	6.05	575
%10-M1	2.64	2.4	14.13	693

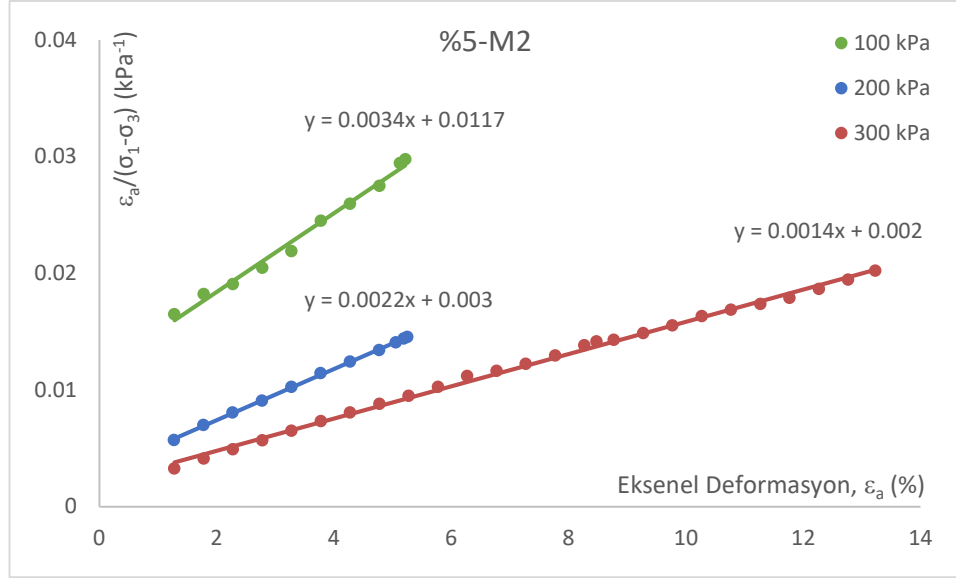
Bu çalışma kapsamında devamlı yükleme metoduyla yürütülmüş tek deney olan %2-M4 deneyi incelendiğinde verilen deformasyon eğrisinin aslında geleneksel deneylerle örtüştüğü görülmüştür. %2-M4 deneyindeki deformasyon oranları %2-M2 deneyiyle benzerlik göstermektedir. Bu iki deney yapılan önceki çalışmaların önerileriyle incelendiğinde, devamlı yükleme metoduyla yapılmış %2-M4 deneyinde konsolidasyon sırasında deviatör gerilmenin devam etmesi sebebiyle deforme olmaya devam edeceği ve dayanımının döngüsel yükleme metoduyla yapılmış bir numuneye göre daha düşük çıkması beklenmiştir. Ancak döngüsel yükleme metodu uygulanarak yürütülmüş %2-M2 deneyinde dayanımın beklenen şekilde %2-M4 deneyindeki dayanımdan yüksek çıkmadığı görülmektedir. Bu durumun açıklaması için daha fazla deneye ihtiyaç vardır. Bu sebeple yürütülen bu çalışma kapsamında bu durum açıklanamamaktadır.

%2-M5 deneyi hatalı bir deney olmuştur. Ancak incelenebilir olduğu düşünüldüğü için çalışmada yer verilmiştir. Deneyin ikinci aşamasında boşluk suyu basınçları aşırı yükselmiş ve bu sebeple bu aşamada numunenin aldığı gerilmenin çok düşük olduğu görülmüştür. Yine de numunenin üçüncü aşama deneyi de gerçekleştirilmiş ve deney tamamlanmıştır. Oluşan deformasyon eğrisi incelendiğinde %15 deformasyondaki gerilmenin, yaklaşık olarak aynı deformasyon miktarlarında gerçekleştirilen %2-M1 deneyindeki gerilmeden yüksek bir değerde olduğu gözlenmiştir.

4.2.2.1. Kondner metodu ile kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi

Çok aşamalı deneylerde numunenin göçme noktasına kadar deformasyona uğratılmaması bir sonraki aşamalarda numunenin dayanım kaybına uğramaması açısından önemlidir. Kayma direnci parametrelerinin elde edilmesi için göçme anındaki deviatör gerilmelerin tahmin edilmesi gerekir. Bu tahminlerin yapılması için araştırmacılar farklı metotlar önermişlerdir. Shidharan ve Rao (1972) çalışmalarında Kondner (1963)'in gerilme-deformasyon arasındaki hiperbolik ilişkisini kullanarak göçme anındaki deviatör gerilmenin tahmin edilebileceğine değinmişlerdir. Bu çalışma kapsamında yürütülen çok aşamalı deneylerdeki deviatör gerilmenin tespit edilmesi için de aynı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle yapılmış çalışmalarda ek olarak bir seri daha geleneksel deneyler yapılarak Kondner metoduyla kayma direnci parametrelerini elde etmişlerdir. Bu çalışmada Kondner metodu kullanılarak elde edilen kayma direnci parametreleri geleneksel deney verisi kullanılmadan sadece çok aşamalı deneylerde aşamalarındaki gerilme-deformasyon ilişkisi kullanılarak tahmin edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yürütülmüş %2-M1, %2-M2, %2-M3, %5-M1, %5-M2, %5-M3, %10-M1 deneylerinde hiperbolik yöntemle çok aşamalı deneylerin her aşaması için deviatör gerilmeler tahmin edilmiş ve kayma direnci parametreleri elde edilmiştir. Tablo 4.5.'te önerilen denklemde kullanılan a ve b sabitlerinin değerleri ve elde edilen kayma direnci parametreleri verilmiştir. Tablo 4.5.'te verilen deneylerden %5-M2 deneyi için, gerilme ve deformasyon verileriyle oluşturulmuş hiperbolik doğrusal grafikleri Şekil 4.18.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. %5-M2 gerilme-deformasyon grafiğinin hiperbolik lineerizasyonu

Tablo 4.5. Çok aşamalı deneylerde a, b parametreleri ve kayma direnci parametreleri

	100 kPa		200 kPa		300 kPa		c (kPa)	φ
	a	b	a	b	a	b		
%2-M1	0.0121	0.0026	0.0033	0.0021	0.0028	0.0012	15.04	30.55
%2-M2	0.0095	0.0027	0.0024	0.0019	0.0013	0.0012	12.39	32.59
%2-M3	0.0109	0.0027	0.0025	0.0017	0.0009	0.0013	29.85	31.36
%5-M1	0.0094	0.0032	0.0034	0.0020	0.0031	0.0010	-19.66	35.90
%5-M2	0.0117	0.0034	0.0030	0.0022	0.0020	0.0014	6.65	30.52
%5-M3	0.0100	0.0030	0.0026	0.0019	0.0014	0.0013	15.04	31.73
%10-M1	0.0064	0.0040	0.0033	0.0025	0.0037	0.0010	-36.10	35.48

Kırılma zarfı oluşturulurken, geleneksel deneylerde de olduğu gibi, ayrıca analitik yöntemden yararlanılmış ve ortalamaları alınarak kayma direnci parametreleri belirlenmiştir.

%2-M1 deneyinde Şekil 4.9.'da gösterilen gerilme-deformasyon grafiği %2-G deneyleriyle karşılaştırıldığında ikinci aşamada dayanım kaybı olduğu görülmektedir. Kondner metodu uygulanarak kayma direnci parametreleri geleneksel deneyle

kıyaslandığında doğru sonuç vermiş olduğu düşünülebilir. Ancak birinci ve üçüncü aşamalara kıyasla ikinci aşamada gözlenen bu dayanım farkı şüphe uyandırmaktadır.

%5-M1 ve %10-M1 deneylerinde geçersiz kohezyon değerleri elde edilmiştir. Tahmini doğrusal eğrilerin oluşturulması için çok aşamalı deneylerden elde edilen veriler kullanılmaktadır. M1 deneylerinde ilk iki aşamadaki deformasyonun en az tutulduğu deneylerdir. Deformasyonun az tutulmuş olması, buradan elde edilen verilerle oluşturulan tahmini doğrusal eğrilerin doğruluğunu etkilemiştir.

