



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



DOKTORA TEZİ

**YUMUŞAK KİLDE ZAMANA BAĞLI DAVRANIŞIN
MİKROMEKANİK OLARAK MODELLENMESİ**

İbrahim YİĞİT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Programı

Danışman

Prof.Dr. S.Feyza ÇİNİCİOĞLU

Mart, 2014

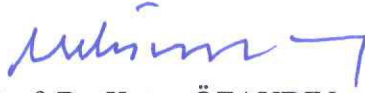
İSTANBUL

Bu çalışma 03/03/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:



Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



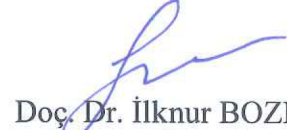
Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



Prof. Dr. Mehmet BERİLGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi



Doç. Dr. İlknur BOZBEY
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliđinin 4465, 8983, 11802 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora sürecinde karşılaştığım zorlukları aşmam konusunda;

Gerek bilimsel gerekse kişisel destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr.S.Feyza ÇİNİCİOĞLU'na,

Desteklerinden dolayı Doç.Dr.İlknur BOZBEY, Doç.Dr. Sadık ÖZTOPRAK, Yrd. Doç.Dr. Kubilay KELEŞOĞLU ve Dr. Koray GÜRKAN'a

Dostlarım Yrd.Doç.Dr. Serkan KARAKIŞ, Dr. Cihan ÖSER ve Hüseyin ÇELİK'e

Hep yanımda olan annem, babam ve kardeşlerime,

Sonsuz teşekkür ederim.

Tezimi eşim Demet ve oğlum Kağan'a ithaf ediyorum.

Mart, 2014

İbrahim YİĞİT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. ZAMANA BAĞLI ZEMİN DAVRANIŞININ LABORATUAR ORTAMINDA İNCELENMESİ.....	4
2.1.1. Deformasyon Hızı	4
2.1.1.1. Deformasyon Hızı Kontrollü Bir Boyutlu Konsolidasyon.....	4
2.1.1.2. Deformasyon Hızı Kontrollü Drenajsız Üç Eksenli Kesme	9
2.1.2. Krip Deneyleri İle Zamana Bağlı Davranışın İncelenmesi.....	14
2.1.3. Gerilme Gevşemesi Deneyleri İle Zamana Bağlı Davranışın İncelenmesi....	17
2.2. ZEMİN MİKRO DOKUSUNUN ZAMANA BAĞLI TAKİBİ.....	18
2.2.1. Elektrik İletkenliği Yöntemi İle Mikro Dokunun Takibi.....	23
2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri Kullanılarak Mikro Dokunun Takibi	29
2.3. ZAMANA BAĞLI MALZEME DAVRANIŞ MODELİ.....	39
2.3.1. Zamana Bağlı Davranışı Tanımlamak İçin Viskoplastik Bünye Modelleri...	40
2.3.2. Elastik-Visko-Plastik Model	40
2.3.2.1. Ani Zaman Çizgisi	41
2.3.2.2. Zaman Çizgileri.....	42
2.3.2.3. Krip Deformasyonu	43
2.3.2.4. İzotropik Gerilme Durumu İçin Genel Bünye Denklemi	43
2.3.2.5. Modelin 3 Boyutlu Formülasyonu.....	44
2.3.2.6. Elastik-Visko-Plastik Model (Anizotropik).....	47

2.3.2.7. Elastik Davranış	48
2.3.2.8. Akma Eğrisi	49
2.3.2.9. Akma Kuralı	50
2.3.2.10. Pekleşme Kuralı	50
3. MALZEME VE YÖNTEM	53
3.1 ZAMANA BAĞLI KİL DAVRANIŞIN 1 BOYUTLU YÜKLEME ALTINDA İNCELENMESİ	53
3.1.1. Ödometre Hücresinde Sabit Yük Artımı ve Deformasyon Hızı Kontrollü Konsolidasyon Deneyleri	53
3.1.2. Büyük Konsolidasyon Hücrelerinde Sabit Yük Artımı ve Deformasyon Hızı Kontrollü Konsolidasyon Deneyleri.....	59
3.2. ELEKTRİK DİRENCİ ÖLÇÜMÜ	63
3.3. FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLE DEFORMASYONLARIN TESPİTİ	65
3.4. ESEM GÖRÜNTÜLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMİ	67
3.5. ESEM GÖRÜNTÜLERİNİN GÖRÜNTÜ ANALİZİ	70
4. BULGULAR	71
4.1. ÖDOMETRE DENEYLERİ.....	71
4.1.1. ÖDOMETRE DENEYLERİNDE ESEM GÖRÜNTÜLERİNİN TÜM KONSOLİDASYON SÜRECİNDEKİ DAVRANIŞI YORUMLAMAK İÇİN KULLANILMASI.....	72
4.1.2. ÖDOMETRE DENEYLERİNDE ESEM GÖRÜNTÜLERİNİN İKİNCİL KONSOLİDASYON SÜRECİNDEKİ DAVRANIŞI YORUMLAMAK İÇİN KULLANILMASI.....	85
4.1.2.1. Navaro Alonso Modelinin Kullanılması.....	85
4.1.2.2. Doğrusal Olmayan Analitik Krip Fonksiyonunun Kullanılması.....	95
4.2. KÜÇÜK BOYUTLU NUMUNELERLE YAPILAN CRS DENEYLERİ	99
4.3. BÜYÜK BOYUTLU NUMUNELERLE YAPILAN CRS DENEYLERİ	106
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	115
KAYNAKLAR	122
EKLER.....	130
EK 1. Mathematica paket programında yazılan ImageJ programı işlenen ESEM görüntülerinin gronülometrik dağılımı programı.	130
EK 2: Elektrik direnci ölçümü için LabView programında yazılan kod.	131
ÖZGEÇMİŞ.....	132

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: CRS deney aleti (Wissa vd. 1971).	5
Şekil 2.2: Batiscan kili CRS ödometre deney sonuçları (Leroueil vd. 1985).	6
Şekil 2.3: Batiscan kilinde: a) CRS deneylerinde elde edilen, normalleştirilmiş efektif gerilme – birim boy deformasyon grafiği, b) önkonsolidasyon basıncının deformasyon hızı ile değişimi (Leroueil vd. 1985).	7
Şekil 2.4: Metastabilitenin, deformasyon hızına bağlı önkonsolidasyon basıncına etkisi (Soga, K., 1994).	8
Şekil 2.5: Deformasyon hızının üç eksenli basınç deneyinden ölçülen drenajsız kayma dayanımına etkisi (Kulhawy ve Mayne 1990).	10
Şekil 2.6: Kademeli deformasyon hızı kontrollü ve gerilme gevşemesi yöntemleri ile gerçekleştirilen drenajsız üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme deformasyon eğrileri (Graham vd. 1983).	11
Şekil 2.7: Normal ve az aşırı konsolide killerde metastabilitenin deformasyon hızına bağlı drenajsız kayma dayanımına etkisi (Soga, K., 1994).	13
Şekil 2.8: Drenajsız krip durumunda krip deformasyon hızı ve krip zamanı arasındaki tipik ilişki (Zhu, J.G., 1999).	15
Şekil 2.9: Bir boyutlu deney şartlarında gerilme gevşemesi sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (Yoshikuni vd. 1994).	18
Şekil 2.10: Kil süpansiyonundaki kil partiküllerinin ilişkisi; a) Dağınık ve ayrık, b) Topaklanmış fakat ayrık (yüzey-yüzey teması, paralel veya yönlendirilmiş topaklanma), c) Kenar-yüzey temaslı yumaklaşmış fakat dağınık, d) Kenar-kenar temaslı yumaklaşmış fakat dağınık, e) Kenar-yüzey temaslı yumaklaşmış ve topaklanmış, f) Kenar-kenar temaslı yumaklaşmış ve topaklanmış, g) Kenar-yüzey ve kenar-kenar temaslı yumaklaşmış ve topaklanmış (van Olphen, 1977).	19
Şekil 2.11: Efektif konsolidasyon basıncı altında metastabil dokunun boşluk oranına etkisi (Soga, K., 1994).	20
Şekil 2.12: Yumaklanmış ve dağınıklaşmış dokunun şematik gösterimi (Soga, K., 1994).	21
Şekil 2.13: Kil numunede dikey ve yatay elektrik iletkenliğinin şematik gösterimi (Anandarajah ve Kuganenthira 1995).	24
Şekil 2.14: Üç eksenli deneyinde elektriksel anizotropinin ölçülmesi için 4 elektrotlu düzenek (Anandarajah ve Kuganenthira 1995, Kuganenthira vd. 1996).	25

Şekil 2.15: Üç eksenli deneyinde elektriksel iletkenlikle anizotropinin ölçümü kalibrasyonu. ..	28
Şekil 2.16: Kaolin numunesinden alınan yatay kesit SEM mikrografı (Anandarajah vd. 1996).....	30
Şekil 2.17: Koyuluğun topografik görüntüsü (Anandarajah vd. 1996).	31
Şekil 2.18: Koyuluk konturları (Anandarajah vd. 1996).....	31
Şekil 2.19: 50 kPa konsolidasyon basıncı altında bir boyutlu konsolidasyon uygulanmış kaolin kilinin SEM mikrografları; a) yatay kesit, b) düşey kesit (Kuganenthira vd. 1996).....	32
Şekil 2.20: SEM mikrograflarından elde edilen partikül yönelme histogramları: a) 50 kPa konsolidasyon basıncında bir boyutlu konsolide edilmiş numuneden alınan yatay kesit, b) 50 kPa konsolidasyon basıncında bir boyutlu konsolide edilmiş numuneden alınan düşey kesit, c) 200 kPa konsolidasyon basıncında izotropik olarak konsolide edilmiş numuneden alınan düşey kesit, d) Üç eksenli kesme deneyinde numune göçtükten sonra alınan düşey kesit (Kuganenthira vd. 1996).....	33
Şekil 2.21: Görüntü işleme süreci: a) Killi zeminin SEM mikrografı, b) İnceltme süreci, c) İnceltme sürecinin son hali, d) elde edilen çizgi haritasının SEM mikrografı üzerine yanıtılmış hali (Martinez-Nistal vd. 1999).	34
Şekil 2.22: Pleistocene jeolojik oluşumlu Pappadai kilinin ödometre deneyi sonunda a) SEM mikrografları, b) Görüntü işleme ile inceltilmiş görüntü (Martinez-Nistal vd. 1999).....	37
Şekil 2.23: Yönlendirme histogramı (Martinez-Nistal vd. 1999).	37
Şekil 2.24: Pisa kulesi ve temel zemini kesiti (Martinez-Nistal vd. 1999).....	38
Şekil 2.25: Pisa kulesi temel zeminindeki kil tabakalarının SEM mikrografları ve görüntü işleme süreci sonunda elde edilen anizotropi dereceleri (Martinez-Nistal vd. 1999).....	38
Şekil 2.26: Birincil ve ikincil konsolidasyon, ani ve gecikmiş sıkışmanın şematik gösterimi (Zhu, J.G., 1999).....	40
Şekil 2.27: İzotropik gerilme koşullarında ani referans ve eşdeğer zaman çizgilerinin gösterimi (Zhu, J.G., 1999).....	41
Şekil 2.28: S-CLAY1 modeli akma yüzeyi (Wheeler vd. 2003).	50
Şekil 3.1: Konsolidasyon hücresi tabanında boşluk suyu basıncı ölçümü için yapılan değişiklik.	55
Şekil 3.2: Konsolidasyon hücresi tabanındaki yuvaya poroz taş yerleştirilmiş hali.	56
Şekil 3.3: Konsolidasyon hücresi kapağının üst yüzü.	56
Şekil 3.4: Konsolidasyon hücresi kapağının alt yüzü.	57
Şekil 3.5: Ödometre yükleme kolunda yapılan değişiklik sonucu oluşturulan piston.	57
Şekil 3.6: Ödometre üst başlığında açılan delikler.	58

Şekil 3.7: Konsolidasyon aletinde alt poroz, taş numune, üst poroz taş ve üst başlığın yerleştirilmiş hali.	58
Şekil 3.8: Konsolidasyon hücresinde, kapak ve yükleme kolunun yerleştirilmiş hali.....	59
Şekil 3.9: Büyük konsolidasyon deneyi akrilik hücre ve Boru bağlantı rekoruna poroz taş yapıştırılmış hali.	60
Şekil 3.10: Büyük konsolidasyon hücresi kapağı.....	60
Şekil 3.11: Büyük konsolidasyon hücresinde kullanılan piston ve Büyük konsolidasyon hücresi.....	61
Şekil 3.12: Poroz taş imalatında kullanılan kum ve epoksi yapıştırıcı.	62
Şekil 3.13: Poroz taş kalıbına dökülen epoksi yapıştırıcı kum karışımı.	62
Şekil 3.14: Kalıp içersinde imal edilen poroz taş.	62
Şekil 3.15: Polyüratan file kaplanmış poroz taş.	62
Şekil 3.16: Kompaksiyon moldunda elektrik iletkenliği ölçümü (Abu-Hassanein vd. 1996).	63
Şekil 3.17: Büyük konsolidasyon hücresinde elektrik direnci ölçümü.	64
Şekil 3.18: Büyük konsolidasyon hücresinde elektrik direnci ölçümünde akımı yönlendiren anahtar düzeneği.	64
Şekil 3.19: NI6024E DAQ kartı ve giriş çıkış bağlantı kartı.	64
Şekil 3.20: Üç eksenli deneyinde deformasyonların fotoğrafla takibi (Gachet vd. 2006).	66
Şekil 3.21: Büyük konsolidasyon hücrelerinde düşey deformasyonların fotogrametrik yöntemle takibi için oluşturulan sistem.	66
Şekil 3.22: Flokül bentonit, a) hava kurusu, b) sıvı azot içinde dondurularak süblimleşmeyle kurutulmuş, c) sıvı azot içinde soğutulmuş feron içinde dondurulmuş, hallerinin SEM fotoğrafları Gillot (1976).	68
Şekil 3.23: a) Sıvı azot içinde propan gazının soğutularak sıvı halde propan eelde edilmesine olanak sağlayan düzenek, b) Kaolin numunesinin sıvı propan içinde dondurulması.	69
Şekil 3.24: Dondurulan kaolin numunelerinin süblimleşme yöntemiyle kurutulmasında kullanılan liyafilizatör.....	69
Şekil 3.25: Süblimleşme yöntemiyle kurutulurken kurutma işlemi yarıda kesilmiş kaolin numunesi.....	69
Şekil 4.1: ESEM görüntüsünde $5\mu\text{m}^2$ den büyük alanlı elipslerin dağılımı.	73
Şekil 4.2: 20 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.....	74
Şekil 4.3: 50 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.....	75
Şekil 4.4: 100 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.....	75

Şekil 4.5: 200 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi	76
Şekil 4.6: 400 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi	76
Şekil 4.7: 20 kPa yüklemenin 1 dakika etkitilmesi sonucunda elde edilen ESEM görüntüsünün doğal ve sayısallaştırılmış hali	78
Şekil 4.8: 400 kPa yüklemenin 1 dakika etkitilmesi sonucunda elde edilen ESEM görüntüsünün doğal ve sayısallaştırılmış hali	78
Şekil 4.9: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (20 kPa).....	80
Şekil 4.10: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (50 kPa).....	80
Şekil 4.11: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (100 kPa).....	80
Şekil 4.12: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (200 kPa).....	81
Şekil 4.13: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (400 kPa).....	81
Şekil 4.14: Normalleştirilmiş boşluk oranlarının yükleme süresine göre değişimi a) 20 kPa, b) 50 kPa, c)100 kPa, d) 200 kPa, e) 400 kPa.....	84
Şekil 4.15: 400 kPa (1440 dakika süreli yükleme) basınç kademesine çıkarken gerçekleştirilen yükleme adımlarında, mikro boşluk oranı değişimi ile G/ρ_m parametresinin değişimi.....	91
Şekil 4.16: 400 kPa (1440 dakika süreli yükleme) basınç kademesine çıkarken gerçekleştirilen yükleme adımlarında oluşan ikincil oturmalar.....	92
Şekil 4.17: İncelik yüzdesi ve C parametresi arasındaki ilişki.	93
Şekil 4.18: 400 kPa'lık maksimum basınç kademesinde 1440 dakika bekleninen ödometre deneyine ait zaman çizgileri.	97
Şekil 4.19: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi 20 kPa	98
Şekil 4.20: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi 100 kPa	98
Şekil 4.21: ψ/v -İncelik Yüzdesi arasındaki ilişki.	99
Şekil 4.22: a) Büyük konsolidasyon hücresinde 20kPa altında konsolidasyon, b) konsolide edilmiş kaolin kiline ödometre halkalarının yerleştirilmiş hali, c) konsolide edilmiş numunenin ödometre halkalarına taşınmış hali.	100
Şekil 4.23: Serbest basınç yükleme çerçevesine yerleştirilmiş CRS hücresi.	101
Şekil 4.24: Küçük boyutlu CRS konsolidasyon deneyi sonrası ESEM görüntüsü için numune alma işlemi.....	101
Şekil 4.25: CRSÖ-01 gerilme deformasyon eğrisi.	102
Şekil 4.26: CRSÖ-02 gerilme deformasyon eğrisi.	102
Şekil 4.27: CRSÖ-03 gerilme deformasyon eğrisi.	103