%2-M2, %2-M3, %5-M2, %5-M3 deneylerinden elde edilen kayma direnci parametreleri geleneksel deneylerle kıyaslandığında uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

4.2.2.2. Eğri uydurma yöntemi ile kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi

Kayma mukavemeti parametrelerinin bulunması için numunede %20 deformasyona kadar oluşan maksimum deviatör gerilme değeri ile çizilen Mohr-Coulomb kırılma zarfından yararlanılır. Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneylerinde deneyler numunede %20 deformasyon oluşana kadar devam ettirilmiştir. Çok aşamalı deneylerin amacı gereği numunede tek bir aşamada geleneksel deneylerdeki kadar çok deformasyona izin verilmemektedir. Bu sebeple çok aşamalı deneylerden elde edilen gerilme-eksenel deformasyon grafiklerinde her bir aşamadaki eğrilerin %20 deformasyona kadar devam ettirilmesi halinde nihai deviatör gerilmelerinin değerlerinin ne olacağının belirlenebilmesi için eğri uydurma yapılmıştır. İstatistiksel yazılım kullanımıyla %20 deformasyona karşılık gelebilecek deviatör gerilmeler tahmin edilmiştir. Belirlenen deviatör gerilmeler ile çizilen kırılma zarfları, çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılmış olan tüm çok aşamalı deneylerde eğri uydurma denenerak geleneksel deneylerle kıyaslandığında en uygun eğrinin Denklem 4.1 ile olduğu belirlenmiştir.

$$y = y_0 + alnx \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de verilen iki parametrelili logaritmik denklemde y_0 ve a parametrelerinin tüm çok aşamalı deneylerin her üç aşamasında da aldığı değerler Tablo 4.6.’da verilmiştir. Burada; x : deformasyon miktarı; y : x deformasyonunda gerçekleşen gerilme miktarıdır.

Çok aşamalı deneylerde tahmini gerilme-eksenel deformasyon eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan y_0 (1) ve a (1) çok aşamalı deneyin 1. aşamasına ait; y_0 (2) ve a (2) çok aşamalı deneyin 2. aşamasına ait; y_0 (3) ve a (3) çok aşamalı deneyin 3. aşamasına ait sabitlerdir (Tablo 4.6.).

Tablo 4.6. Çok aşamalı deneylerde kullanılan y_0 ve a katsayıları

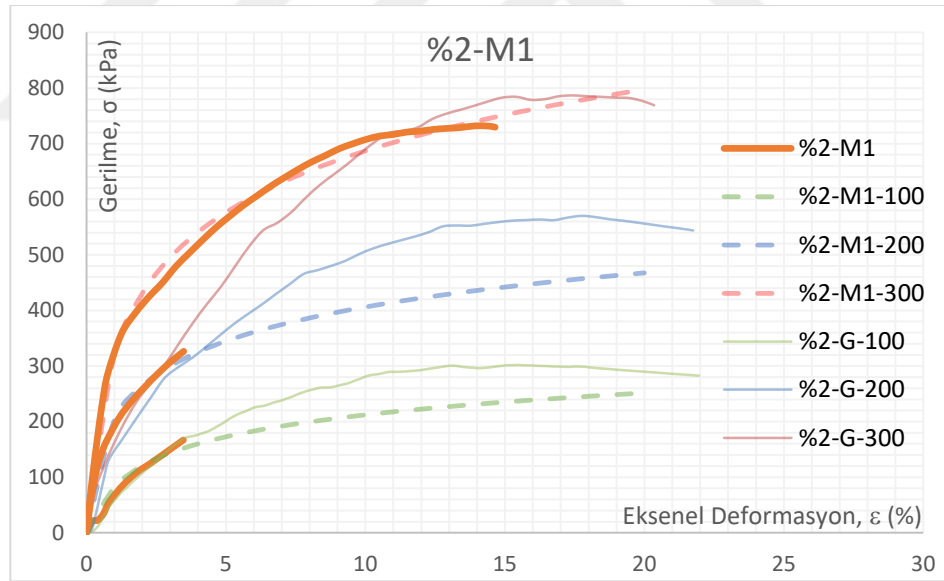
	y_0 (1)	a (1)	y_0 (2)	a (2)	y_0 (3)	a (3)
%2-M1	81.1059	56.8042	202.2882	88.4428	319.4917	159.5044
%2-M2	105.5787	64.2638	247.9948	107.032	382.9102	160.0578
%2-M3	92.3855	66.3345	254.395	115.8155	390.2968	167.4685
%2-M4	109.8787	62.1405	334.5364	75.9269	601.6317	65.3744
%2-M5	90.8275	61.0461	203.7591	66.2144	340.7456	174.9136
%5-M1	100.572	50.5085	189.0251	103.2209	323.0558	182.4143
%5-M2	89.1416	59.6127	230.9819	100.6858	362.0391	147.3833
%5-M3	98.9936	58.8042	249.4167	103.9503	373.0758	154.6343
%10-M1	109.3014	43.7537	202.3132	49.289	362.0194	135.1866

Döngüsel yükleme metoduyla yapılmış tüm çok aşamalı deneylerde her aşamada oluşmuş gerilme-eksenel deformasyon eğrileri, bu bölümde verilmiş olan eğri uydurma grafiklerinde grafiğin 0 noktasından başlatılmış olup eğrilerin bu durumuna göre %20 deformasyona kadar devam edebilecek olan yeni eğrilerin tahmini yapılmıştır. Denklem 4.1 ve Tablo 4.2.’de verilen sabitlerle oluşturulmuş gerilme-eksenel deformasyon eğrileri bu bölümde verilmiştir.

Şekil 4.17.’de verilen grafikteki lejantta %2-M1 olarak tanımlanmış eğri, %2 bentonit ile hazırlanmış numuneye uygulanan çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi deformasyon eğrisini göstermektedir. Burada %2-M1-100, %2-M1-200 ve %2-M1-300 olarak tanımlanmış eğriler, sırasıyla %2 bentonit ile hazırlanmış numuneye

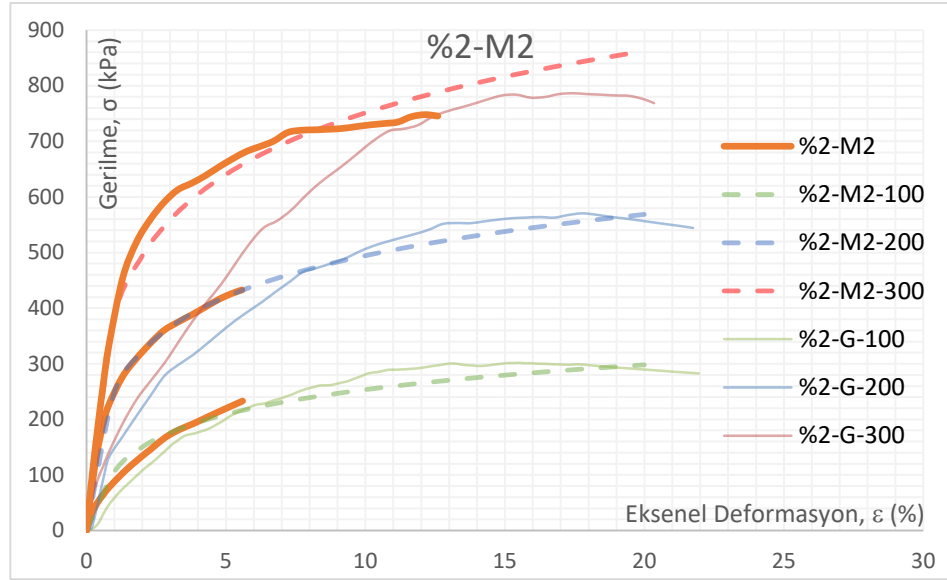
uygulanan 1 no'lu çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyinin 1. aşamasında 100 kPa, 2. aşamasında 200 kPa ve 3. aşamasında 300 kPa çevre basıncıyla gerçekleşen deformasyon eğrileri yardımıyla oluşturulmuş %20 deformasyonda gerçekleşebilecek tahmini deformasyon eğrisini göstermektedir. %2-G-100, %2-G-200 ve %2-G-300 olarak tanımlanmış eğriler ise sırasıyla geleneksel üç eksenli hücre kesme deneylerinden alınmış 100 kPa, 200 kPa ve 300 kPa çevre basıncına ait deformasyon eğrilerini temsil etmektedir. Aynı isimlendirme mantığıyla bu bölümde verilmiş olan tüm çok aşamalı gerilme-eksenel deformasyon eğrilerinde bulunan lejantlar oluşturulmuştur.

Şekil 4.19.'da verilen %2-M1 deneyi verileriyle oluşturulmuş eğri uydurma grafiklerine bakıldığında birinci ve ikinci aşamada istatistiksel programa girilen verilerin azlığı, yani ilk iki aşamada deformasyonun kısa olması, sebebiyle eğri uydurma denklemi bu eğrilerin oluşturulması için doğru kabul edilememektedir.

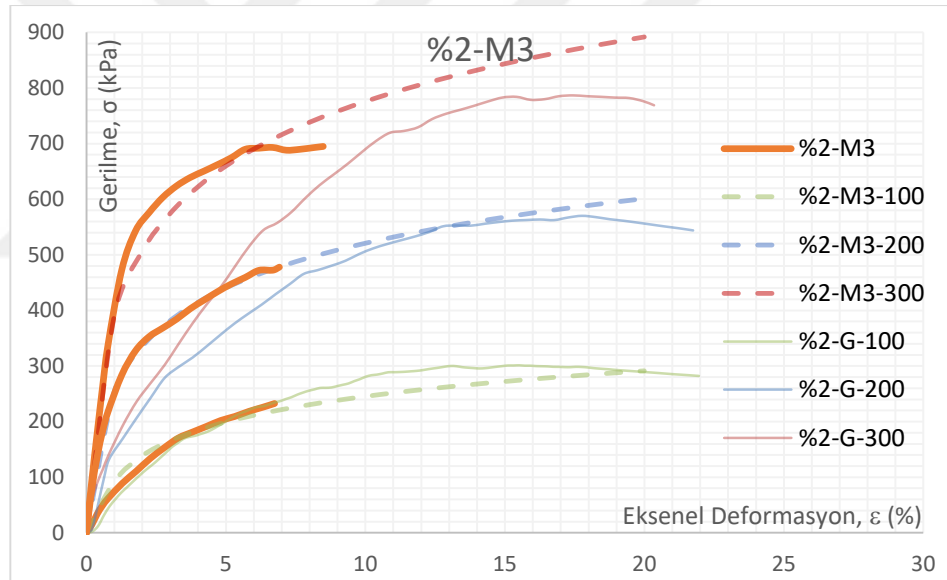


Şekil 4.19. %2-M1 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

Şekil 4.20. ve Şekil 4.21.'de verilen %2-M2 ve %2-M3 deneyleri verileriyle oluşturulmuş eğri uydurma grafiklerinde, birinci ve ikinci aşama için oluşturulan eğriler geleneksel deneylerle oldukça benzerdir.



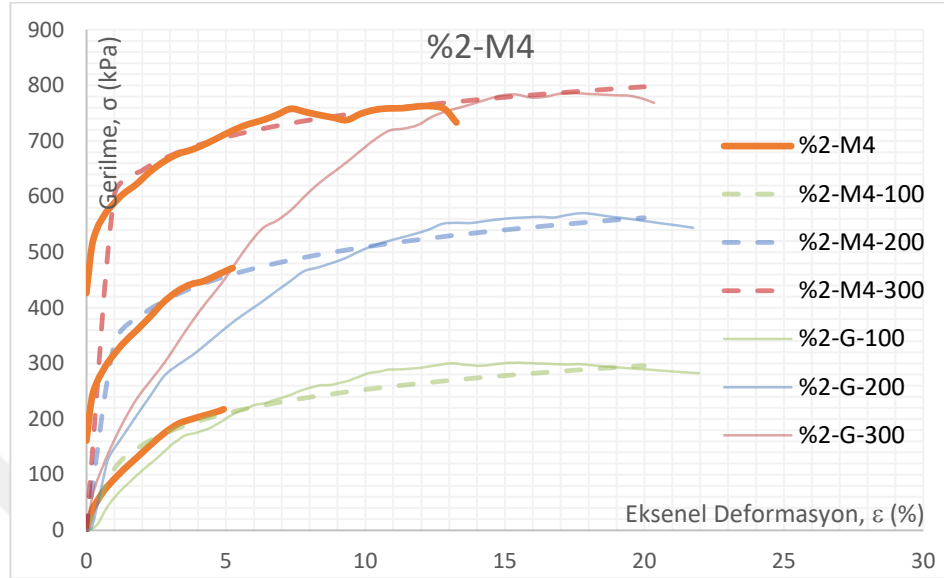
Şekil 4.20. %2-M2 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler



Şekil 4.21. %2-M3 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

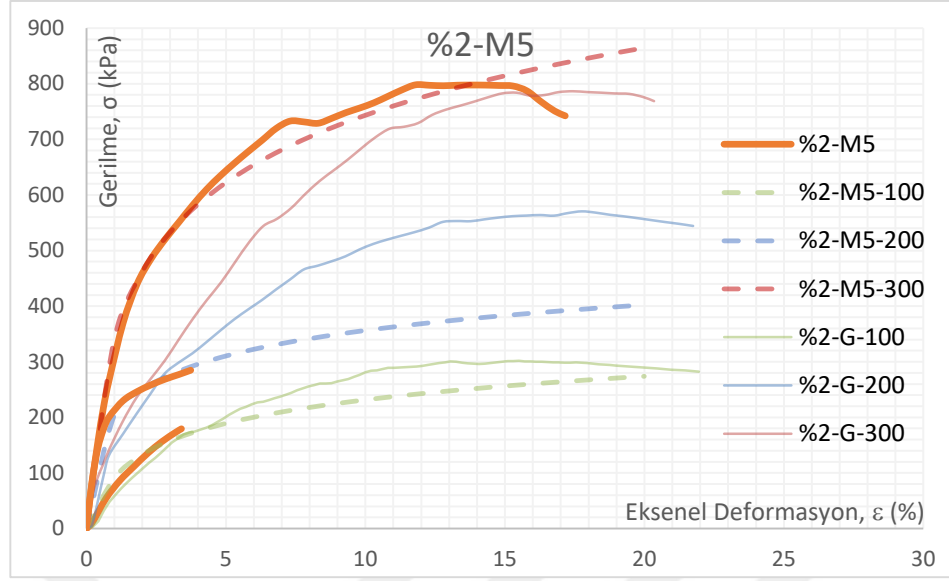
Literatürde devamlı yükleme metoduyla yürütülen çok aşamalı deneylerde yükün devam ediyor olması konsolidasyon aşamasında numuneyi deformasyona uğratacağı için tercih edilmemesi gerektiği belirtilmiştir (Ho ve Fredlund, 1982). Bununla birlikte aşamalardaki deformasyon miktarının ilk iki aşama için kısa tutulmasının numunenin deforme olmaması adına önemli olduğuna da değinilmiştir. Ancak bu çalışma kapsamında yürütülen devamlı yükleme metoduyla oluşturulmuş tek deney olan Şekil 4.22.'de verilen %2-M4 deneyi bahsedilen negatif özellikleri taşıyor olmasına rağmen,

bu çalışmadaki geleneksel deneylere en yakın eğrileri vermiştir. Bölüm 5.'te irdelenen çalışma sonuçlarında bu durumdan bahsedilecektir.