Şekil 4.28: CRSÖ-04 gerilme deformasyon eğrisi.	103
Şekil 4.29: CRSÖ-01 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.	104
Şekil 4.30: CRSÖ-02 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.	104
Şekil 4.31: CRSÖ-03 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.	105
Şekil 4.32: CRSÖ-04 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.	105
Şekil 4.33: a) elektrik iletkenliği ölçüm problemleri, b) boşluk suyu basıncı transducerlarının takılacağı bağlantı rekorları.	106
Şekil 4.34: Büyük numunelerde CRS deney düzeneği.	107
Şekil 4.35: Büyük numunede CRS deneyi boyunca ölçülen elektriksel direnç-zaman grafiği.	108
Şekil 4.36: Mercek düzeltilmesi ile fotoğraftaki fiçı görünümünün giderilmesi.	109
Şekil 4.37: Deney süresince filtre kağıtlarının ve hücrenin yer değiştirmelerinin takibi.	110
Şekil 4.38: Fotoğraflardaki yer değiştirmeler kullanılarak, filtre kağıtları arasındaki bölgelerde oluşan deformasyon-zaman grafiği.	111
Şekil 4.39: Büyük numunede CRS deneyinde farklı noktalarda ölçülen boşluksuyu basıncı değerleri kullanılarak hesaplanan efektif gerilme-zaman grafiği.	111
Şekil 4.40: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (Drenaj yüzünden alınan numune).	112
Şekil 4.41: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (5.Bölgeden alınan numune).	112
Şekil 4.42: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (4.Bölgeden alınan numune).	113
Şekil 4.43: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (3.Bölgeden alınan numune).	113
Şekil 4.44: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (2.Bölgeden alınan numune).	114
Şekil 4.45: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (1.Bölgeden alınan numune).	114

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Zeminin dokusu belirleme teknikleri (Mitchell ve Soga 2005).	22
Tablo 2.2: Vektör yönlenmesi değerleri (10° lik aralıklarla).	37
Tablo 4.1: Maksimum konsolidasyon basıncı altında konsolidasyon süresine bağlı olarak doku yönlenme indeksinin değişimi	77
Tablo 4.2: Yükleme süresi ve kademesi ile incelik yüzdesi değişimi.	94
Tablo 4.3: Küçük numunelerde CRS deney programı.	100

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ΔV	: Hacim değişimi
$\dot{\epsilon}$	: Birim deformasyon hızı
ϵ_{vmo}^e	: Değerindeki hacimsel deformasyon
ϵ_{vmo}^r	: Referans zaman çizgisinde yer alan hacimsel deformasyon
ϵ	: Birim deformasyon
κ/v	: Modelde malzeme parametresi (hacimsel birim deformasyon-logaritma ortalama efektif basınç düzleminde ani zaman çizgisi eğimi)
λ/v	: Modelde malzeme parametresi (hacimsel birim deformasyon-logaritma ortalama efektif basınç düzleminde referans zaman çizgisi eğimi)
σ'	: Efektif gerilme
σ_c	: Hücre basıncı
ψ/v	: Modelde malzeme parametresi (hacimsel birim deformasyon-logaritma zaman düzleminde eğrinin doğrusal kısmının eğimi)
Ae	: Elektriksel anizotropi katsayısı
A	: Her bir elektrotun alanı
C	: İkincil konsolidasyonda mikro boşluktan makro boşluğa kütleli su transferini kontrol eden parametre.
Cc	: Sıkışma indisi
Cs	: Yeniden sıkışma indisi
e	: Boşluk oranı
e_{init}	: Başlangıç boşluk oranı
e_m	: Mikro boşluk oranı
e_M	: Makro boşluk oranı
E	: Young modülü
G_s	: Özgül ağırlık
h	: Yatay yönde elektriksel iletkenlik
I	: Elektrik akımı
J	: Akım yoğunluğu vektörü
k	: Permabilite
L	: Elektrotlar arası mesafe
m	: İzotrop gerilme durumunu belirtmektedir
M	: Kritik durum çizgisi eğimi
p'	: Ortalama efektif gerilme
p_u'	: Birim referans ortalama efektif gerilme
p_m'	: Ortalama efektif gerilme
q	: Deviator gerilme
Q	: Viskoplastik potansiyel fonksiyon
R	: Direnç

s	: Skaler fonksiyon
S	: Elektrik iletkenliği
S_v	: Düşey yönde elektriksel iletkenlik
t_o	: Referans zaman çizgisi seçimi için kullanılan eğri uydurma parametresi
t_e	: Eşdeğer zaman
u₀	: Ters basınç
v	: Özgöl hacim
V	: Potansiyel fark
w	: Su muhtevası
w_L	: Likit limit

Kısaltmalar	Açıklama
--------------------	-----------------

CRS	: Deformasyon Hızı Kontrollü Konsolidasyon Deneyi
DC	: Doğru Akım
dk.	: Dakika
AC	: Alternatif Akım
SI	: Stabilitate İndeksi
sa.	: Saat
sn.	: Saniye

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YUMUŞAK KİLDE ZAMANA BAĞLI DAVRANIŞIN MİKROMEKANİK OLARAK MODELLENMESİ

İbrahim YİĞİT

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof.Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU

Alt yapı projelerine olan ihtiyaç şehirleşme ve gelişmeye paralel olarak artmakta ve bu projeler için kamu kaynaklarının önemli bir bölümü ayrılmaktadır. Güvenli ve ekonomik tasarım yapabilmek için ise zemin davranışını iyi anlamak ve doğru takip etmek önemlidir. Killer bu bağlamda deformasyon aralığı en geniş zeminler olarak özellikle önemlidir. Son yıllarda yapılan araştırmalar kil zeminin davranışının sadece gerilme deformasyon ilişkisi ile ifade edilmesinin yetersiz olduğunu, davranışta deformasyon artış hızının gerilme-deformasyon ilişkisini doğrudan etkilediğini ve ancak deformasyon hızını da ilişkiye katmak suretiyle gerilme-deformasyon-deformasyon hızı $(\sigma', \varepsilon, \dot{\varepsilon})$ ilişkisinin tekil bir ilişki olarak ifade edilebileceğini göstermektedir.

Makro boyutta zemin numuneleri üzerinde yapılan özel deneyler viskoplastik davranış adı da verilen zamana bağlı davranışın göstergelerini taşımaktadır ve bu davranışın mikro boyuttaki mekanizmaya bağlı olduğu düşünülmektedir. Son yıllarda mikro boyuttaki davranışı araştıran çalışmalar sıklık kazanmıştır ve geoteknik araştırmaların öncelikli konularından birisi haline gelmiştir. Ancak mevcut durumda ulaşılan noktada zeminin konsolidasyonu veya yüklenmesi sürecinde gelişen viskoz davranış yeterli seviyede açıklayan, genel kabul gören ve makro davranışla bağdaştıran bir teori henüz kurulamamıştır.

Bu tez çalışması ile sunulan araştırma çalışmasının amacı killerin konsolidasyon ve anizotropik yüklenme sürecindeki viskoplastik davranışını makro ve mikro boyutta

açıklığa kavuşturmak ve yapısal modellemeye katarak bilimsel çalışmalara özgün ve önemli katkıda bulunmaktadır. Yapılan araştırma çalışması üç aşamadan oluşmaktadır. Her birisi kendi içinde kapsamlı ve yoğun araştırma gerektiren bu çalışma aşamaları; i) özel deneysel teknikler ve görüntüleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen ve hem makro hem de mikro düzeyde zemin davranışının takip edilmesini sağlayan tamamen özgün bir deney programının uygulanması, ii) Elde edilen deney sonuçları ve ESEM analiz sonuçlarının irdelendiği ve değerlendirildiği sayısal analiz çalışmaları, iii) Malzeme modelinin kurulmasıdır.

Mart, 2014, 148 sayfa.

Anahtar kelimeler: Zamana bağlı davranış, Mikro mekanik davranış, Konsolidasyon, Viskoplastisite, Kil davranışı

SUMMARY

Ph.D. THESIS

MICROSTRUCTURAL MODELLING OF THE TIME DEPENDENT BEHAVIOUR OF SOFT CLAY

İbrahim YİĞİT

İstanbul University

Graduate School of Science and Engineering

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. S. Feyza ÇİNİCİOĞLU

Increasing needs of modern societies combined with developments in science and technology entail a greater resource allocation for infrastructure projects. Therefore, the considerations of safety and economy need to be more optimally combined in today's construction projects. In terms of design and construction of soil structures, this concern requires to understand and follow the fundamental soil behaviour more thoroughly. Clays as having the widest deformation range deserves special consideration on research projects aimed to understand fundamental soil behaviour. Recent research indicated that deformation rate has a vital role in defining stress-strain behaviour of clay soils. Only if the strain rate is included, the behaviour of clays can be defined by a unique relationship in terms of “stress-strain-strain rate ($\sigma', \epsilon, \dot{\epsilon}$)”.

This mechanism can also be termed as the time dependency or viscoplastic behaviour of clays. Viscoplastic mechanism is attributed to the mechanisms involved at the micro scale and there is a surge of interest to this research area among the researchers. It is, however, known that there is no generally accepted theory or methodology that explains the viscoplastic mechanism at the micro-scale and gives clues which can be used to combine micro-behaviour with macro-behaviour.

The research work defined in this thesis aims to evaluate “stress-strain-strain rate” behaviour of clays by disclosing the mechanism involved at macro and micro scale. The ultimate aim is to induce the implications of micro-mechanic behaviour into constitute

modelling. This research work constitutes of three stages each of which involves intensive theoretical experimental and numerical modelling work. These stages are; i) Application of a novel experimental program which involves a series of original techniques, ii) numerical analyses of experimental findings together with image analyses results, iii) Development of a constitutive model under the light of the findings of experimental and numerical work.

March, 2014, 148 pages.

Keywords: Time dependency, Micro mechanical behaviour, Consolidation, Viscoplasticity, Clay behaviour

1. GİRİŞ

İnşaat temel zemini teşkil eden zemin türlerinden özellikle normal konsolide yumuşak killerin reolojik davranış sergilediği bilinmektedir. Killerin zamana bağlı davranışının modellenebilmesi için laboratuvar veya arazi deneylerine dayanan davranış modellerinin kurulması gerekmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar kil zeminin davranışının sadece gerilme deformasyon ilişkisi ile ifade edilmesinin yetersiz olduğunu, davranışta deformasyon artış hızının gerilme-deformasyon ilişkisini doğrudan etkilediğini ve ancak deformasyon hızını da ilişkiye katmak suretiyle gerilme-deformasyon-deformasyon hızı $(\sigma', \varepsilon, \dot{\varepsilon})$ ilişkisinin tekil bir ilişki olarak ifade edilebileceğini göstermektedir.

Diğer taraftan, makro boyutta zemin numuneleri üzerinde yapılan özel deneyler viskoplastik davranış adı da verilen zamana bağlı davranışın göstergelerini taşımaktadır ve bu davranışın mikro boyuttaki mekanizmaya bağlı olduğu düşünülmektedir.

Zemindeki katı tanelerin ve boşlukların konumsal dağılımı ve su muhtevası, laboratuvar veya arazide yaygın olarak kullanılan ölçüm cihazları ile doğrudan elde edilebilen makro zemin davranışını kontrol etmektedir. Mitchell ve Soga (2005) ince taneli zeminlerin hemen hemen her zaman çok partiküllü topraklardan oluştuğunu ve toprakların büyüklüklerine göre mikro doku, mini doku ve makro doku şeklinde göreceli üç sınıfta incelenebileceğini, zamana bağlı deformasyonların esasen mini ve mikro doku tarafından kontrol edildiğini belirtmişlerdir.

Son yıllarda mikro boyuttaki davranışı araştıran çalışmalar sıklık kazanmıştır ve geoteknik araştırmaların öncelikli konularından birisi haline gelmiştir. Ancak mevcut durumda ulaşılan noktada zeminin konsolidasyonu veya yüklenmesi sürecinde gelişen viskoz davranış yeterli seviyede açıklayan, genel kabul gören ve makro davranışla bağdaştıran bir teori henüz kurulamamıştır.

Bu tez çalışması ile sunulan araştırmanın amacı, killerin konsolidasyon sürecindeki viskoplastik davranışını makro ve mikro boyutta açıklığa kavuşturmak ve yapısal modellemeye katarak bilimsel çalışmalara özgün ve önemli katkıda bulunmaktır.

Bu amaç doğrultusunda, likit limit civarında su muhtevasına sahip kaolin kilinde, farklı yükleme sürelerine sahip klasik ödometre deneyleri ile ödometre hücresinde ve büyük boyutlu hücrelerde deformasyon hızı kontrollü 1 boyutlu konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zaman etkisi, ödometre deneylerinde, krip davranışı ile deformasyon hızı kontrollü deneylerde ise deformasyon hızının deney esnasında değiştirilmesi ile sağlanmıştır. Mikro dokunun takibi tüm deneylerde tahribatlı olarak ESEM görüntülerinin elde edilmesi ile gerçekleştirilirken, büyük boyutlu hücrelerde deformasyon hızı kontrollü konsolidasyon deneylerinde ilave olarak tahribatsız mikro doku takibi yöntemlerinden elektrik iletkenliği yöntemi kullanılmıştır. Ödometre deneyleri çeşitli gerilme seviyelerinde farklı yükleme sürelerinde sonlandırılarak ESEM görüntülerinin çekilmesi için ödometre deney numunesinden küçük numuneler alınmıştır. Ödometre numunesi boyutunda numunelerde gerçekleştirilen deformasyon hızı kontrollü konsolidasyon deneylerinde ise uygulanan deformasyon hızı artırılarak veya azaltılarak yeni deformasyon hızında yüklenen numunelerden deney sonunda ESEM görüntüsü için numune alınmıştır. Büyük konsolidasyon hücresinde deformasyon hızı kontrollü konsolidasyon deneylerinde ise sabit deformasyon hızı ile yüklenen numunelerde, farklı kotalarda deney süresince elektrik iletkenliği ve boşluksuyu basıncı birlikte ölçülerek deney sonunda aynı noktalardan ESEM görüntüsü için numune alınmıştır.

ESEM görüntülerinin çekilmesi için alınan numuneler, özel olarak hazırlanan düzenekte propan gazının sızı azot içinde soğutulmasıyla elde edilen likit propan içinde dondurularak, liyafilizatör cihazında süblimleşme yöntemi ile kurutularak ESEM görüntülerinin çekilmesi için hazır hale getirilmiştir.

ESEM görüntüleri çekilen numunelerin mikrografları Image J açık erişimli görüntü işleme programında işlenerek görüntüler sayısallaştırılmıştır.

Mikro dokudaki değişimin, zamana bağlı olarak incelenebilmesi için uygulanan yöntemde, makro boşluk oranları, ESEM mikrograflarının görüntü işleme tekniği ile

sayısallaştırılması sonucu elde edilirken, mikro boşluk oranları, klasik ödometre deney verileri ve makro boşluk oranlarının birlikte kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Bu çalışmada, mikrografların görüntü analizleri ile gradasyon eğrileri oluşturulmuştur. Gradasyon eğrilerini tanımlayan incelik yüzdesi terimi kullanılmıştır. İncelik yüzdesi değişiminin, kil topaklarının dağılması veya yeniden oluşmasını temsil ettiği düşünülmüştür. Buradan hareketle, makro davranışı tanımlamak için, kil topaklarının bozulması ve yeniden oluşması döngüsünden, mikro ve makro verilere dayanan bir hipotez türetilmiştir.

Farklı düşey efektif gerilme ve yükleme sürelerinde gerçekleştirilen ödometre deneylerinden krip deformasyonları elde edilmiştir. Bu krip deformasyonları doğrusal olmayan krip fonksiyonundaki krip parametresinin yükleme süresi ve düşey efektif gerilme düzeyine göre değişiminin elde edilmesinde kullanılmıştır. Çeşitli gerilme düzeyi ve yükleme sürelerinde, incelik yüzdesi ve krip parametresi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Kilin ikincil konsolidasyon davranışı sürecinde mikro boyuttaki mekanizmanın araştırılması için, ikincil konsolidasyon davranışını tanımlamak için kil-su etkileşimi temel teorilerini esas alan ve bunları, makroskopik ödometre deney sonuçları ile ilişkilendirerek, kil topaklarından makro boşluklara, mikro boşluk suyu transferini öngören bir dehidratasyon modeli mikrografların analizi ile birlikte ele alınmıştır. Modelde mikro boşluk suyunun makro boşluklara transferini kontrol eden C malzeme parametresi, mikro boşluk suyunu içinde barındıran kil topaklarının permeabilitesi, boyutu ve rijitliğinin bir ölçüsüdür. İkincil konsolidasyon sürecinin çeşitli evrelerine ait mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen ve kil topaklarının boyutlarındaki değişime işaret eden incelik yüzdesi değerleri ile C parametresi arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmış ve ikisi arasında bir ilişki elde edilmiştir. Bu sonuç mikro konsolidasyonu açıklamak için sadece mikro boşluktan makro boşluğa su transferi önermesinin yeterli olmadığını ifade etmektedir. Ayrıca, bu doktora tezi kapsamında mikro boyutta elde edilen incelik yüzdesi parametresi makro boyuttaki davranış modelinin içine katılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde zamana bağlı zemin davranışının laboratuvar ortamında mikro düzeyde takibi için literatürdeki ölçme teknikleri ve bu ölçümlerden elde edilen parametrelerle zamana bağlı zemin davranışının mikro davranış mekanizmasının kurulması için uygulanan sayısal yöntemler üzerinde durulacaktır.

2.1. ZAMANA BAĞLI ZEMİN DAVRANIŞININ LABORATUAR ORTAMINDA İNCELENMESİ

Literatürde zamana bağlı zemin davranışının incelenmesi için genel olarak iki deney aletinin kullanıldığı görülmektedir. Bunlar ödometre ve üç eksenli deney aletleridir. Zamana bağlı zemin davranışının incelenmesinde bu iki deney aletinde farklı sınır şartları kullanılarak, deformasyon hızı, krip ve gerilme gevşemesi deneyleri ile zamana bağlı zemin davranışı incelenebilmektedir.

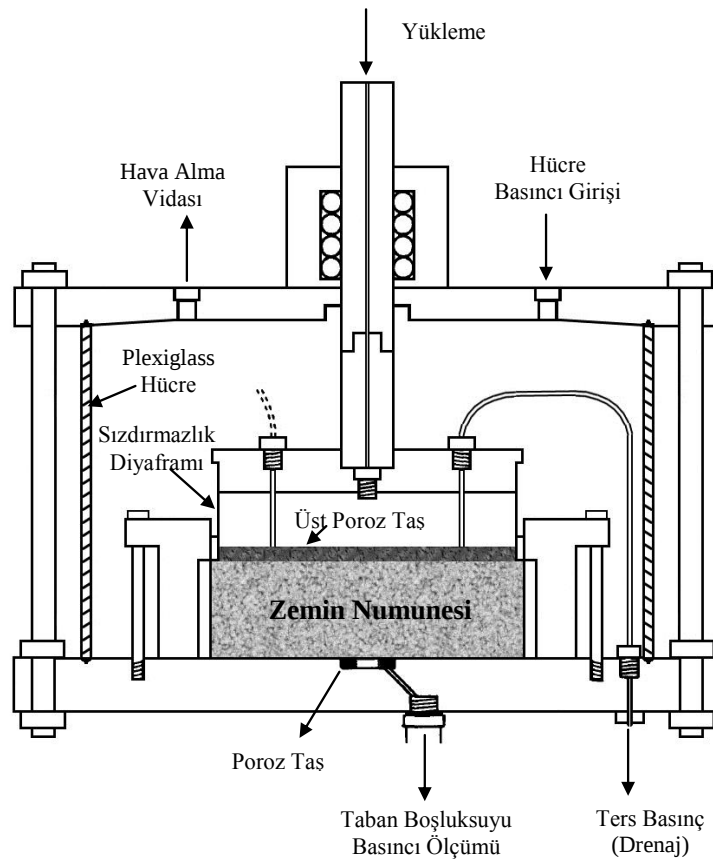
2.1.1. Deformasyon Hızı

Deformasyon hızı kontrolü ile zaman bağlı kil davranışının takip edilebilmesi için bir boyutlu deformasyon hızı kontrollü konsolidasyon deneyleri ve üç eksenli drenajsız kesme deneyleri kullanılmaktadır. Bu bölümde bu deneyler ve deney aletleri anlatılmaktadır.

2.1.1.1. *Deformasyon Hızı Kontrollü Bir Boyutlu Konsolidasyon*

Buisman (1936) deformasyon sırasında zamanın önemli bir etken olabileceğini belirtmiştir. Sabit birim boy deformasyon hızlı konsolidasyon (Constant Rate of Strain : CRS) deneyi ilk olarak Hamilton ve Crawford (1959) tarafından kullanılmıştır. Crawford (1964) kil davranışı üzerinde deformasyon hızının etkisini ve kullanılan deney tipine göre ödometre sonuçlarının farklılık gösterdiğini belirtmiştir. Kil zeminlerde deformasyon hızı etkisinin incelendiği ödometre deneyleri genelde sabit deformasyon hızının (CRS) kullanıldığı deney aletleridir Crawford (1964, 1965), Tavenas ve Leroueil (1977), Vaid vd. (1979), Leroueil vd. (1983), Silvestri vd. (1985),

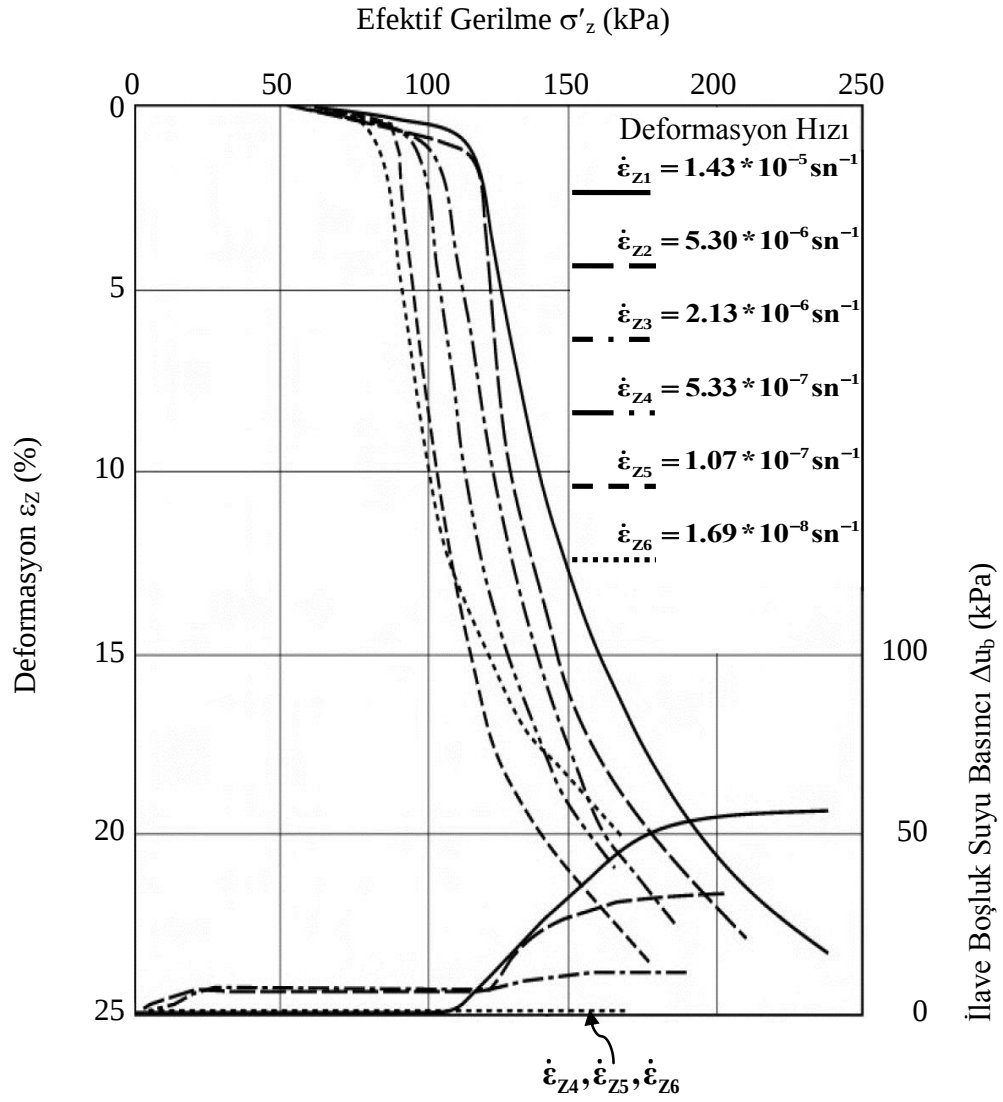
Graham vd. (1983). Şekil 2.1’de Wissa vd. (1971) tarafından geliştirilen CRS deney aleti detayı verilmiştir. Yükleme kolu yardımı ile yük kontrollü kullanılması durumunda klasik kademeli konsolidasyon deney aleti olarak kullanılabildiği gibi deformasyon hızı kontrollü yükleme çerçevesine yerleştirilerek CRS deney aleti olarak da kullanılabilmektedir. Ters basınç uygulaması ile numunenin doyurulmasına olanak sağlamaktadır. Boşluk suyu basınçları drenajın önlendiği numunenin alt yüzünde ölçülmektedir. Numunenin üst yüzünden drenaja izin verilmek sureti ile konsolidasyon gerçekleşmektedir.



Şekil 2.1: CRS deney aleti (Wissa vd. 1971).

Deformasyon hızı konsolidasyon eğrisini ve önkonsolidasyon basıncını etkilemektedir. CRS deneylerinde deformasyon hızının artmasıyla efektif gerilmede artmaktadır. Genel olarak, yükleme hızı ne kadar yüksekse, aynı deformasyon değerinde, o kadar yüksek efektif gerilme oluşmaktadır. Deformasyon hızı arttıkça, sıkışma eğrisi sağa

kaymaktadır (Şekil 2.2). Bununla birlikte, Şekil 2.2’de en düşük deformasyon hızının ($1.69 \cdot 10^{-8} \text{ sn}^{-1}$) uygulandığı deneye ait sıkışma eğrisi diğerlerinden farklıdır.

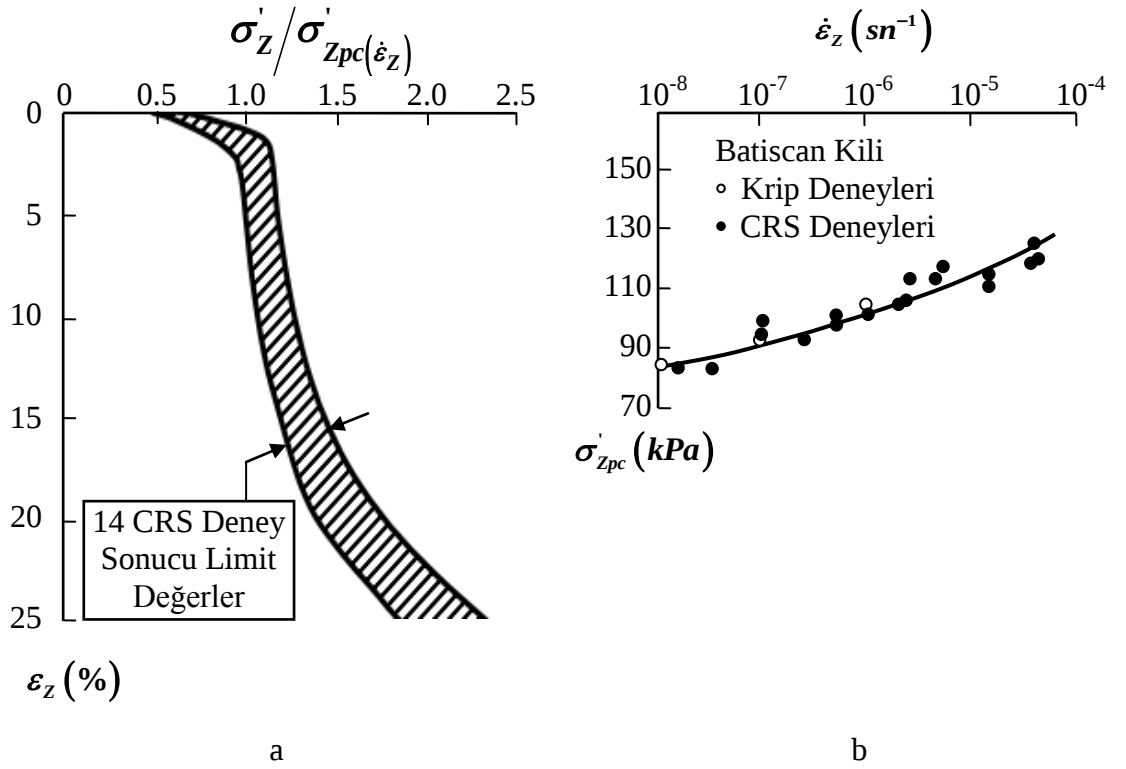


Şekil 2.2: Batiscan kili CRS ödometre deney sonuçları (Leroueil vd. 1985).

Leroueil (1988), Leroueil ve Marques (1996) ödometre deneylerinde deformasyon hızı etkisini incelemişlerdir. Herhangi bir deformasyon veya boşluk oranında elde edilen ön konsolidasyon basıncı ve efektif gerilmenin CRS deneylerinde 24 saat süreyle

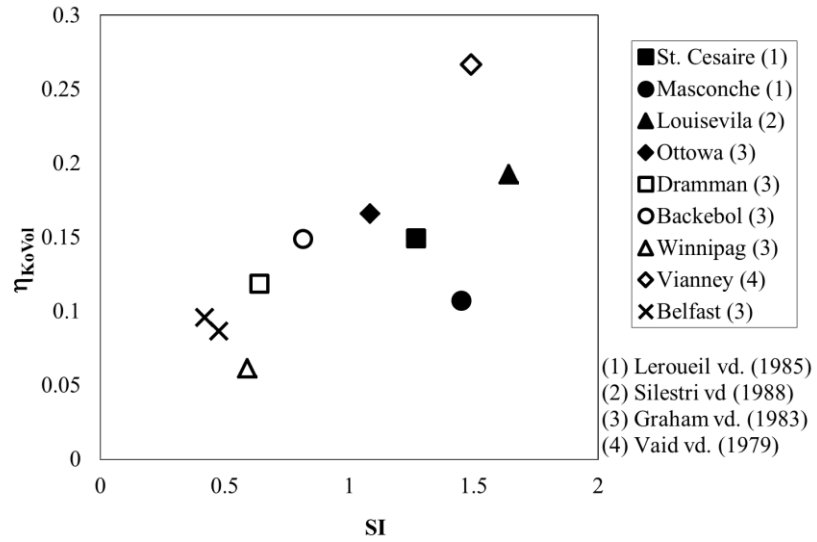
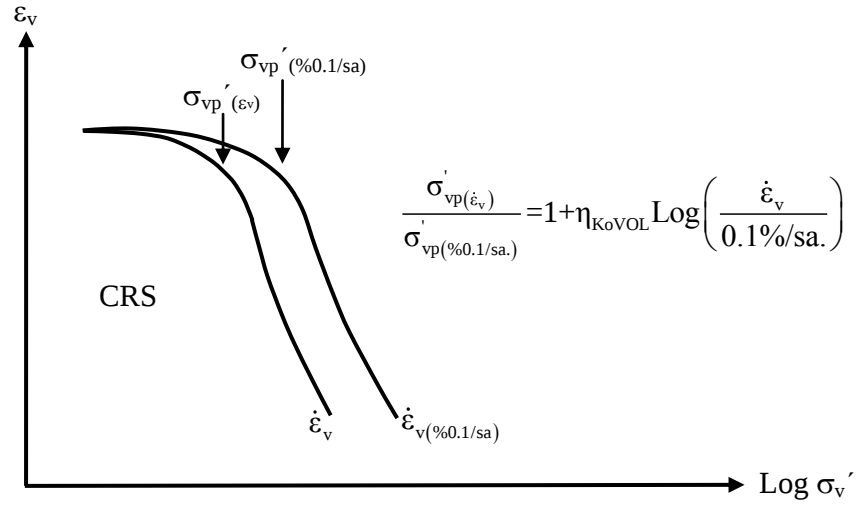
beklenerek uygulanan deneylerden daha büyük olduğunu ve oranın 1.25 olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.3).