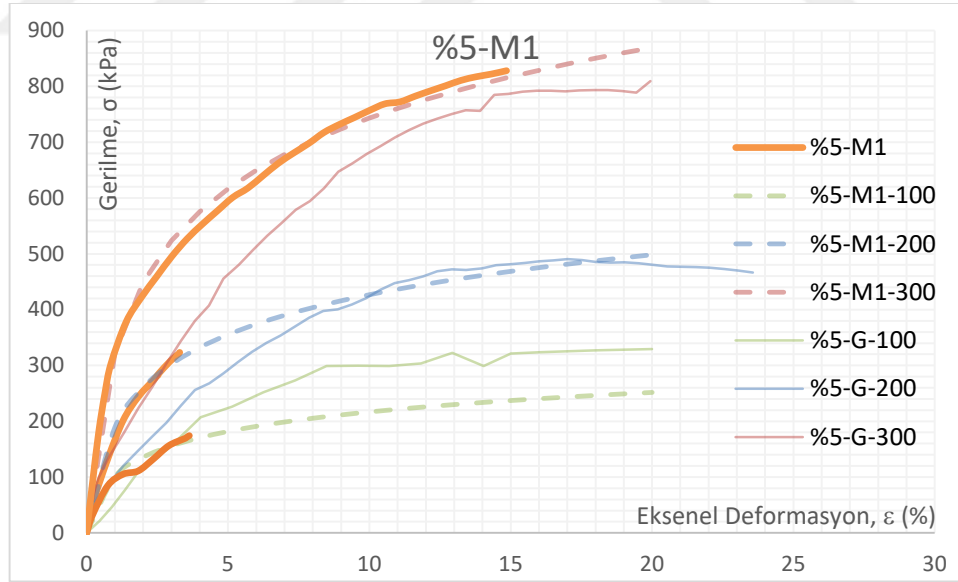
Şekil 4.22. %2-M4 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

Şekil 4.23.'te verilen %2-M5 deneyi sırasında ikinci aşamada boşluk suyu basınçlarının çok fazla artması sebebiyle 200 kPa çevre basıncı için çok düşük deviatör gerilme vermiştir. Ancak deneye devam edilip son aşama tamamlanmış, son aşamada bu hatanın etkisinin üçüncü aşamada gerilme azalışıyla gözlenmediği fark edilmiştir. Bu sebeple bu çalışmada bu deneyin sonuçlarına yer verilmiştir. Ancak birinci ve ikinci aşamada deformasyon miktarının kısa tutulduğu M1 deneylerinde de olduğu gibi eğri uydurma için veri azlığı durumu, bu deneyde de ilk iki aşamanın deformasyonlarının az tutulması sebebiyle gözlenmiştir.

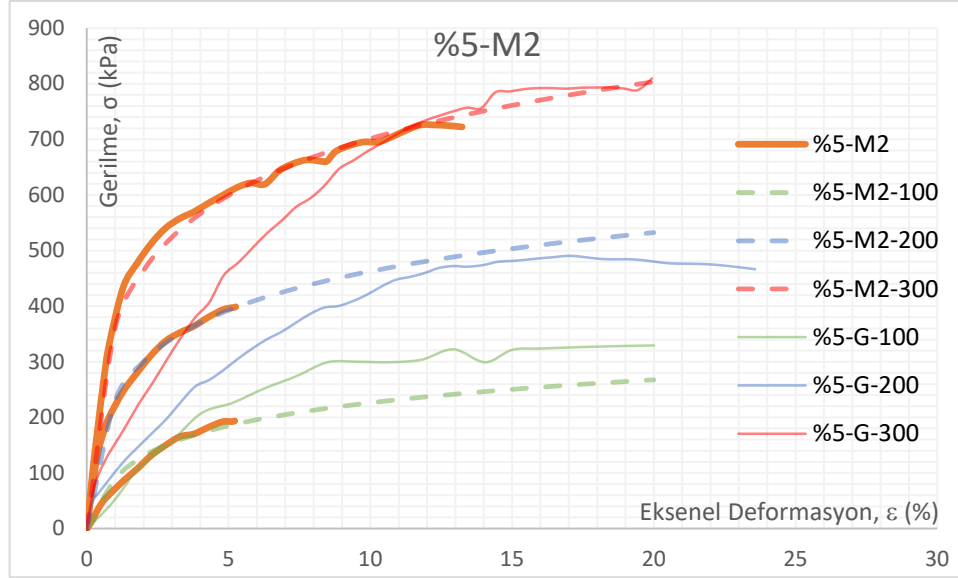


Şekil 4.23. %2-M5 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

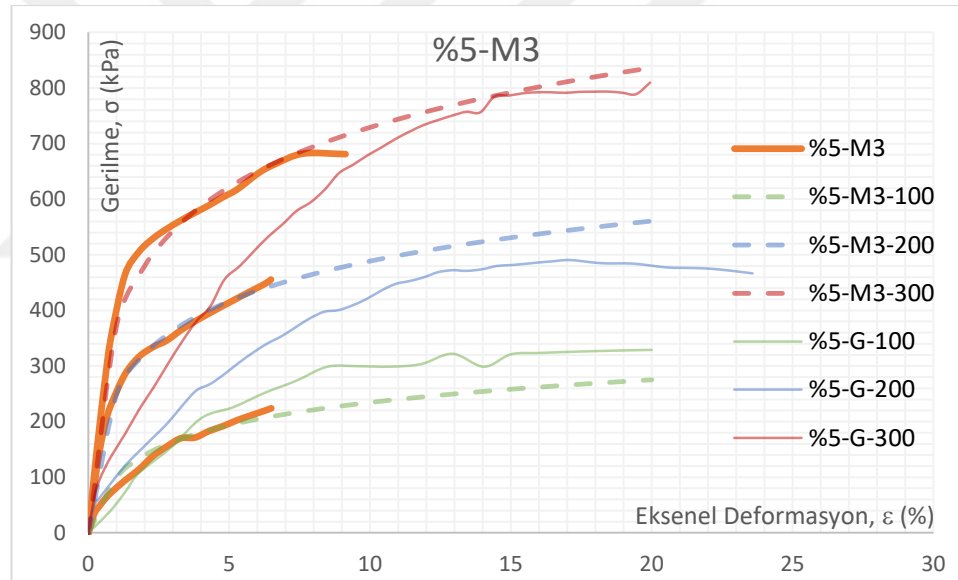
Şekil 4.24., 4.25. ve 4.26.'da %5 bentonitle hazırlanmış numunelerdeki sırasıyla M1, M2 ve M3 deneylerinin eğri uydurma yöntemiyle tahmin edilen gerilme-eksenel deformasyon grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.24. %5-M1 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

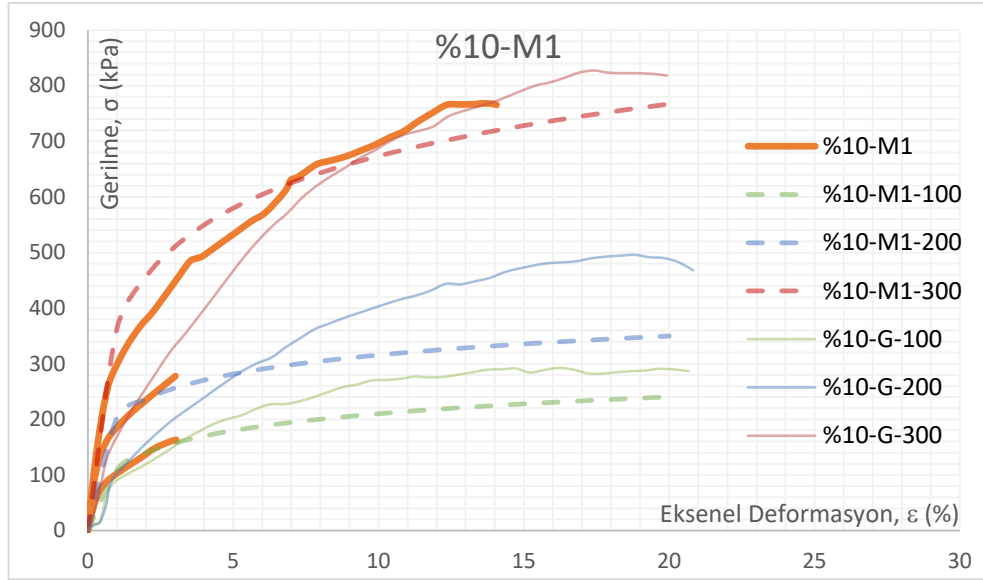


Şekil 4.25. %5-M2 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler



Şekil 4.26. %5-M3 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

Şekil 4.27.'de %10 bentonitle hazırlanmış numunedeki M1 çok aşamalı deneyinin eğri uydurma yöntemiyle tahmin edilen gerilme-eksenel deformasyon grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.27. %10-M1 deneyinde %20 deformasyondaki tahmini eğriler

Çok aşamalı deneylerde kırılmanın gerçekleştiği deviator gerilmenin belirlenmesi için eğri uydurma yönteminden yararlanılmıştır. İstatistiksel programda çok aşamalı deneylerden elde edilen veriler ile eğri uydurulmalar yapıldığında Denklem 4.1 ile oluşturulan eğrilerin, geleneksel deneylerden elde edilenlere en benzer eğriler olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple tüm eğriler için aynı denklem kullanılmış, istatistiksel programa girilen çok aşamalı deneylerdeki aşamalar sırasında kaydedilen deformasyon değerleri ve belirlenen denklem kullanılarak eğri uydurulduğunda programın verdiği Tablo 4.6.'da verilen sabitler değiştirilmeden kabul edilerek eğriler oluşturulmuştur. Bu kabul sonucunda istatistiksel programa tanıtılan verilerin artması, yani deformasyonun daha fazla olduğu çok aşamalı deneylerin kullanılması, oluşan yeni eğrilerin geleneksel deneylerden alınan eğrilerle birinci ve ikinci aşama için daha doğru sonuç verdiği görülmüştür. Birinci ve ikinci aşamaların kısa tutulduğu M1 deneylerinde, aşamalarda uygulanan eğri uydurma yöntemi, az sayıda veri girişi olması ve seçilen denklemin bu veriler ile oluşturulan eğrilerde geleneksel deneydeki gerilme izlerine yakın değerler üretmemesi sebebiyle etkili sonuçlar oluşturmamıştır.

Pagoulatos (2004) çalışmasında ilk iki aşamanın sonlandırıldığı noktalarla bir kırılma zarfı oluşturmuş, ancak bu değerleri göçmenin gerçekleşmediği değerler olduğu ve asıl yenilmenin son aşamada gerçekleştiği kabulünde bulunmuştur. Oluşturduğu kırılma zarfını aynı eğimle numunenin yenildiği son aşamadaki Mohr-Coulomb çemberine

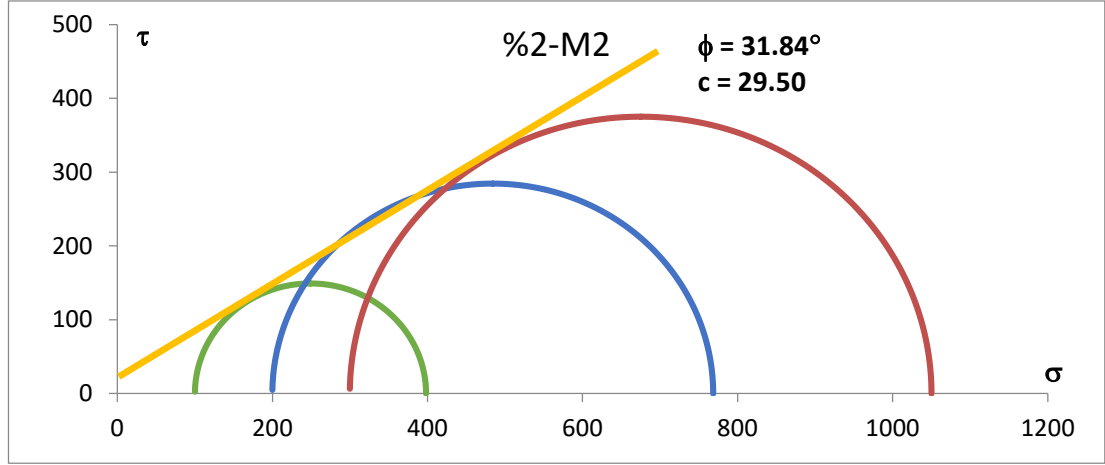
taşıyarak nihai kırılma zarfını bulmuştur. Pagoulatos'un yaptığı bu kabul kullanılarak %2-M2, %2-M3, %5-M2 ve %5-M3 deneyleri için belirlenen kayma mukavemeti parametrelerine Bölüm 4.2.2.2.'de değinilmiştir.

Çok aşamalı deneylerde eğri uydurma yöntemi kullanılarak %20 deformasyonda tahmin edilen deviatör gerilmelerle Mohr kırılma zarfları oluşturulmuş, bununla birlikte kohezyon ve kayma direnci açısı değerleri tahmin edilmiştir. Kayma direnci parametreleri bulunurken geleneksel deneylerin verildiği Bölüm 4.2.2.'de olduğu gibi analitik yöntemle sırasıyla 100 kPa-200 kPa; 200 kPa-300 kPa; 100 kPa-300 kPa karşılaştırmaları yapılarak kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınarak nihai kayma mukavemeti parametrelerine ulaşılmıştır. Elde edilen kohezyon ve kayma direnci açısı değerleri Tablo 4.7.'de verilmiştir.

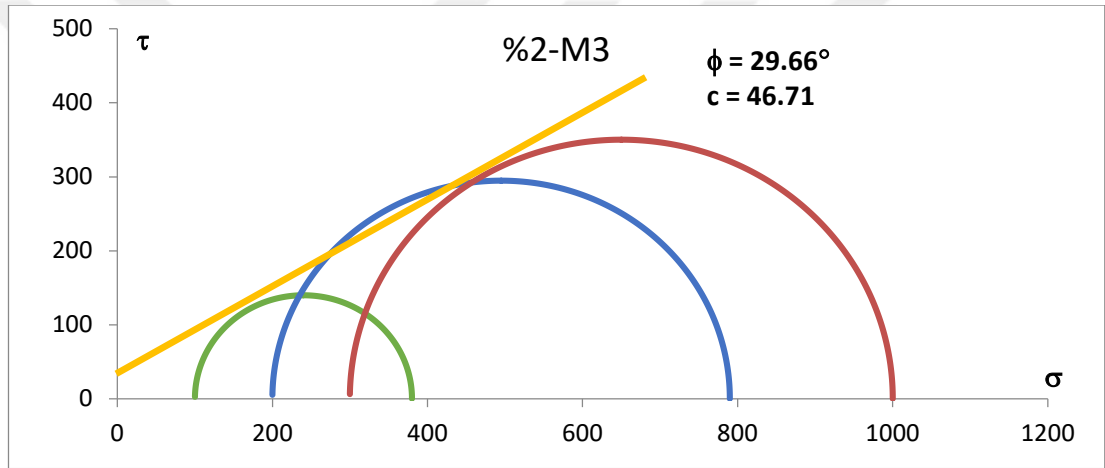
Tablo 4.7. Eğri uydurma ile elde edilen kayma direnci parametreleri

	Aşama 1	Aşama 2	Aşama 3		
	Deformasyon (%)			c (kPa)	ϕ
%2-G	20	20	20	20.98	33.17
%5-G	20	20	20	13.33	32.49
%10-G	20	20	20	0.10	34.12
%2-M1	3.02	2.73	14.65	-14.07	35.01
%2-M2	4.92	4.52	12.59	2.16	35.81
%2-M3	6.01	5.78	12.59	-0.66	36.89
%2-M4	4.92	5.25	13.26	14.94	33.78
%2-M5	2.9	2.99	17.16	-22.56	34.64
%5-M1	2.7	2.2	13.8	-22.96	37.13
%5-M2	4.71	4.36	13.23	-0.57	34.93
%5-M3	5.9	5.47	6.05	-0.51	35.72
%10-M1	2.64	2.4	14.13	-22.43	32.63

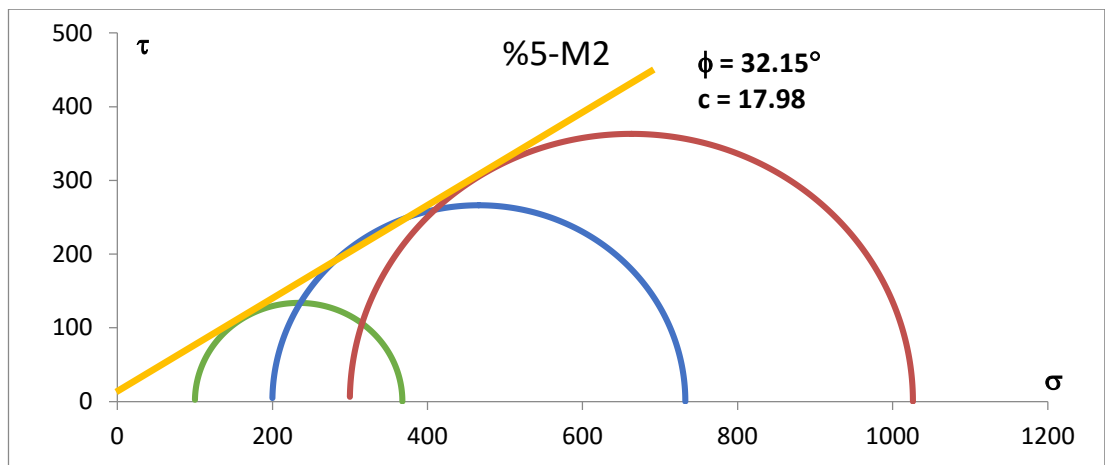
100 ve 200 kPa efektif çevre basıncı için eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan deformasyon eğrileri ile çok aşamalı deneyin son aşamasındaki maksimum gerilmenin verileriyle oluşturulan kırılma zarfları %2-M2, %2-M3, %5-M2, %5-M3 deneyleri için sırasıyla Şekil 4.28., 4.29., 4.30., 4.31.'de gösterilmiştir.