Sabit deformasyon hızlı konsolidasyon aleti ile deformasyon hızının sıkışma eğrisine etkisi incelenebilmektedir. Bir boyutlu konsolidasyon sırasında ikincil konsolidasyon, deformasyon hızı etkisinin bir diğer göstergesidir.



Şekil 2.3: Batiscan kilinde: a) CRS deneylerinde elde edilen, normalleştirilmiş efektif gerilme – birim boy deformasyon grafiği, b) önkonsolidasyon basıncının deformasyon hızı ile değişimi (Leroueil vd. 1985).

Yapılanmış zeminler metastabil yapıları nedeniyle deformasyon hızına önemli ölçüde bağımlıdır. Graham vd. (1983) deformasyon hızında 10 kat değişime karşılık önkonsolidasyon basıncındaki değişimi gösteren η_{KoVOL} parametresini ortaya koymuşlardır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Metastabilitenin, deformasyon hızına bağlı önkonsolidasyon basıncına etkisi (Soga, K., 1994).

$$\frac{\sigma'_{vp(\dot{\epsilon}_v)}}{\sigma'_{vp(0.1\%/sa)}} = 1 + \eta_{KoVOL} \text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}_v}{0.1\%/sa.} \right) \quad (2.1)$$

Metastabilitenin, η_{KoVOL} parametresi üzerine etkisi Şekil 2.4'de verilmiştir. Metastabilite derecesi SI ile karakterize edilmiştir. SI daki artışla zemin daha metastabil olmakta ve deformasyon hızına bağımlılığı artmaktadır. Bu yüzden çimentolanma ve zemin dokusu ile oluşan zemin iskeleti dayanımı deformasyon hızına önemli ölçüde bağımlıdır. Leroueil (1988) laboratuvar ve arazi gözlemleri ile bu davranışın yüksek derecede yapılanmış killerde de geçerli olduğunu göstermiştir.

2.1.1.2. Deformasyon Hızı Kontrollü Drenajsız Üç Eksenli Kesme

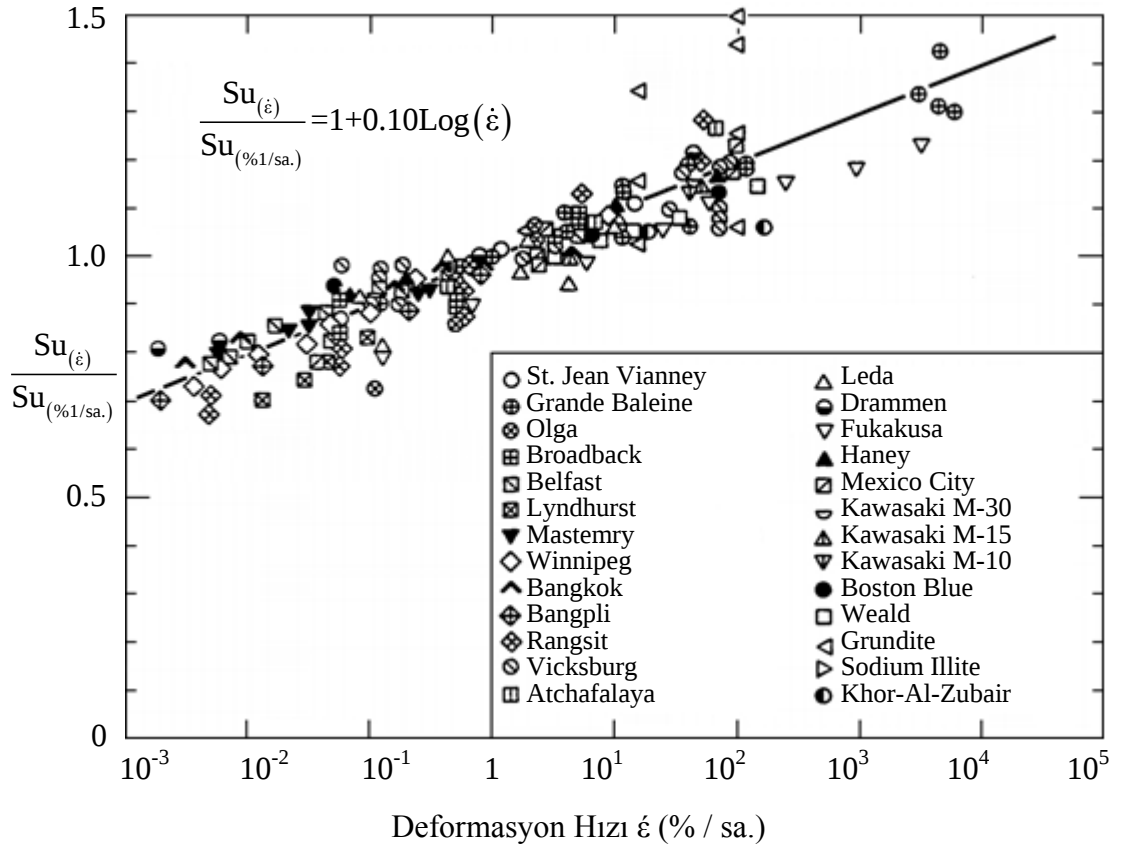
Richardson ve Whitman (1963), Alberro ve Santoyo (1973), Vaid ve Campanella (1977) yüksek deformasyon hızlarının yüksek kayma dayanımı verdiğini belirtmiştir. Vaid ve Campanella (1977) deformasyon hızında 10 kat artışın drenajsız kayma dayanımında %5-10 artış sağladığını belirtmişlerdir. Graham vd. (1983) yumuşak kilde deformasyon hızında 10 kat artışla drenajsız kayma dayanımında %9-20 artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Kulhawy ve Mayne (1990) 26 farklı kilden elde edilen datalardan deformasyon hızının 10 kat artışıyla drenajsız kayma dayanımının %10 arttığını göstermişlerdir (Şekil 2.5).

Yapılanmış zeminlerin drenajsız dayanımı, yükleme sırasında deformasyon hızının bir fonksiyonu olarak değişir. Üç eksenli basınç deneylerinde genelde deformasyon hızındaki 10 kat artış drenajsız kayma dayanımında %10 artış meydana getirmektedir Ladd ve Foott (1974). Benzer sonuçlar basit kesme kutusu ve Ko durumunda konsolide edilmiş üç eksenli çekme deneyleri için de elde edilmiştir Graham vd. (1983). Kulhawy ve Mayne (1990) bu davranışı 26 farklı kil için üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen datalarla doğrulamışlardır (Şekil 2.5). Yazarlar Şekil 2.5'den drenajsız kayma dayanımı ve deformasyon hızı arasında doğrusal bir ilişki elde etmişlerdir.

$$\frac{Su_{(\dot{\epsilon}_a)}}{Su_{(0.1/sa)}} = 1 + 0.10 \log(\dot{\epsilon}_a) \quad (2.2)$$

Graham vd. (1983) deformasyon hızının drenajsız kayma mukavemeti değişimine etkisini açıklamak için $\rho_{0.1}$ deformasyon hızı parametresini tanımlamışlardır. Burada $\rho_{0.1}$ deformasyon hızında 10 kat değişimle drenajsız kayma mukavemetindeki değişim olarak tanımlıdır. Saatte %0.1 deformasyon hızında ölçülen drenajsız kayma mukavemetinin yüzdesi $\rho_{0.1}$ olarak belirtilmektedir. Sheahan vd. (1996) daha genel bir deformasyon hızı parametresi öne sürmüşlerdir

$$\rho_{\dot{\epsilon}_a} (\%) = \left[\left(\Delta S_u / S_{u0} \right) / \Delta (\log \dot{\epsilon}_a) \right] * 100 \quad (2.3)$$



Şekil 2.5: Deformasyon hızının üç eksenli basınç deneyinden ölçülen drenajsız kayma dayanımına etkisi (Kulhawy ve Mayne 1990).

Burada, S_{u0} , $\dot{\epsilon}_{a0}$ referans deformasyon hızında drenajsız kayma mukavemeti S_u 'nun değeridir. Logaritmik ölçekte deformasyon hızındaki artış $\Delta(\log \dot{\epsilon}_{a0})$ dan kaynaklanan drenajsız kayma mukavemetindeki artış $\Delta S_u = S_u - S_{u0}$ ile verilmektedir. Bu deformasyon hızı parametresi normal konsolide killer için genel olarak kabul görmüş bir yaklaşımdır.

Richardson ve Whitman (1963) numunelerdeki farklılıklardan kaçınmak ve düşük deformasyon hızlarında zamandan tasarruf sağlamak amacıyla aynı numuneye aşamalı olarak farklı deformasyon hızları uygulamışlardır. Her bir deformasyon hızı gerilme deformasyon ilişkisi elde edilmesine yetecek kadar süre ile uygulanmaktadır. Vaid ve Campanella (1977), Graham vd. (1983) sabit deformasyon hızı kullanılarak yapılan deneylerle aşamalı deformasyon hızı uygulanarak yapılan deney sonuçlarının tutarlı olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.6). Graham vd. (1983) deformasyon hızının aşamalı olarak değiştirildiği deneyden elde edilen gerilme deformasyon eğrilerinden diğer

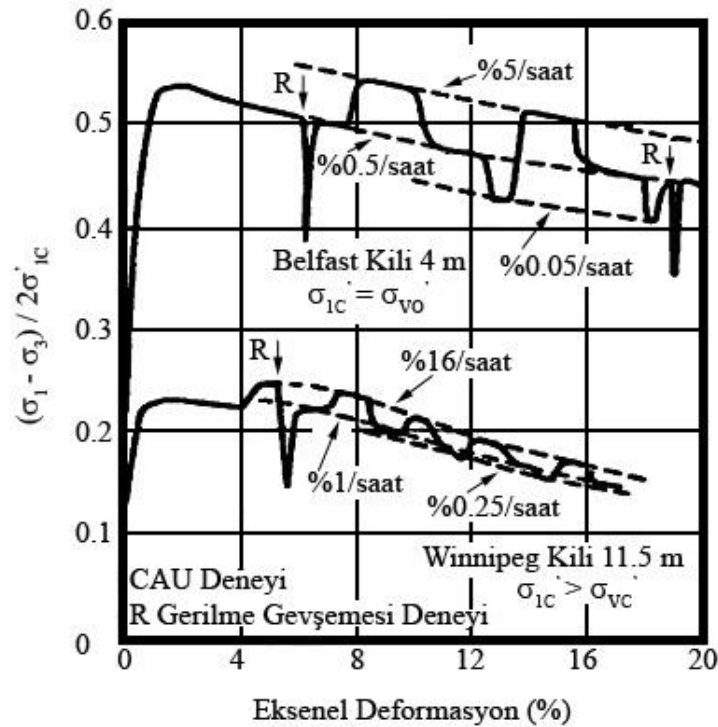
deformasyon hızlarındaki gerilme deformasyon eğrilerine enterpolasyon ve göçme deformasyonlarındaki eğrilere eksterpolasyon yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen çeşitli deneylerden aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir Berre ve Bjerrum (1973), Flavigny ve Nova (1990)

$$\frac{S_u}{S_{u0}} = 1 - \frac{\alpha}{S_{u0}} \log \frac{t_f}{t_{f0}} \quad (2.4)$$

$$\frac{S_u}{S_{u0}} = 1 + \frac{\alpha}{S_{u0}} \log \frac{\dot{\epsilon}_a}{\dot{\epsilon}_{a0}} \quad (2.5)$$

Burada, S_u ve S_{u0} sırasıyla $\dot{\epsilon}_a$ ve $\dot{\epsilon}_{a0}$ deformasyon hızlarına veya t_f ve t_{f0} göçmeye ulaşmak için geçen sürelerle karşılık gelen drenajsız kayma mukavemetleridir. α/S_{u0} terimi $\rho_{\dot{\epsilon}_{a0}}$ terimine eşittir.



Şekil 2.6: Kademeli deformasyon hızı kontrollü ve gerilme gevşemesi yöntemleri ile gerçekleştirilen drenajsız üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen gerilme deformasyon eğrileri (Graham vd. 1983).

Bjerrum (1973) zaman etkisinin kayma dayanımının kohezyon bileşeni ile ilişkili olduğunu, sürtünme bileşeninin zamandan bağımsız olduğunu belirtmiştir. Richardson ve Whitman (1963), Vaid ve Campanella (1977) yaptıkları deney sonuçları bu durumu desteklemektedir. Leroueil ve Marques (1996) normal konsolide killeri için göçme zarfının deformasyon hızından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Sheahan vd. (1996) ise normal konsolide ve az aşırı konsolide kilde efektif sürtünme açısının deformasyon hızındaki artışla arttığını belirtmişlerdir.

Şekil 2.7’de deformasyon hızına bağlı drenajsız kayma dayanımı (S_u), stabilite indeksinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir (Soga, K., 1994).

$$\frac{S_{u(\dot{\epsilon}_a)}}{S_{u(\%1/sa.)}} = 1 + \xi_{dev} \text{Log} \left(\frac{\dot{\epsilon}_a}{\%1/sa.} \right) \quad (2.6)$$

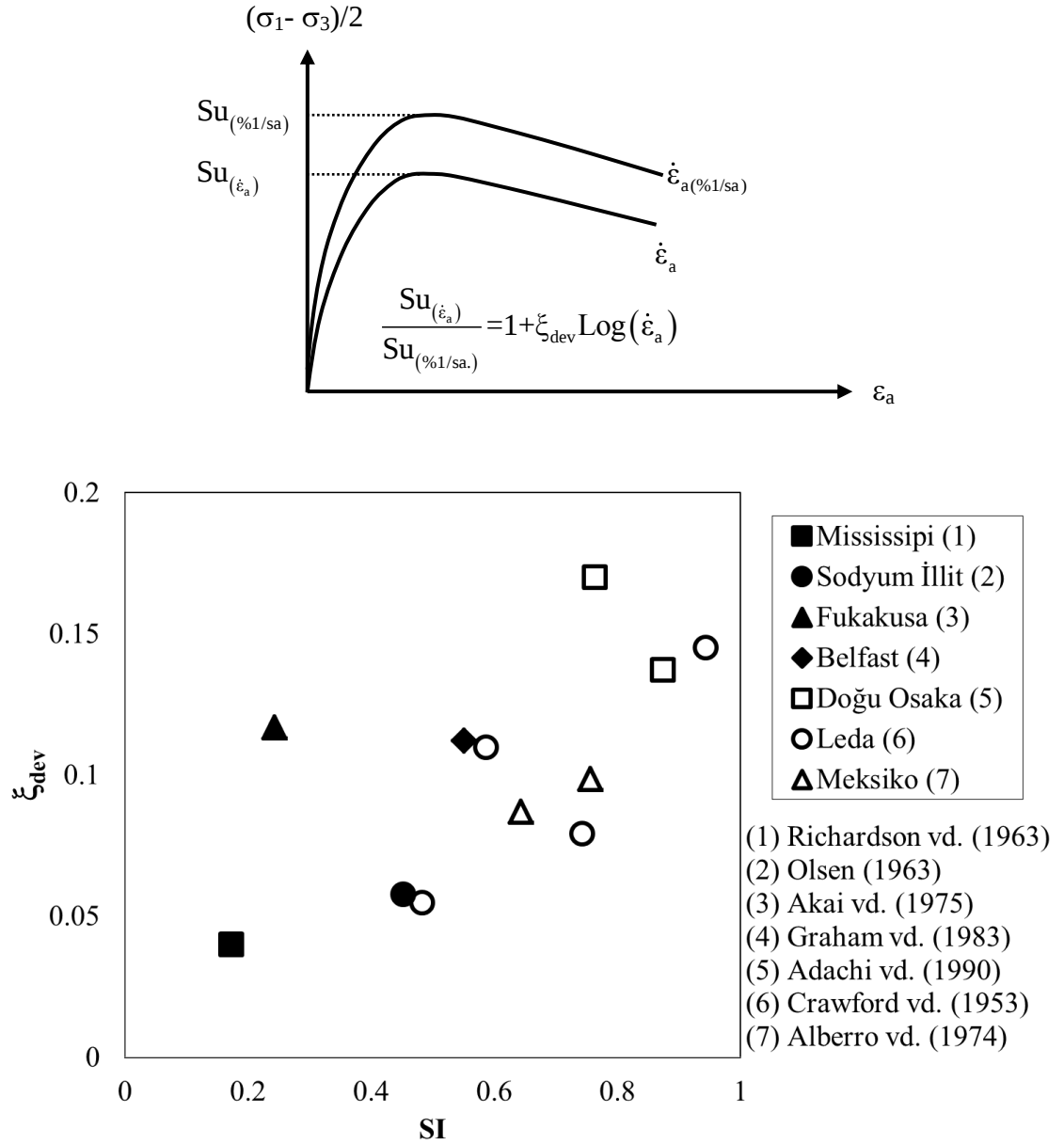
Burada ξ_{dev} , saatte %1 deformasyon hızına karşılık gelen drenajsız kayma dayanımına (S_u) göre deviatorik deformasyon hızındaki 10 kat değişimle drenajsız kayma dayanımında meydana gelen değişimi göstermektedir.

Zeminin metastabilite derecesi arttıkça ξ_{dev} parametresinde de bir artış gözlenmektedir (Şekil 2.7). Yapılanmış zeminler hızlı bir şekilde kesildiğinde, zemin yapısı uygulanan yüke karşı koyabilirken yavaş bir şekilde kesildiğinde krip davranışı ve yapısal bozulma oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak büyük boşluk suyu basınçları meydana gelmekte ve düşen efektif gerilme ile drenajsız kayma dayanımı da düşmektedir. Böylece yapılanmış zeminler başlangıçta metastabil oldukları gerilme durumuna konsolide edilirlse dayanım açısından, yapısal bozulmaya uğramış zeminlere göre daha fazla zamana bağlı davranış gösterirler.

Deformasyon hızının drenajsız kayma dayanımı üzerine etkisi kullanılan deney aletine göre de farklılık göstermektedir. Ladd (1991) deformasyon hızının drenajsız kayma dayanımı üzerine etkisinin sırasıyla üç eksenli çekme, üç eksenli basınç ve basit kesme deneylerinde azaldığını belirtmiştir.

Lefebvre ve LeBoeuf (1987) yapılanmış normal konsolide Olga kilinin gerilme deformasyon ve boşluk suyu basıncı ilişkisini sunmuşlardır. Krip nedeniyle düşük

deformasyon hızlarında daha büyük boşluk suyu basıncı gelişimi gözlemlenmiştir. Normal konsolide killerde pik kayma dayanımındaki azalma boşluk suyu basıncından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.7: Normal ve az aşırı konsolide killerde metastabilitenin deformasyon hızına bağlı drenajsız kayma dayanımına etkisi (Soga, K., 1994).

Sıkışma eğrilerinin ve drenajsız gerilme deformasyon eğrilerinin akma eğrilerinin deformasyon hızına bağlı olduğu ve deformasyon hızının artmasıyla genişlediği görülmektedir.

Deformasyon hızındaki düşüşle veya yükün uygulandığı süredeki artış ile drenajsız kayma dayanımı ve önkonsolidasyon basıncı azalmakta akma eğrileri daralmaktadır. Önkonsolidasyon basıncının hacimsel deformasyon hızına bağımlı olması, akma eğrilerinin genişlemesinin yaşanma ve ikincil konsolidasyonla ilişkisini yansıtmaktadır. Drenajsız kayma dayanımının deformasyon hızına bağımlı olması zamana bağlı davranış modellerinde deviatorik deformasyon hızı bileşeninin yer alması gerektiğini göstermektedir.

2.1.2. Krip Deneyleri İle Zamana Bağlı Davranışın İncelenmesi

Genelde dolgu ve temeller gibi geoteknik mühendisliği problemlerinde zeminde oluşan gerilme durumu gerilme gevşemesi deneylerinden çok krip deneylerindeki modellere benzemektedir. Bu yüzden krip deneylerinin zeminin gerilme deformasyon ilişkisinde viskozite etkisini gerilme gevşemesi deneylerinden daha doğru yansıttığı söylenebilir. Bu sebeple literatürde zeminin krip davranışı üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Bjerrum 1967, Singh ve Mitchell 1968, Duncan ve Buchignani 1973, Vaid ve Campanella 1977, Tavenas vd. 1978, Tian vd. 1994, Nicholson vd. 1996).

Yaygın olarak kullanılan krip deneyleri sırasıyla ödometre, üç eksenli basınç deneyleridir. Kesme kutusu kullanılarak gerçekleştirilen deney sayısı sınırlıdır (Tian vd. 1994). İzotropik ve anizotropik gerilme durumlarında krip deneyleri bazı özel prosedürlerle gerçekleştirilmektedir (Holzer vd. 1973, Yoshikuni vd. 1994, 1995).

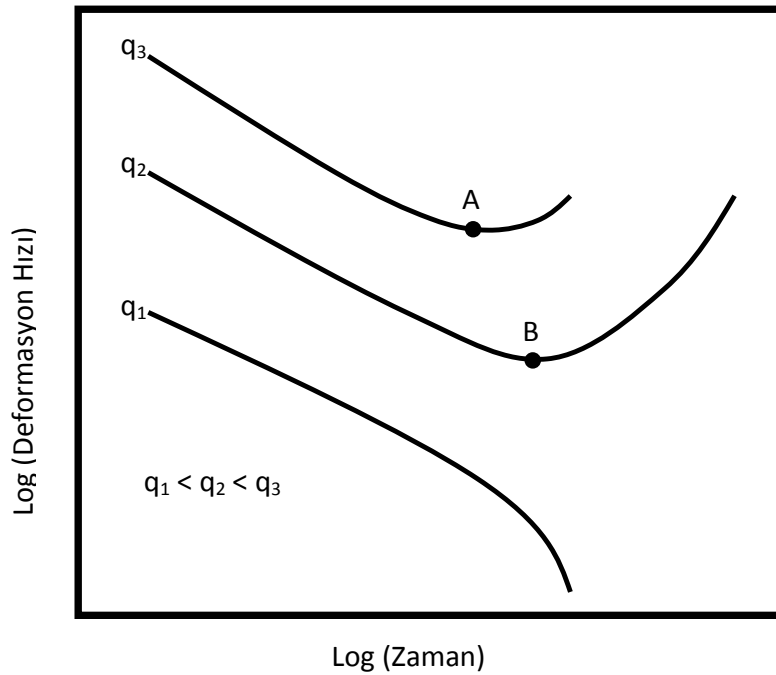
Drenajsız krip deneyinde krip deformasyon hızı ile krip süresi arasındaki tipik ilişki Şekil 2.8’de verilmiştir (Zhu, J.G., 1999). Eğrinin birinci kısmında $\log t - \log \dot{\epsilon}_a$ ilişkisi doğrusaldır ve deformasyon hızı zamanla azalmaktadır. Şekilde q_1 ile temsil edilen düşük krip gerilmelerinde krip bir süre devam ederek yok olmaktadır. Yüksek gerilme seviyelerinde (gerilme seviyesi q/q_f olarak tanımlıdır, q deviator gerilme $q = \sigma_1 - \sigma_3$, q_f ise göçme anındaki deviator gerilmedir) krip deformasyon hızı başlangıçta azalırken şekildeki A ve B gibi bir minimum noktaya geldikten sonra göçme anına kadar artış göstermektedir. Gerilme seviyesi ne kadar yüksekse numune o kadar çabuk göçer. Drenajsız kripin bu özelliği Finn ve Shead (1973), Vaid vd. (1979), Singh ve Mitchell (1968) tarafından desteklenmektedir.

Singh ve Mitchell (1968) drenajsız üç eksenli krip deneylerinden elde ettikleri sonuçlara göre, logaritmik eksen takımında deformasyon hızının zamanla doğrusal olarak azaldığı sonucuna varmışlardır. $\log \dot{\epsilon}_a - \log t$ eğrisinin eğiminin krip gerilmesinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak krip oranı, gerilme seviyesi ve zaman ilişkisini yarı ampirik formda

$$\dot{\epsilon}_a = A e^{\alpha D} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad (2.7)$$

olarak vermişleridir (Singh ve Mitchell 1968).

Burada $\dot{\epsilon}_a$ eksenel deformasyon hızı, D deviatorik gerilme veya gerilme seviyesi, t_1 ve t sırasıyla referans zamanı ve geçen zaman. A , α , m zeminin krip parametreleridir (Singh ve Mitchell 1968, Mitchell ve Soga 2005).



Şekil 2.8: Drenajsız krip durumunda krip deformasyon hızı ve krip zamanı arasındaki tipik ilişki (Zhu, J.G., 1999).

Singh ve Mitchell (1968) eşitliğin düşük ve yüksek gerilme seviyeleri için uygulanamayacağını, eşitliğin uygulanabilmesi için gerilme düzeyinin 0.2 ile 0.8 arasında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Genellikle deney sürelerinin uzaması ile doygun killerin drenajsız dayanımının önemli ölçüde azaldığı bilinmektedir.

Zamana bağılı malzeme davranışı modeli drenajsız krip deneyinden çok drenajlı krip deneyine dayanmalıdır (Tavenas vd. 1978). Bu nedenle drenajlı krip davranışının deneysel olarak incelenmesi zeminin zamana bağılı gerilme deformasyon davranışını incelemek için önemlidir.

Bishop ve Lovenbury (1969) aşırı konsolide Londra kili ve normal konsolide Pisa kili üzerinde çok sayıda drenajlı üç eksenli krip deneyi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında deformasyon ve zaman ilişkisinin logaritmik ve üssel olarak ifadesinin çok kısıtlı bir periyot için geçerli olacağını belirtmişlerdir.

Literatürde çok sayıda drenajlı krip deneyi yapılmış çalışma olmasına rağmen (Singh ve Mitchell 1968, Tian vd. 1994) çalışmaları haricinde krip deformasyonu ve zamanın ilişkisini ifade eden çalışma sayısı kısıtlıdır. Singh ve Mitchell (1968)'in önerdiği eşitliğin drenajsız krip davranışı için kullanılabileceğini destekleyen çok sayıda çalışma olmasına rağmen eşitliğin drenajlı krip deneylerinde eksenel deformasyon ile zaman ilişkisi için kullanılabilirliğine dair çalışma sayısı sınırlıdır.

Tavenas vd. (1978), Tian vd. (1994), Silva ve Brandes (1996) çalışmaları sonucunda Singh ve Mitchell (1968) in önerdiği eşitliğin drenajlı krip için kullanılması durumunda çok karmaşık olacağını belirtmişlerdir. Bu durum eşitlikteki A , α , m parametrelerinin gerilme seviyesi veya zamanın bir fonksiyonu olması anlamına gelmektedir. Bu nedenle eşitlik drenajlı krip deneyinde eksenel deformasyon hızı ile zamanın ilişkisini ifade etmek için uygun değildir. En azından eşitlik eksenel krip deformasyonu için yeniden düzenlenmelidir. Buna rağmen Kavazanjian ve Mitchell (1980), Borja ve Kavazanjian (1985) eşitliğin drenajlı durumda deviatorik deformasyon ile zaman ilişkisi için kullanılabileceğini kabul etmişlerdir.

Tian vd. (1994) drenajlı krip deney datalarından $\log \dot{\epsilon}_a - \log t$ ilişkisinin doğrusal olduğu bölgede eşitliğin değiştirilmiş bir halini drenajlı krip için önermişlerdir.

$$\dot{\epsilon}_a = H(10)^{\alpha D} \left(\frac{t + t_c}{t_0} \right)^{-(bD+c)} \quad (2.8)$$

Burada; H , α , b ve c krip sabitleri. t_0 ve t_c sırasıyla referans ve durdurulma zamanıdır.

Tian vd. (1994), Silva ve Brandes (1996) çalışmalarına göre $\log \dot{\epsilon}_a - \log t$ ilişkisi doğrusal değil bir eğridir. b ve c birer sabit olduğu için Eşitlik 2.8 ilişkiyi tam olarak temsil edememektedir. Bununla birlikte Eşitlik 2.8 eşitliği gerilme izinin göçmeye yaklaştığı kısımda ivmelenmiş krip davranışını tanımlayamamaktadır.

Tavenas vd. (1978) drenajlı krip davranışı için Eşitlik 2.7'den daha genel bir eşitlik önermişlerdir. Ancak bu eşitlik deney datalarının henüz yeterli sayıda olmayışı nedeni ile uygulamalarda kullanım olanağı bulamamıştır.

2.1.3. Gerilme Gevşemesi Deneyleri İle Zamana Bağlı Davranışın İncelenmesi

Literatürde gerilme gevşemesi deneylerinin krip deneylerinden daha az kullanıldığı görülmektedir. Gerilme gevşemesi deneylerinden krip parametreleri elde edilebilmektedir (Lacerda ve Houston 1973). Buna ilaveten göçme durumlarında zamana bağlı gerilme-deformasyon davranışını gerilme gevşemesi deneyleri ile incelemek daha uygun olmaktadır. Çünkü krip deneylerinde göçme durumlarına çok kısa sürede ulaşılmaktadır.

Lacerda ve Houston (1973) azalan deviatör gerilme için

$$\frac{q}{q_0} = 1 - s \log \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad \Leftarrow \quad t > t_0 \quad (2.9)$$

Eşitliğini önermişlerdir. Burada;

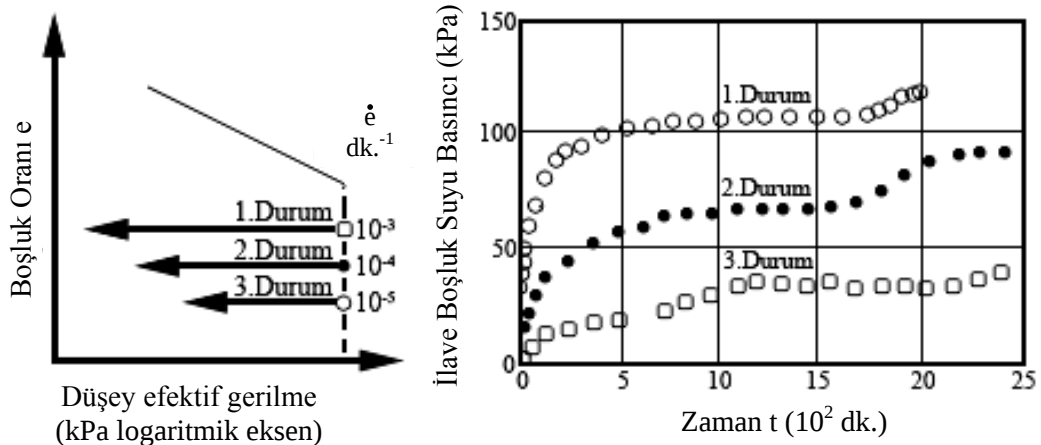
q_0 : gerilme gevşemesinin başlamasından hemen önceki deviatör gerilme

q_0 : herhangi bir zamandaki deviatör gerilme

s : bir parametre

Drenajsız üçeksenli gerilme gevşemesi deneylerinde boşluksuyu basıncı önemli ölçüde değişmemektedir (Lacerda ve Houston 1973, Sheahan vd. 1994). Aynı numune çok sayıda gerilme gevşemesi deneyinde güvenilir şekilde kullanılabilir (Sheahan vd. 1994). Drenajsız gerilme gevşemesi deneylerinde Hicher (1988) yoğrulmuş bentonit için %2 ve %4 deformasyon durumunda boşluk suyu basıncının oluşmadığını fakat %6 sabit deformasyon hızında boşluk suyu basıncının hafifçe arttığını belirtmiştir.

Yoshikuni vd. (1994,1995) konsolidasyon ve gerilme gevşemesi aşamalarından oluşan özel bir ödometre deney aleti kullanmışlardır. Deneyde drenajın önlenmesi ile sabit hacimsel deformasyonda gerilme gevşemesi deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar önemli ölçüde boşluk suyu basıncı artışı gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Boşluk suyu basıncının gerilme gevşemesinin başlamasından önce konsolidasyon periyodu için geçen süre ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.9'da 1.durum kısa süreli konsolidasyonu ve yüksek deformasyon hızını göstermektedir. İkincil konsolidasyonun durdurulduğu deformasyon hızı ne kadar yüksekse oluşan ilave boşluk suyu basıncı da o kadar yüksektir. Holzer vd. (1973) izotropik konsolidasyon deneylerinden benzer sonuçları elde etmişlerdir.



Şekil 2.9: Bir boyutlu deney şartlarında gerilme gevşemesi sırasında oluşan boşluk suyu basıncı (Yoshikuni vd. 1994).