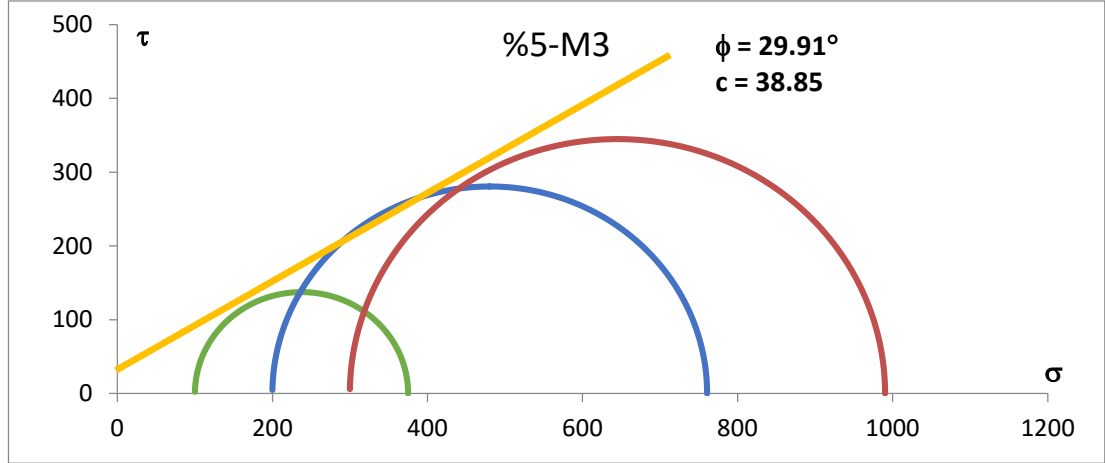
Şekil 4.28. %2-M2 deneyi için Mohr kırılma zarfı



Şekil 4.29. %2-M3 deneyi için Mohr kırılma zarfı



Şekil 4.30. %5-M2 deneyi için Mohr kırılma zarfı



Şekil 4.31. %5-M3 deneyi için Mohr kırılma zarfı

4.2.2.3. Kayma direnci parametrelerinin karşılaştırılması

Çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen verilerle oluşturulmuş tahmini gerilme-eksenel deformasyon eğrileri ile kayma mukavemeti parametrelerinin elde edilmesi için üç farklı yöntem denenmiştir. Bu çalışma kapsamında yürütülen 9 adet çok aşamalı deneyden dört tanesi olan %2 ve %5 bentonit ile hazırlanmış M2 ve M3 deneyleri için, kullanılan üç farklı göçme tahmini yönteminden elde edilen sonuçlar Tablo 4.8.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8. Farklı yöntemlerden elde edilen kayma direnci parametreleri

1		2		3		4		5		
Geleneksel Deneyler		Kondner		Eğri Uydurma		Eğri Uydurma + Multistage Max Gerilme		ORT(2:4)		
c (kPa)	ϕ	c (kPa)	ϕ	c (kPa)	ϕ	c (kPa)	ϕ	c (kPa)	ϕ	
%2-M2	20.98	33.17	12.39	32.59	2.16	35.81	29.5	31.84	20.95	32.22
%2-M3			29.85	31.36	0	36.89	46.71	29.68	38.28	30.52
%5-M2	13.33	32.49	6.65	30.52	0	34.93	17.98	32.15	12.32	31.34
%5-M3			15.04	31.73	0	35.72	38.85	29.91	26.95	30.82

Tablo 4.8.'de bu çalışma kapsamında yürütölmüş deneylerden dört tanesinin kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler ile elde edilmiş sonuçlar gösterilmiştir. 1 nolu sütunda geleneksel deneylerden, 2 nolu sütunda Kondner'in önerdiği hiperbolik lineerizasyon metodundan, 3 nolu sütunda logaritmik denklem ile eğri uydurma metodundan, 4 nolu sütunda bu çalışma kapsamında önerilmiş eğri uydurma ile çok aşamalı deneyin son aşamasından elde edilen maksimum gerilme ile oluşturulmuş tahminlerden, 5 nolu sütunda ise 2 ve 4 nolu yöntemler kullanılarak elde edilmiş değerlerin ortalaması alınarak elde edilen kayma direnci parametreleri verilmiştir. Kondner'in ve bu çalışma kapsamında önerilmiş metodun ortalaması alınarak oluşturulan değerlerin geleneksel deneylerle karşılaştırıldığında daha doğru sonuçlar verdiği görölmüştür. Bu ortalama değerler ile elde edilen kayma direnci parametrelerine bakıldığında ilk iki aşamasında deformasyon miktarı daha düşük tutulan M2 deneyleriyle oldukça uyumlu olduğu görölmüştür. M3 deneylerindeki bu ortalama değerler geleneksel değerlerle kıyaslandığında daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. M3 deneylerinde deformasyon miktarı M2 deneylerine göre daha fazla tutulduğu için numune her aşamada daha çok deforme olmuş ve gerçek değerlerinden çok daha farklı sonuçlar vermiştir.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, farklı kil oranlarındaki killi zeminler ile yeniden oluşturularak hazırlanmış silindirik numuneler üzerinde hem geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyi hem de çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyi yürütülmüş ve deneyler çeşitlendirilerek kayma mukavemeti parametrelerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Adapazarı siltine ağırlıkça %2, %5, %10 bentonit kili katılmasıyla oluşturulan kuru karışımlar suyla karıştırılarak bulamaç haline getirilmiş ve ardından 100 kPa gerilme ile konsolide edilerek üç eksenli hücre kesme deneyine tabi tutulacak deney numuneleri hazırlanmıştır. Geleneksel yöntemlerle yürütülen üç eksenli kesme deneylerinde aynı oranlarda hazırlanmış farklı numuneler 100, 200 ve 300 kPa çevre gerilmelerine maruz bırakılmışlardır. Çok aşamalı deneyler ise bir numune üzerinde aynı oranlardaki çevre gerilmeleri farklı deformasyon miktarlarında uygulanarak yürütülmüştür. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