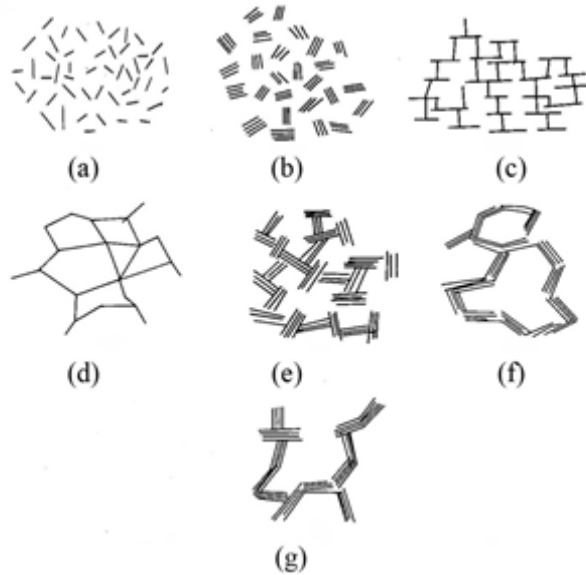
2.2. ZEMİN MİKRO DOKUSUNUN ZAMANA BAĞLI TAKİBİ

Her ne kadar zemin ayrık zemin tanelerinden oluşsa da zemin elemanı analizlerde sürekli ortam olarak ele alınmaktadır. Bununla birlikte zeminin dayanım, permeabilite ve sıkışabilirlik gibi özellikleri zemin tanelerinin büyüklükleri, şekilleri, dizilimleri ve aralarındaki kuvvetler kullanılarak elde edilmektedir.

Zemin tanelerinin dizilimleri 1950'li yılların ortalarında XRD ve SEM tekniklerinin geliştirilmesine kadar bir bilinmeyen olarak kalmıştır. Daha sonraları kil partiküllerinin dizilimleri ve bunların mekanik özelliklerle ilişkisi araştırma konusu olmuştur.

Doku (fabric) terimi zeminde tanelerin, tanecik gruplarının ve boşlukların geometrik dizilimi olarak tanımlanmıştır. Yapı (structure) terimi bazen doku terimi yerine kullanılabilir. Halbuki yapı terimi dokunun, düzeninin ve taneler arası kuvvetlerin birlikte etkisi olarak kullanılmalıdır (Mitchell ve Soga 2005). Yapı terimi aynı zamanda zeminin özelliklerinin doğal hali ile aynı zeminin aynı boşluk oranında yoğrulmuş (remoulded) hali arasındaki farklılıkları dikkate almak için kullanılmaktadır. İyice yoğrulmuş ve üzerinde çalışılmış zemin yapısal bozulmaya (destructured) uğramış zemin olarak adlandırılmıştır. Gerçekte tüm örselenmemiş zeminler yapıya sahiptir ve bu yapının mühendislik özelliklerini belirlemede başlangıçtaki porozite ve gerilme tarihçesi kadar etkisi vardır (Leroueil ve Vaughan,1990).

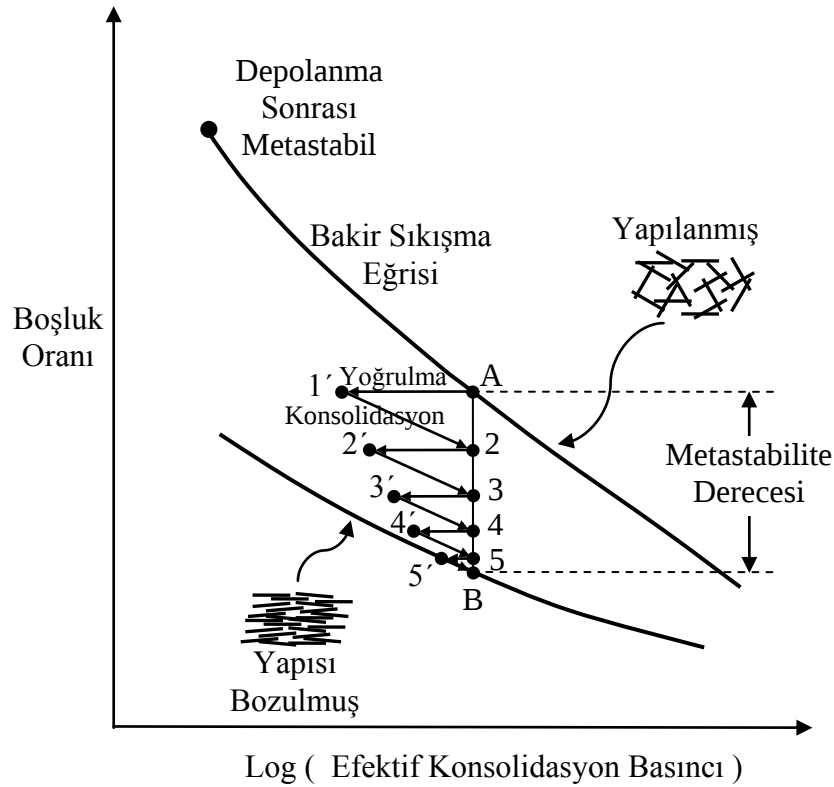
Kil süspansiyonu içindeki tanelerin ilişkisi van Olphen (1977) tarafından incelenmiştir. Buna göre eğer kil partikülleri arasında yüzey-yüzey teması yoksa dağınıklaşmış (dispersed), çok sayıda partikül yüzey-yüzey temasında ise topaklaşmış (aggregated), partiküller kenar-kenar veya kenar-yüzey temasında ise yumaklaşmış (flocculated), kil topakları arasında temas yoksa ayırık (deflocculated) olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Kil süspansiyonundaki kil partiküllerinin ilişkisi; a) Dağınık ve ayırık, b) Topaklanmış fakat ayırık (yüzey-yüzey teması, paralel veya yönelmiş topaklanma), c) Kenar-yüzey temaslı yumaklaşmış fakat dağınık, d) Kenar-kenar temaslı yumaklaşmış fakat dağınık, e) Kenar-yüzey temaslı yumaklaşmış ve topaklanmış, f) Kenar-kenar temaslı yumaklaşmış ve topaklanmış, g) Kenar-yüzey ve kenar-kenar temaslı yumaklaşmış ve topaklanmış (van Olphen,1977).

Zemin dokusu üç seviyede ele alınabilir. Bunlar mikrodoku (microfabric), minidoku (minifabric) ve makrodoku (macrofabric) olarak sıralanabilir. Mikrodoku düzenli topaklar ve bunların arasında çok küçük boşluklar içerir. Yaklaşık 10 mikrometre boyutundadır. Minidoku mikrodoku kümeleri ve bunların arasındaki boşluklardan oluşur. 100 mikrometre civarında bir boyuta sahiptirler. Makrodoku çatlaklar, fisürler içerebilmektedir. Zeminin mekanik özellikleri dokunun bu üç seviyesinin detaylarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Zeminin permabilitesi makro ve mini doku tarafından kontrol edilmektedir. Sünme gibi zamana bağlı deformasyon ve ikincil konsolidasyon özellikleri mini ve mikro dokunun kontrolü altındadır.

Zemin yapısı, zeminin doğal ya da yapısal bozulmaya uğramış olması arasındaki farklılıkları göz önüne almak için de kullanılmaktadır. Zemin, yapısına bağlı olarak aynı efektif gerilme altında farklı boşluk oranlarında bulunabilmektedir (Şekil 2.11).



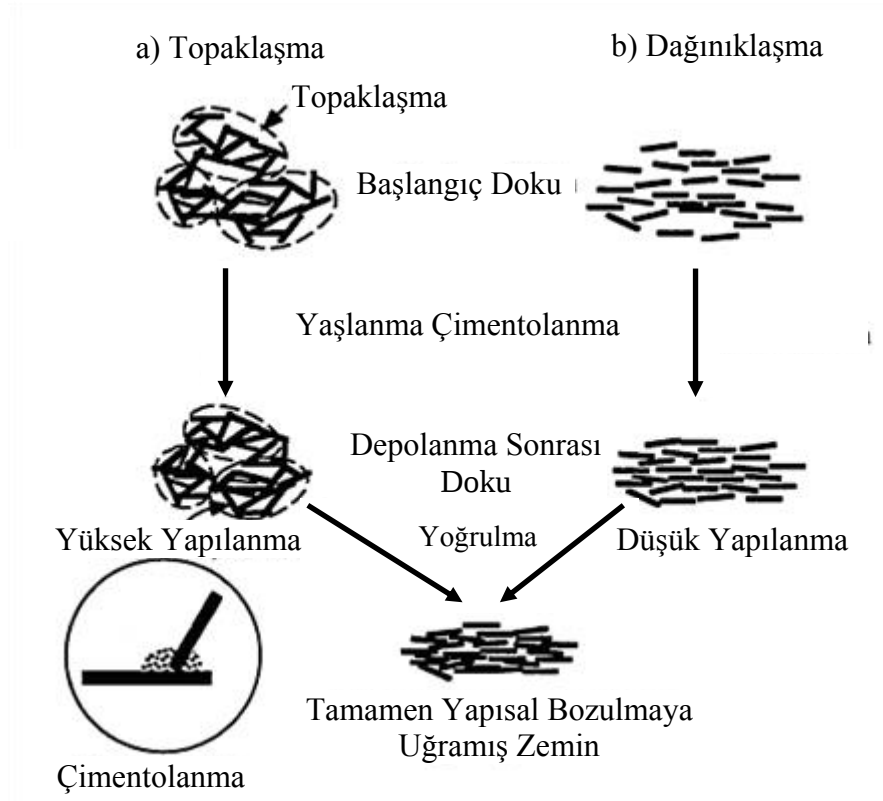
Şekil 2.11: Efektif konsolidasyon basıncı altında metastabil dokunun boşluk oranına etkisi (Soga, K., 1994).

A noktasında partiküller kenar-kenar ve kenar-yüzey temasında olduğu için yüksek boşluk oranına sahiptir. Partiküllerin A noktasındaki yerleşimleri zeminin yoğrulması

ile bozularak boşluk oranı B noktasına düşer ve zemin yapısal bozulmaya uğrar. B noktasında zemin stabildir. Bu noktada partiküller en sıkı yerleşime sahiptir. Boşluk oranı A noktası ile B noktası arasında ise zemin metastabildir.

Suyun iyon konsantrasyonu ve PH derecesi değiştirilerek aynı kil mineralinden iki farklı zemin dokusu (yumaklaşmış ve dağınık) oluşturulabilmektedir. Yumaklaşmış doku kil partiküllerinin depolanma sırasında yumak oluşturmuş halidir. Dağınık doku ise depolanma sırasında kil partiküllerinin süspansiyon içinde ayrık durumda oluşudur (Şekil 2.12).

Delta ve kıyılarda killerin depolanması çok hızlı olmaktadır. Bu bölgelerde tatlı su ile tuzlu suyun etkileşimi söz konusudur. Bu iki etki delta ve kıyılarda bulunan killerin yumaklaşmış dokuda bulunmasına neden olur.



Şekil 2.12: Yumaklanmış ve dağınıklaşmış dokunun şematik gösterimi (Soga, K., 1994).

Zeminin boşluk suyu özellikleri atıklarla kirlenmesi, tatlı su havzalarının deniz suyu baskınlarına maruz kalması yada deniz kıyılarında yağmur suyu ile yıkanma nedeniyle

değişiklik gösterebilmektedir (Mitchell ve Soga 2005, Wang ve Sui 2006). Bu etkiler neniyle zemin dokusu ve yapısı ve bunlara bağlı olarak permabilite, sıkışabilirlik, rijitlik ve dayanım gibi mühendislik özellikleri değişim göstermektedir (Sridharan ve Venkatappa Rao 1979, Mitchell ve Soga 2005, Chen vd. 2000, Santamarina vd. 2001, Wang ve Sui 2006)

Doku anizotropisi depolanmadan sonra bir boyutlu sıkışma neticesinde oluşur. Bu duruma da anizotropik mekanik özellikleri neden olur. Konsolidasyonla zeminin boşluk oranı azalırken dayanımı artar. İlave boşluk suyu basıncının sönmülmesi ile ikincil konsolidasyon meydana gelir. İkincil konsolidasyon partiküllerin yeniden yerleşmesi sonucu oluşan deformasyon davranışdır. İkincil konsolidasyon sırasında partiküller sabit efektif gerilme altında daha stabil bir konuma hareket ederler.

Zemin yapısının mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenebilmesi için zemin yapısının nicelendirilmesi gerekmektedir. Yapı terimi doku ve stabiliteyi içerdiğinden, yapının nicelendirilmesi zemin dokusu ve metastabilite derecesi ile karakterize edilmektedir. Zemin dokusunun nicelik ve nitelik yönünden incelenebildiği yöntemler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Zeminin dokusu belirleme teknikleri (Mitchell ve Soga 2005).

	YÖNTEM	ÖLÇÜM
Doğrudan İnceleme Teknikleri	Optik veya Elektron Mikroskobu	Uzun eksenlerin yönlenme frekansı. Partiküllerin temas noktalarının normallerinin yönlenme frekansı. Partikülle temas halindeki partiküllerin ortalama değeri ve standart sapması
	XRD	Paralel kil plakaları grubu gelişigüzel oryante olmuş plakalardan daha güçlü difraksiyon üretir
	Boşlukların Dağılımı	(1) nemli olmayan sıvının (civa) güçle içeri girmesi (2) kapiler yoğunlaşma
Dolaylı İnceleme Teknikleri	Dalga Yayınımı	Dalga hızları, doğrultuya bağlı dalga hızlarından anizotropi. Elastik modülü veya rijitlik. Arazi dalga hızları ölçümü.
	Elektrik İletkenliği	Dielektrik katsayısı ve iletkenliğin frekansla değişimi. Formation factor= Boşluk suyunun elektrik iletkenliğinin, ıslak zeminin elektrik iletkenliğine oranı
	Termal iletkenlik	Doğrultuya bağlı termal iletkenlikten anizotropi
	Manyetik Duyarlılık	Numune oryantasyonundaki değişikliklerle manyetik yatkınlığın değişiminin manyetik alana oranı

2.2.1. Elektrik İletkenliği Yöntemi İle Mikro Dokunun Takibi

Bu doktora çalışmasının amacı zeminlerin konsolidasyon sürecinde ve kayma gerilmeleri altında mikro mekanik davranış mekanizmalarının takip edilmesi ve mikro boyuttaki mekanizmalarla makro davranışın açıklanmasıdır. Bunun için konsolidasyon sürecinin farklı davranış aşamalarında ve üç eksenli drenajlı ve drenajsız kesme deneylerinde mikro mekanik davranış farklılaşması kontrol edilecektir. Bu bağlamda akma sırasındaki değişimler, viskoplastik davranış etkisiyle boşluk suyu basıncı üretim ve deformasyon oluşum sürecindeki değişimler ve buna bağlı olarak kayma gerilmesi farklılaşmaları gibi davranış değişimlerinin açıklanması henüz yeterli seviyede yapılmamıştır. Bu boşluğu dolduracak ve bu davranış farklılaşmalarını mikro boyuttaki sayısal analizlerle destekleyen bir teorinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Doktora çalışmasının amacını gerçekleştirebilmek için öncelikle viskoplastik davranışı makro boyutta sergileyecek yeni bir deney düzeneği, deney sistemi ve programı oluşturularak kilin izotropik konsolidasyon ve yük etkisi altındaki gerilme deformasyon davranışı izlenecektir.

Anandarajah ve Kuganenthira (1995) doku anizotropisi gelişiminin sürekli olarak gözlenebildiği bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntem farklı yönlerdeki elektrik iletkenliği ölçümüne dayanmaktadır. Ölçme sistemi Mousseau ve Trump (1967) tarafından verilen sistemdir. Sistem kum ve kil numunelerin bir boyutlu konsolidasyonu sırasında doku anizotropisinin değişimini elde etmede kullanılmıştır.