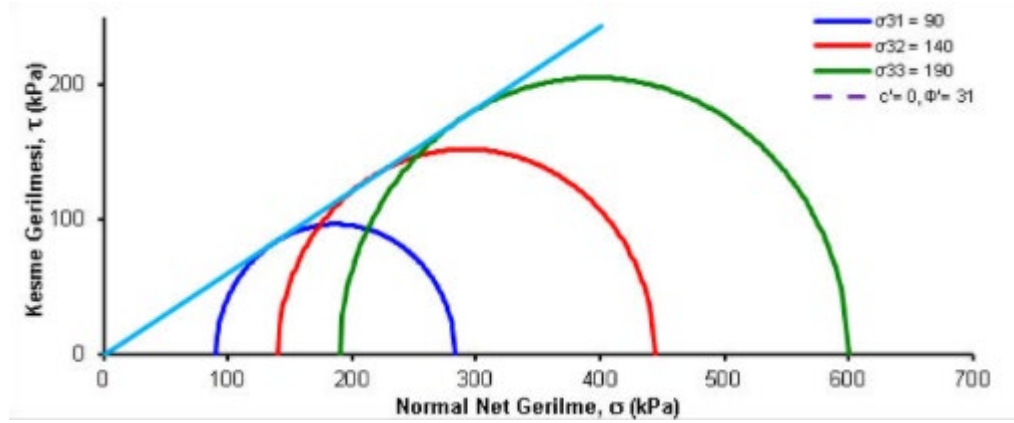
Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneyleri sırasındaki konsolidasyon aşamasından oluşturulan karekök zaman ve sıkışma eğrilerinden elde edilen parametreler ile deney hızları belirlenmiştir. %10 bentonit ile hazırlanmış numuneler için bulunan deney hızının %2 ve %5'e oranla daha düşük olduğu görülmüştür. Bölüm 4.2.1.'de değinilen literatür çalışmalarına da bakılarak deney hızı 0.005 mm/dk seçilmiştir. Ancak seçilen deney hızının %10 bentonitle hazırlanmış numunelerin deneylerinde boşluk suyu basınçlarının artmasına sebep olduğu görülmüştür. Bu sebeple %10 bentonitle hazırlanmış numunelerin deneylerinde deney hızı 0.004 mm/dk olarak uygulanmıştır. % 2 bentonitle hazırlanmış numunelerin deneylerinde deney hızı boşluk suyu

basınçlarının artmayacağı değerlere yükseltilerek denendiğinde 0.007 mm/dk hızında deneylerin yürütülebildiği görülmüştür. %5 bentonitle hazırlanan numunelerin deneylerinde ise seçilen 0.005 mm/dk deney hızı uygulanmıştır.

- Geleneksel üç eksenli hücre kesme deneylerinden elde edilen sonuçlara Bölüm 4.2.2.'de değinilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde farklı bentonit oranlarına sahip numunelerde kayma direnci açılarının yaklaşık olarak aynı olduğu söylenebilir. Kayma direnci açılarında fark oluşmamasının nedeni olarak numunelerdeki kil oranlarının çok düşük olması gösterilebilir. Elde edilen efektif kohezyon değerlerine bakılacak olursa, numune içeriğindeki kil oranının artması kohezyon değerlerinde azalmanın yaşanmasına sebep olduğu görülmektedir. Bu durumda deney tipinin drenajlı olması, numunelerin normal yüklenmiş olması ve numunelerdeki kil oranlarının çok düşük olması sebebiyle efektif kohezyona kil katkısının olmadığından bahsedilebilir. Drenajlı deneylerde numuneden çıkan su daneler arasındaki sürtünmelerin artmasıyla beraber kilin kohezyon etkisinin oluşmasını engellemektedir. Literatürde killeri üzerindeki drenajlı deneyler incelendiğinde, çimentolanmamış killerin drenajlı deneylerinde kohezyon değerinin pratik amaçlar için 0 kabul edildiği belirtilmektedir (Das, 2008). Bu durum geoteknik problemlerde dizayn durumunda güvenli tarafta kalınarak hesap yapılmasına olanak tanıyacaktır. Bununla birlikte CD deneylerinde efektif kohezyonun oluşmayacağı kabulüyle tek bir CD deneyinin yapılmasının kayma direnci açısının bulunmasında yeterli olacağına değinilmiştir.

Bu tez çalışmasında elde edilen 0 efektif kohezyon değeri bulgusu Öntürk (2021) tarafından Adapazarı kili üzerinde yapılmış çok aşamalı CD deneyinde efektif kohezyon değerinin oluşmadığı bulgusuyla uyum içindedir.



Şekil 5.1. Adapazarı kilinde çok aşamalı deneylerden elde edilmiş efektif kayma direnci parametreleri (Öntürk, 2021)

- Çok aşamalı üç eksenli basınç deneyleri için gerilme-eksenel deformasyon grafiklerinin verildiği Bölüm 4.2.3.'teki grafikler incelendiğinde, birinci ve ikinci aşamalardaki deformasyon miktarının daha kısa tutulduğu 1 nolu M1 deneylerinde nihai dayanıma ulaşılırken numunenin aldığı gerilmenin, aşamalardaki deformasyonun daha fazla tutulduğu M2 ve M3 deneylerine kıyasla daha fazla olduğu söylenebilir. Bu durum çok aşamalı deneyler sırasında birinci ve ikinci deneylerdeki deformasyon miktarının artmasıyla numunede plastik deformasyonların başladığını göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında devamlı yükleme metoduyla denenmiş tek deney olan %2-M4 için elde edilen gerilme-eksenel deformasyon grafiğine bakıldığında, yürütülen döngüsel yükleme metoduyla uygulanmış diğer deneylere göre geleneksel deneylerle en uyumlu sonuçları verdiği görülmüştür. Literatürdeki döngüsel yükleme metoduyla yürütülen çok aşamalı deneylerin devamlı yükleme metoduna nazaran daha fazla denenmesinin sebebi, devamlı yükleme metodunda numune üzerindeki gerilmenin konsolidasyon sürecinde de devam ederek numunede dayanım kaybı yaratması kaynaklıdır. Normal konsolide killerin drenajlı çok aşamalı deneylerinde daha fazla devamlı yükleme metoduyla uygulanmış çok aşamalı üç eksenli hücre kesme deneyleri denenerek yeni bir çalışma kapsamında bu durum açıklanabilir.

Bu çalışma kapsamında yürütölmüş %2-M5 deneyi hatalı bir deneydir. Deneyin ikinci kesme aşamasında numunede aşırı boşluk suyu basınçlarının gelişmesi deneyin hatalı olmasına neden olmuştur. Ancak elde edilen gerilme-eksenel deformasyon grafiğine bakılacak olursa hatalı olan ikinci aşamanın ardından gelen üçüncü aşamaya ait eğrinin geleneksel deneyle yakın sonuçlar verdiği görölebilir. Bu durumun deneyin ilk iki aşamasında deformasyon miktarının düşük tutulması ve bu sayede plastik deformasyonların henüz gerçekleşmemesinden kaynaklı olabileceği düşünölmüştür. Yine de bu durum bu çalışma kapsamında yürütölen deneylerden farklılık gösterdiği ve tahmin edilenin dışında sonuç verdiği için tek bir deneyle karşılaştırmalı olarak yorumlamak doğru olmayacaktır.

- Çok aşamalı deneylerde göçme anındaki deviatör gerilmenin tahmin edilebilmesi için Shidharan ve Rao (1972) Kondner (1963)'in gerilme-deformasyon arasındaki hiperbolik ilişkisini kullanmışlardır. Pagoulatos (2004) ise ilk iki aşamanın sonlandığı noktalardaki gerilme değeri ile son aşamadaki asıl yenilmenin gerçekleştiği gerilme değeriinden yararlanmıştır. Bu çalışma kapsamında eğri uydurma yöntemi denenerek Bölüm 4.2.2.2'de tahmini gerilme-eksenel deformasyon grafiklerine yer verilmiştir. M1 deneylerinin birinci ve ikinci aşamalarında tahmin edilen eğrilerin geleneksel deneylerle uyuşmuyor oluşu, eğri uydurma ile tahmin edilecek eğri için deformasyon gerçekleştiği sırada alınan verinin eğri uydurulması için yetersiz olduğundan kaynaklanmaktadır. Bu deformasyonun kısa tutulduğu anlardaki az veri, iki parametrelili logaritmik denklemlle oluşturulan tahminin eğrilerin geleneksel deneylerden farklı olmasına sebep olmaktadır. Ancak iki parametrelili logaritmik denklem ile belirlenen eğriler M2 ve M3 deneylerinin ilk iki aşaması için umut verici sonuçlar vermiştir. M2 ve M3 deneylerinde ilk iki aşamada deformasyon miktarlarının uzun tutulduğu, tahmini eğri oluşturmak için yeterli verinin elde edilebilmesini sağlamıştır. Eğri uydurma yönteminde karşılaşılan veri yetersizliği sorunu Kondner'in önerdiği lineerizasyon ile tahminde de karşılaşılmış ve Kondner ile elde edilen kayma direnci parametrelerine Tablo 4.7.'de yer verilmiştir.