Şekil 2.13’de küp şeklindeki suya doymuş zemin numunesi görülmektedir. Numune paralel iki elektrot arasına yerleştirilip harici bir güç kaynağına bağlandığında numuneden elektrik akımı gerçekleşmektedir. Pratikte zemin iskeleti elektriği iletmediğinden elektrik akımı boşluk suyundan ilerler. Böylece zemin numunesinin elektrik iletkenliği,

$$S = L/RA \quad (2.10)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada;

R : ölçülen direnç

A : her bir elektrotun alanı

L : elektrotlar arası mesafe

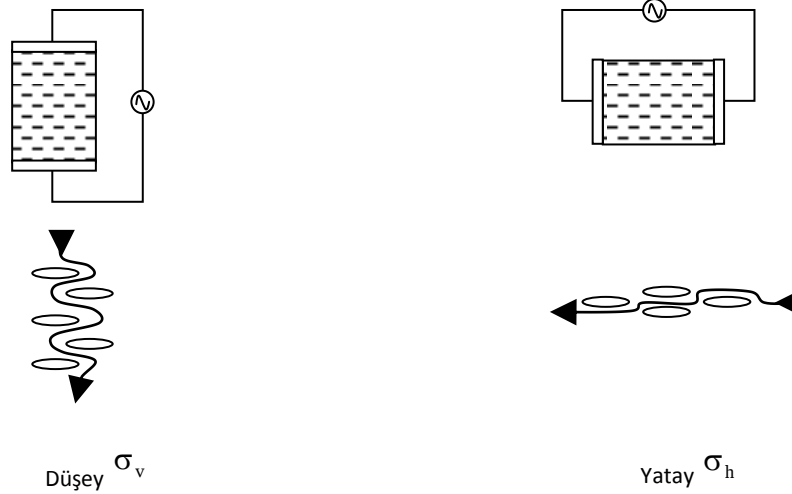
Şekil 2.13’de partikül yüzeyleri yatay eksenle paralel olan kil numunesi şematik olarak verilmiştir. Böyle bir sistemde düşey yöndeki elektrik akımı yatay yöndeki elektrik akımından daha dolambaçlı bir yol izlemektedir. Elektrik akımı düşey yönde daha fazla engellemeyle karşılaşmaktadır. Bu yüzden düşey yöndeki iletkenlik (S_v), yatay yöndeki iletkenlikten (S_h) daha düşüktür. Bununla birlikte (S_v) ve (S_h) değerleri boşluk suyunun iletkenliğine (S_f) bağlıdır. Ancak yatay yöndeki iletkenliğin düşey yöndeki iletkenliğine oranı boşluk suyu iletkenliğinden bağımsız olmaktadır.

$$A_e = \sqrt{S_h/S_v} \quad (2.11)$$

Burada;

A_e : Elektriksel anizotropi katsayısıdır

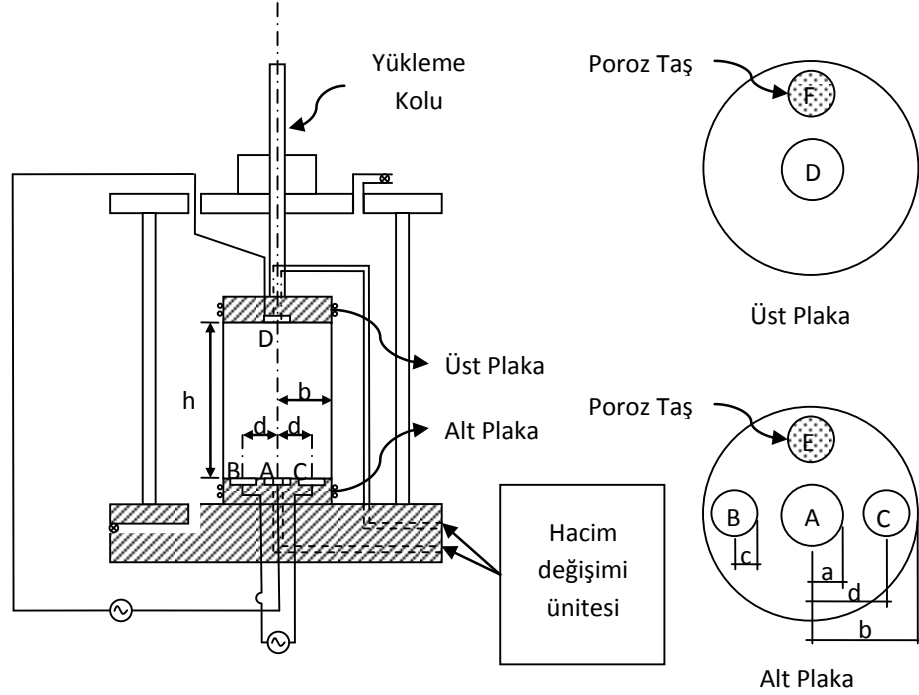
A_e değeri ratgele yönlenmiş dokuda 1 iken, anizotropik dokuda 1 den farklıdır.



Şekil 2.13: Kil numunede dikey ve yatay elektrik iletkenliğinin şematik gösterimi (Anandarajah ve Kuganenthira 1995).

Elektrotların bir boyutlu konsolidasyon hücresi veya üç eksenli deneyi hücresindeki yerleşimi Şekil 2.14’de verilmiştir. Sistem, üçü alt plakaya biri üst plakaya gömülü

olmak üzere dört elektrot içermektedir. A-D ve B-C elektrotları arasında birbirinden bağımsız ölçümle A_e elde edilmektedir.



Şekil 2.14: Üç eksenli deneyinde elektriksel anizotropinin ölçülmesi için 4 elektrotlu düzenek (Anandarajah ve Kuganenthira 1995, Kuganenthira vd. 1996).

Anizotropik ortamın elektrik iletkenliği bir tensörel büyüklüktür (Dafalias ve Arulandan 1979). Kartezyan koordinat sisteminde anizotropinin asal yönlerine göre akım yoğunluğu vektörü $J = (J_x, J_y, J_z)$ potansiyel gradyanlarla

$$\begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial\psi/\partial x \\ \partial\psi/\partial y \\ \partial\psi/\partial z \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Süreklilik denklemlerinden

$$S_x \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + S_y \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + S_z \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.13)$$

Transverse izotropik durumda $S_x = S_y = S_h$ ve $S_z = S_v$ olmaktadır. Düşey yönde $w = A_e z$ koordinat dönüşümü ile eşitlik yeniden yazılırsa

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial w^2} = 0 \quad (2.14)$$

eşitliği elde edilir. Böylece, ψ potansiyellerinin (x, y, w) koordinat sisteminde uzaysal dağılımı Laplace eşitliği şeklinde elde edilmiş olur. Aynı şekilde Laplace eşitliği (r, θ, w) silindirik koordinat sisteminde de elde edilebilir. Bu durumda akım yoğunluğu vektörü $J = (J_r, J_\theta, J_z)$ potansiyel gradyanlarla

$$\begin{pmatrix} J_r \\ J_\theta \\ J_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_r & 0 & 0 \\ 0 & S_\theta & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial\psi/\partial r \\ \partial\psi/r\partial\theta \\ \partial\psi/\partial z \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

eşitliği ile ilişkilendirilmektedir.

A-D elektrotları arasında herhangi bir yatay düzlemi geçen I_{AD} elektrik akımı

$$\begin{aligned} I_{AD} &= \int_0^b \int_0^{2\pi} J_z r d\theta dr \\ &= S_v \int_0^b \int_0^{2\pi} \frac{\partial\psi}{\partial z} r d\theta dr \\ &= A_e S_v V_{AD} \int_0^b \int_0^{2\pi} \frac{\partial\psi^*}{\partial w} r d\theta dr \\ &= A_e S_v V_{AD} f_{AD}(A_e h, a, b) \end{aligned} \quad (2.16)$$

eşitliği ile elde edilmektedir. Burada,

V_{AD} : A-D elektrotları arasındaki voltaj

ψ^* : $\psi = V_{AD} \psi^*$ eşitliği ile ifade edilmektedir

f_{AD} : (a, b, h) geometrik parametrelerin ve anizotropi katsayısı (A_e) 'nin bir fonksiyonudur

A-D elektrotları arasında elektriksel direnç

$$R_{AD} = \frac{V_{AD}}{I_{AD}} = \frac{1}{\sqrt{S_v S_h} f_{AD}} \quad (2.17)$$

B-C elektrotları arasında herhangi bir yatay düzlemi geçen I_{BC} elektrik akımı

$$\begin{aligned}
I_{BC} &= \int_{-b}^b \int_0^h J_x dy dz = S_h \int_{-b}^b \int_0^h \frac{\partial \psi}{\partial x} dy dz \\
&= \frac{1}{A_e} S_v V_{BC} \int_{-b}^b \int_0^{A_e h} \frac{\partial \psi^{**}}{\partial x} dy dw \\
&= \frac{1}{A_e} S_h V_{BC} f_{BC}(A_e h, b, c, d)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

eşitliği ile elde edilmektedir. Burada,

V_{BC} : B-C elektrotları arasındaki voltaj

ψ^{**} : $\psi = V_{AD} \psi^{**}$ eşitliği ile ifade edilmektedir

f_{BC} : (b, c, d, h) geometrik parametrelerin ve anizotropi katsayısı (A_e)'nin bir fonksiyonudur

B-C elektrotları arasında elektriksel direnç

$$R_{BC} = \frac{V_{BC}}{I_{BC}} = \frac{1}{\sqrt{S_v S_h} f_{BC}} \tag{2.19}$$

A-D ve B-C elektrotları arasındaki elektriksel dirençlerin oranı

$$\frac{R_{AD}}{R_{BC}} = \frac{f_{BC}(A_e h, b, c, d)}{f_{BC}(A_e h, a, b)} \tag{2.20}$$

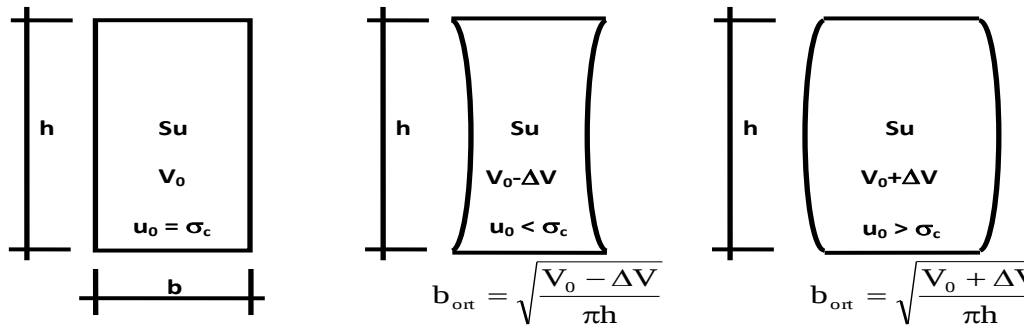
olmaktadır. Eğer $\bar{h} = A_e h$ ile ifade edilirse R_{AD}/R_{BC} oranı sadece $\bar{h}$ ve geometrik parametrelere bağlı olmaktadır. Yatay ve düşey yöndeki elektrik iletkenliklerine ayrı ayrı bağımlı değildir. Böylece deney sistemi su ile kalibre edilerek ($A_e = 1$) zemin numunelerinin yüksekliklerine bağlı olarak anizotropisi elde edilmektedir. Kalibrasyon için hücre su ile doldurulur, R_{AD}/R_{BC} oranı farklı h değerleri için ölçülür. $\bar{h}$ ve R_{AD}/R_{BC} oranı arasındaki kalibrasyon eğrisi oluşturulur. Anizotropik zemin numunesinin (A_e) değerinin hesaplanabilmesi için $(R_{AD}/R_{BC})_{ze \min}$ ve $h_{ze \min}$ ölçülür.

$$A_e = \left[(A_e h)_{\text{kalibrasyon}} \right] h_{ze \min} \tag{2.21}$$

Eşitlik 2.21 ile (A_e) hesaplanır. Burada

$(A_e h)_{\text{kalibrasyon}}$: Kalibrasyon eğrisinde $(R_{AD}/R_{BC})_{\text{ze min}}$ oranına karşılık gelen $\bar{h}$ değeridir

Zeminin elektriksel anizotropisi ölçülürken üç eksenli deneyinin kalibre edilmesinde (b) nin değişken oluşu dikkate alınmalıdır (Şekil 2.15). Üç eksenli deneyinde olduğu gibi hücrenin dışı su ile doldurulur ancak hücre içine zemin yerine su doldurulur. Hücre basıncı (σ_c) ve ters basınç (u_0) eşit olduğunda su numunesi silindirik şeklini korur. (u_0) arttırılır ve (σ_c) den büyük olması sağlanırsa numune (ΔV) hacmi kadar su emerek belverir ve konveks şekil alır. (ΔV) kullanılan membranın rijitliğine bağlıdır. (ΔV) kontrolü, $(u_0 - \sigma_c) > 0$ kontrolü ile sağlanır. (V_0) başlangıç hacmi ve (ΔV) hacim değişimi ölçülerek $(V_0 + \Delta V)$ veya $(V_0 - \Delta V)$ hacmine sahip silindirin çapı numune için ortalama (b_{ort}) değerini vermektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15: Üç eksenli deneyinde elektriksel iletkenlikle anizotropinin ölçümü kalibrasyonu.

Böylece $(u_0 - \sigma_c)$ kontrol altında ve numune yüksekliği (h) sabit tutularak (R_{AD}/R_{BC}) oranı ile ortalama numune çapı (b_{ort}) arasındaki ilişki belirlenebilmektedir. Farklı (h) değerleri için bu ilişki saptandığında hesaplamalarda gerekli olan (R_{AD}/R_{BC}) ve $(\bar{h})$ arasındaki ilişkiyi veren kalibrasyon eğrileri her bir (b_{ort}) değeri için elde edilmiş olur. Zemin numunesinin elektriksel anizotropi katsayısının (A_e) hesaplanabilmesi için zemin numunesinin elektriksel dirençlerin oranı (R_{AD}/R_{BC}) , numune hacmi (V) ve numune yüksekliği (h) ölçülür. Numune hacmi ve numune yüksekliğinden (b_{ort}) değeri hesaplanır. Kalibrasyon eğrilerinden ilgili (b_{ort}) için olanında (R_{AD}/R_{BC}) oranına

karşılık gelen $(\bar{h})$ değeri okunur. Buradan zemin numunesi elektriksel anizotropi katsayısı (A_e) değeri $A_e = \bar{h}/h$ eşitliği ile hesap edilir.

2.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri Kullanılarak Mikro Dokunun Takibi

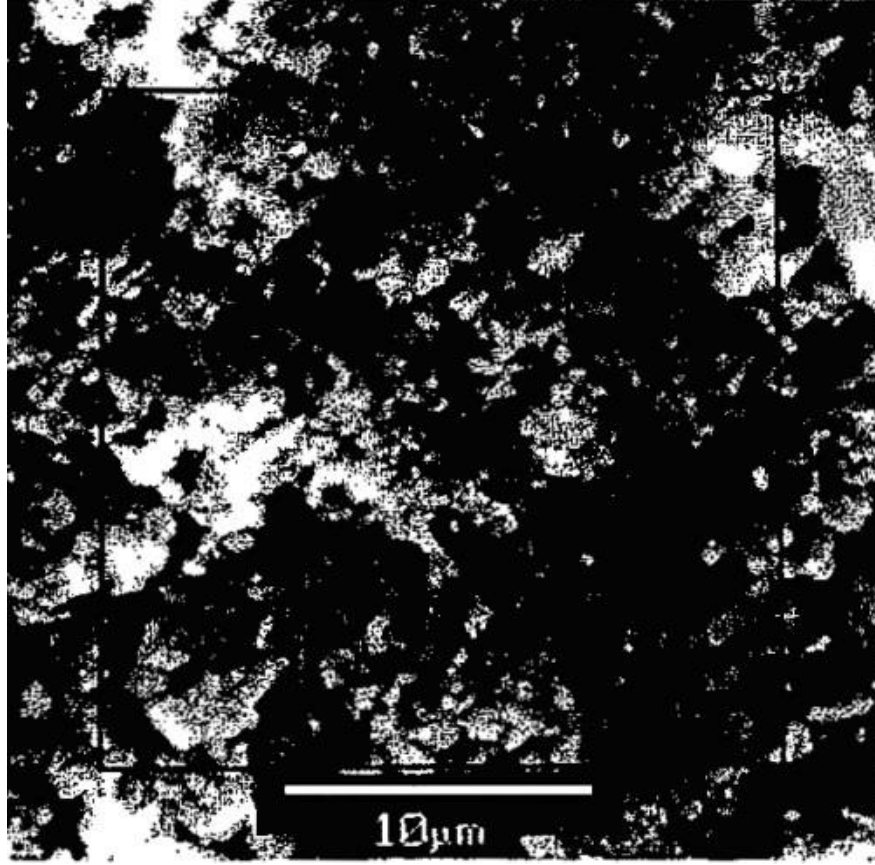
Optik elektron mikroskobu sistemi yüksek enerjili elektronların manyetik lenslerle kırılması temeline dayanır. Elektronlar bir yüzeye odaklanır ve çalışılan yüzeyin yansıması elde edilir. Elektronların bir kısmı yüzeyden yayılır. Bu yayılma ile orantılı olarak yüzeyin farklı kısımları koyu veya açık renkte görüntülenir. Yüzeyden yayılan ikincil elektronlarla yüzeyin 3 boyutlu yapısı elde edilir (Mitchell ve Soga 2005).

Literatürde taramalı elektron mikroskobunun (SEM) kil dokusunun nitelenmesinde kullanılmasına ilişkin çalışmalar mevcuttur (Quigley ve Thompson 1966, Tovey 1971, Barden ve Sides 1971). Son yıllarda görüntü işleme tekniklerindeki ilerlemeler neticesinde taramalı elektron mikroskobu görüntüleri dijital ortamda işlenerek partikül yönlenmesi dağılımı ile ilgili nicel veriler elde edilebilmektedir (Anandarajah vd. 1996).