- M2 ve M3 deneylerinde eğri uydurma yöntemi ve Kondner yöntemi ile tahminlerin yapılması ile elde edilen sonuçların geleneksel yöntemlere daha yakın olduğu görülmüştür. Bu sebeple %2-M2, %2-M3, %5-M2, %5-M3 deneylerinde kayma direnci parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan farklı yöntemlerden elde edilen sonuçlar Bölüm 4.2.2.3.'te karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen eğri uydurma metoduyla elde edilen sonuçlar, çok aşamalı deneylerin son aşamasında numunenin aldığı maksimum gerilmeden farklı deviatör gerilme tahminlerinde bulunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda olduğu gibi son aşamada okunan maksimum gerilme değeri üçüncü Mohr dairesinin çizilmesinde kullanılan deviatör gerilme olarak seçilmiştir. İlk iki aşama için eğri uydurma yöntemiyle %20 deformasyondan elde edilen gerilmeler ile son aşama nihai çok aşamalı maksimum gerilmesi kullanılacak deviatör gerilmeler olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında önerilen bu yöntemle elde edilen kayma direnci parametreleri Tablo 4.8.'de 4 sütununda verilmiştir. Aynı tablonun 2 sütununda da Kondner yöntemi ile elde edilen parametreler yer almaktadır. Kondner yöntemi ile elde edilen parametreler geleneksel deneylerden elde edilen değerlerden az, bu çalışma kapsamında önerilen parametreler de geleneksel değerlerden elde edilen değerlerden fazla olduğu için bu iki yöntemin ortalama sonuçları denenmiş ve ortalama parametrelere aynı tablonun 5 sütununda yer verilmiştir. Yöntemlerden elde edilen kayma direnci parametrelerinin geleneksel deneylerden elde edilen kayma direnci parametrelerine yüzde olarak yakınlıkları Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı yöntemlerden ve geleneksel deneylerden elde edilen kayma direnci parametrelerinin yüzde cinsinden yakınlığı

	Kondner		Önerilen Yöntem		Ortalama Değerler	
	c (kPa)	ϕ	c (kPa)	ϕ	c (kPa)	ϕ
%2-M2	-41	-2	41	-4	0	-3
%2-M3	42	-5	123	-11	82	-8
%5-M2	-50	-6	35	-1	-8	-4
%5-M3	13	-2	191	-8	102	-5

Tablo 5.1. incelendiğinde kayma direnci açıları için elde edilen değerlerde birbirine yakınlık söz konusu olmuştur. Ancak kohezyon değerleri için aynı durumun söz konusu olmadığı söylenebilir. Bu amaçla Kondner ve bu çalışma kapsamında önerilen yöntemlerin ortalaması alınarak sonuç alınmak istenmiştir. Ortalama değerlere bakıldığında, çok aşamalı deneylerin ilk iki aşamasında deformasyonun M3 deneylerine kıyasla daha az olduğu M2 deneyleri için farklılıkların daha az olduğunu söylemek mümkündür. İlk iki aşamasında deformasyonun daha fazla olduğu M3 deneylerinde ortalama yöntemde kohezyon değerlerinde %2-M3 deneyi için %82, %5-M3 deneyi için ise %102 farklılık olduğu görülmektedir. Bu durum deformasyonun daha fazla olmasıyla birlikte üçüncü aşamadan elde edilen maksimum gerilmenin deviatör gerilme olarak kabul edilmesi yönteminde geleneksel deneylere kıyasla daha düşük değerde olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla üçüncü aşama için kabul edilen deviatör gerilmenin düşük oluşu kohezyon değerinin fazla değerde olmasıyla sonuçlanmaktadır. Ancak ilk iki aşamasında deformasyon miktarının daha az tutulduğu M2 deneylere bakıldığında, ortalama değerlerden elde edilen kohezyon değerlerinin geleneksel deneylerden elde edilen değerlerden %2-M2 için %0, %5-M2 deneyi için %-8 farklılık oluşturduğu görülmektedir. Geleneksel deneylerdeki kohezyon değerlerine olan bu yakınlık umut verici olmaktadır.

Sonuç olarak normal konsolide killerde yürütülen çok aşamalı konsolidasyonlu drenajlı deneylerde bu çalışma kapsamında ortaya konan metot farklı zeminlerde de denenerek geliştirilebilme imkanına sahiptir. Literatürde olduğu gibi bu çalışmada

da çok aşamalı deneyin uygulandığı zeminlerin, geoteknik bilgisine hakim nitelikli mühendislerce yorumlanmasına ihtiyaç duyduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

- ASTM. 2015. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08 & 04.09. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Banerjee, A., Puppala, A. J., & Hoyos, L. R. 2020. Suction-controlled multistage triaxial testing on clayey silty soil. *Engineering Geology*, 265, 105409.
- Bishop, a. W., d. J. Henkel. 1957. The measurement of soil properties in the triaxial test. Arnold, London, p. 1-32.
- Budhu, M. 2011. Soil Mechanics and Foundations. John Wiley & Sons, 2006, pp 261-280.
- Bol, E., Sert, S. ve Özocak, A. 2021. Zemin Mekaniği Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- Craig, R.F. 2004. Soil Mechanics. Seventh Edition, English Language Book Society / Van Nostrand Reinhold, London, pp 91-135.
- Crawford, A., and Wylie, D. 1987. A modified multiple failure state triaxial testing method. 28th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Taylor & Francis, London, 133–140.
- Das, B.M., Sivakugan, N., 2008. Introduction to Geotechnical Engineering. 2nd ed., Cengage Learning, pg. 165
- De Beer, E. 1950. The Cell Test. *Geotechnique* 2: 162-172.
- Gräsle, W. 2011. Multistep triaxial strength tests: Investigating strength parameters and pore pressure effects on Opalinus Clay. *Physics and Chemistry of the Earth. Parts A/B/C*, 36(17-18), 1898-1904.
- Gullic, R.C., 1970. Multi-stage shear testing of a cohesionless soil. M.S. thesis, Uni. Of Missouri, Rolla.
- Head, K. H., Epps, R. J. 2014. Manual of Soil Laboratory Testing. Volume III: Effective Stress Tests. Whittles, Caithness.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. 2011. An introduction to geotechnical engineering. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson.

- Hormdee, D., Kaikeerati, N. and Angsuwotai, P. 2012. Evaluation on the Results of Multistage Shear Test Int Jl GEOMATE, 2 (1), 140-143.
- Kenney, T. C., Watson, G. H. 1961. Multistage Triaxial Test for Determining c and ϕ of Saturated Soils. Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, July 17–22, 1961, Vol. 1.
- Khosravi, A., Alsherif, N., Lynch, C., McCartney, J. 2012. Multistage triaxial testing to estimate effective stress relationships for unsaturated compacted soils. Geotechnical Testing Journal, 35(1), 128-134.
- Kondner, R. L. 1963. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division Vol. 89, p. 115-143.
- Lumb, P. 1964. Multi-Stage Triaxial Test On Undisturbed Soils, Civil Engineering and Public Works Review, May, 19 4, pp. 91-595.
- Önalp, A. 2013. Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Pagoulatos, A. 2004. Evaluation of multistage triaxial testing on Berea sandstone. M.S. thesis, Univ. of Oklahoma, Norman, OK.
- Shahin, M., Cargeeg, A. 2011. Experimental Investigation into Multistage versus Conventional Triaxial Compression Tests for a c - ϕ Soil. Applied Mechanics and Materials. Vol. 90-93.
- Sharma, M. S., Baxter, C. D., Moran, K., Vaziri, H., & Narayanasamy, R. (2011). Strength of weakly cemented sands from drained multistage triaxial tests. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 137(12), 1202-1210.
- Skempton, A. W., 1985. Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory, Geotechnique, Vol.35, No.1, 3-18.
- Sridharan, A. M., and S. N. Rao. 1972. New approach to multistage triaxial test. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division 98: 1279-1286.
- Taheri, A., Sasaki, Y., Tatsuoka, F., Watanabe, K., 2012. Strength and deformation characteristics of cement-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression. Soils Found. 52 (1), 126–145.
- Tan, A.O. 2013. Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul, s 123-144.