Elektron mikroskobu görüntülerinde, Şekil 2.16’de olduğu gibi önce siyahın sıfıra beyazın 255’e karşılık geldiği renk skalasında dijital ortama aktarılır ve görüntüdeki her nokta koyuluğuna göre 0 ile 255 arasında bir değer alır. Elektron mikroskobu görüntüsünde numunedeki boşluk hacmi koyu, kil kenarları açık renkte görünür. x-y düzlemindeki görüntünün z eksenini koyuluğu gösterecek şekilde üç boyutlu çizimi sonucunda dorukları kil kenarlarını gösteren dağlık ve numunedeki boşlukları gösteren vadi şeklinde topoğrafik görüntü elde edilmiş olur (Şekil 2.17). Bu görüntünün konturları ise Şekil 2.18’de verildiği gibi koyuluğa göre eşyükselti eğrilerine karşılık gelmektedir.

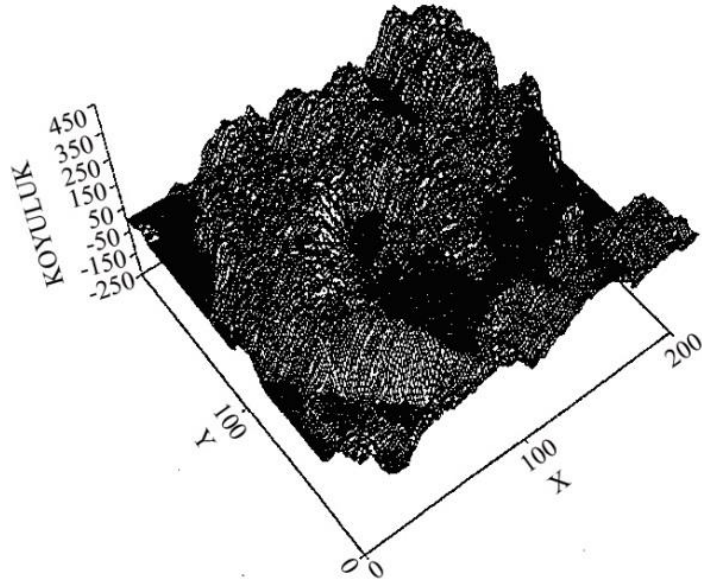
Unitt (1975) partikül yönlenmesinin istatistiksel dağılımının elde edilmesi için “koyuluk eğimi” (intensity gradient) yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde görüntüdeki noktalarda koyuluk yönü belirlenmektedir. Basitçe Şekil 2.18’de verilen konturların normal vektörleri koyuluk eğimini vermektedir. Bu yüzden belirtilen vektörler partikül kenarlarını yansıtan çizgi veya bölgelere dik vektörlerdir. Görüntüdeki tüm noktalar için koyuluk eğimleri tespit edilerek belirli açısız bölgeye düşen vektörlerden partikül

yönlenme histogramları veya rozet diyagramları oluşturulmaktadır. Bu konuda Unitt ve Tovey çok sayıda makale sunmuşlardır.



Şekil 2.16: Kaolin numunesinden alınan yatay kesit SEM mikrografı (Anandarajah vd. 1996).

SEM fotoğraflarının bu yöntemle incelenmesinde mantıklı histogramlar elde edilebildiği gibi yapay sivrilikler içeren gerçekçi olmayan histogramlar da elde edilebilmektedir. Şekil 2.17 ve 2.19’da düz alanlar histogramlardaki sivriliklere neden olmaktadır. Bu düz alanlarda koyuluk eğimi belirsizdir. Bu eksikliğin giderilmesi için Anandarajah vd. (1996) kontur yönü yöntemini (contour direction method) (CDM) önermişlerdir. CDM yönteminde konturlar eşit parçalara ayrılmakta ve her bir parçanın x eksenine göre yönü hesaplanmaktadır. Bu yönler yaklaşık olarak partikül kenarlarıyla çakışmaktadır. Partiküllerin açısal dağılımı, belirli açısal bölgelere düşen görüntüdeki tüm kontur parçalarının yönlerinin yığılması ile elde edilmektedir. Sadece görüntüdeki belirgin konturlar göz önüne alınmaktadır böylece koyuluk eğimi yönteminde hatalı tanımlanan konturlar yöntemde yer almamaktadır. Ayrıca düz alanlarda doğal olarak yöntemde yer almamaktadır.

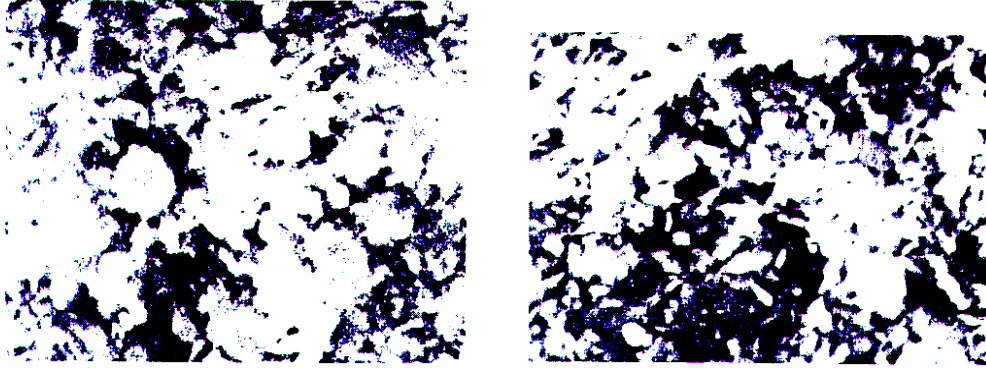


Şekil 2.17: Koyuluğun topografik görüntüsü
(Anandarajah vd. 1996).



Şekil 2.18: Koyuluk konturları (Anandarajah vd. 1996).

Şekil 2.19’de 50kPa’lık konsolidasyon basıncında bir boyutlu konsolidasyona maruz kalmış kaolin kilinden alınan yatay ve düşey kesitlerin SEM fotoğrafları verilmiştir. Şekil 2.20.a ve b’deki histogramlar Şekil 2.19’de verilen kesitlerden elde edilmiştir.

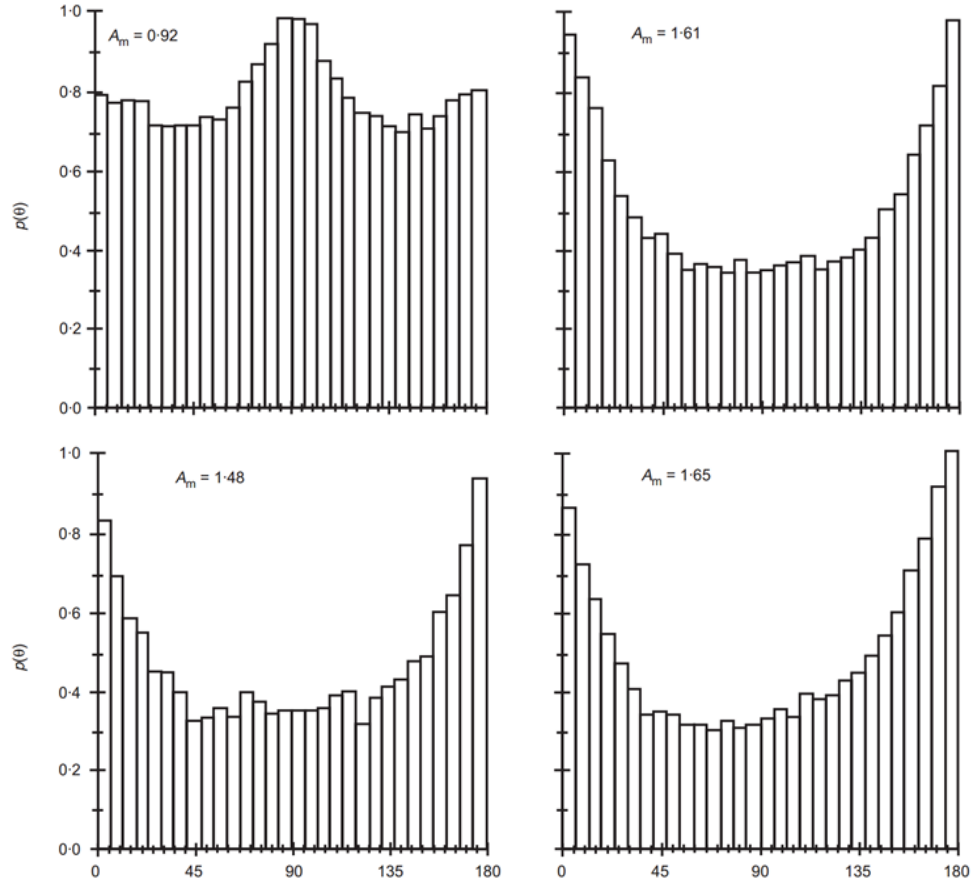


Şekil 2.19: 50 kPa konsolidasyon basıncı altında bir boyutlu konsolidasyon uygulanmış kaolin kilinin SEM mikrografları; a) yatay kesit, b) düşey kesit (Kuganenthira vd. 1996).

Histogramlar $0 < \theta < 180^\circ$ aralığında yatay eksene göre partikül yönlenme dağılımını göstermektedir. Bir boyutlu konsolidasyona maruz kalmış numunenin konsolidasyon yönüne dik kesitinde (yatay kesit) partikül yönlenme histogramı üniform olmalıdır. Şekil 2.20.a’ da verilen histogram yaklaşık olarak üniformdur. Ancak biraz açısal sapma gözlenmiştir. Bunun nedeni ise kesitin tam anlamıyla yatay olmamasıdır. Bu durum kullanılan kesit alma yönteminden kaynaklanmaktadır (Barden ve Sides 1971, Tovey 1971). Şekil 2.20.b’de ise partikül yönlenmesindeki sapma belirgindir. Şekil 2.20.c bir boyutlu konsolidasyon basıncının 4 katı olan 200 kPa’lık isotropik basınç altında konsolide edilmiş numuneden alınan düşey kesitin histogramını göstermektedir. Partikül yönlenmesindeki sapmada azalma görülmektedir. Şekil 2.20.d standart drenajsız üç eksenli deneyinde %18 eksenel deformasyonda göçme durumundaki numuneden alınan düşey kesitten elde edilen histogramı göstermektedir. Partikül yönlenmesindeki sapmada artış görülmektedir (Kuganenthira vd. 1996).

Literatürde kilin mikroyapısının SEM fotoğraflarından otomatik olarak nicelenmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. (Tovey ve Sokolov 1980, Sergeev vd. 1985) partikül yönlenmesinin incelenmesi için Fourier analizlerinden faydalanmışlardır. Tovey (1980), Russ (1990) ve Tovey vd.(1992) dijital ortama aktarılan görüntülerden koyuluk eğimi yöntemini kullanarak roset diyagramlarını oluşturmuşlardır. Luo vd. (1992) partikül

yönlenmesinin otomatik olarak incelenmesi için bir yöntem önermişlerdir. Martinez-Nistal vd. (1999) kil zeminlerin dokusu ile geoteknik davranışını ilişkilendiren yeni bir görüntü işleme yöntemi ile doku yönlenmesini incelemişlerdir.

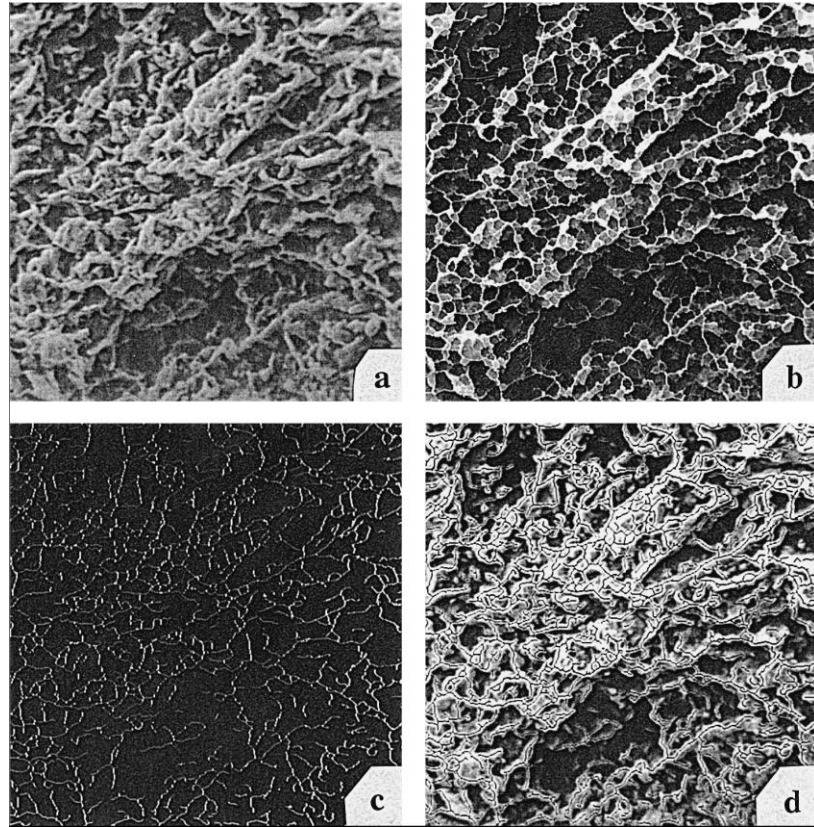


Şekil 2.20: SEM mikrograflarından elde edilen partikül yönlenme histogramları: a) 50 kPa konsolidasyon basıncında bir boyutlu konsolide edilmiş numuneden alınan yatay kesit, b) 50 kPa konsolidasyon basıncında bir boyutlu konsolide edilmiş numuneden alınan düşey kesit, c) 200 kPa konsolidasyon basıncında izotropik olarak konsolide edilmiş numuneden alınan düşey kesit, d) Üç eksenli kesme deneyinde numune göçtükten sonra alınan düşey kesit (Kuganenthira vd. 1996).

Martinez-Nistal vd. (1999) Şekil 2.21.a’da verilen SEM görüntüsünü 512*512 piksel boyutunda dijital ortama aktarmışlardır. Görüntüdeki açık renkli bölgeler bağlantıları korunarak çizgi şeklinde inceltilmiştir (Şekil 2.21.b). Her bir inceltme işleminde, açık renkli bölgenin sınırındaki piksel (bir tarafında açık renkli diğer tarafında koyu renkli pikseller bulunan, 8 pikselle çevrelenmiş piksel) açık renkli bölgenin sürekliliğini bozmayacak şekilde silinmektedir. Silme işlemi bahsedilen pikselin gri değerine koyu

rengin atanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu işlem 20 adımda gerçekleştirilerek (Şekil 2.21.c)'de verilen açık renkli çizgiler içeren filtrelenmiş görüntü elde edilmiştir.

Yönlenmenin incelenbilmesi için bu çizgilerin arka fondan ayrıştırılması gerekmektedir. Bu ayrıştırma işlemi, tüm piksellerin parlaklığının belirlenen değerden büyük olanları açık renkli çizginin bir parçası olurken, diğerleri arka fonun bir parçası olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. Böylece, çizgilerin beyaz, arka fonun siyah olduğu iki renkten oluşan görüntü elde edilmiş olmaktadır. Bu işlem sonucunda beyaz çizgiler tek piksel genişliğine inceltilmektedir. Bu inceltme işlemi sonucunda elde edilen çizgiler Şekil 2.20.a'daki SEM görüntüsü üzerine siyah renkli olarak yansıtıldığında, çizgilerin temsil ettiği açık renkli bölgelerin kontrolü gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2.21.d).



Şekil 2.21: Görüntü işleme süreci: a) Killi zeminin SEM mikrografi, b) İnceltme süreci, c) İnceltme sürecinin son hali, d) elde edilen çizgi haritasının SEM mikrografi üzerine yansıtılmış hali (Martinez-Nistal vd. 1999).

Doku yönlenmesinin hesabı elde edilen çizgi haritası kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu adım Montoto (1982) tarafından önerilen, çizgiler takip

edilerek çizgilere ait piksellerin koordinatlarının tespit edilmesi ile oluşturulan tablolarla gerçekleştirilmiştir. Bu tablolarla temsil edilen çizgiler, belirli bir toleransta parça parça doğrularla modellenmiştir (Şekil 2.22.a-b). Doku yönlenmesi her bir parçanın boyu ve yönlenmesi hesaplanarak elde edilmektedir (Tablo2.2). Elde edilen doku yönlenmesi, her bir çubuğun 10° lik doğrultuyu gösterdiği aralıkta doğru parçalarının rölatif büyüklüklerini gösterdiği Şekil 2.23’de verilen histogramla verilmiştir. Bu histogramdan doku yönlenme parametresi θ ve anizotropi derecesi L hesaplanabilmektedir.

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i} \right] \quad (2.22)$$

Burada;

n : Doğru parçası sayısını göstermektedir.

Doğru parçaları farklı uzunlukta ise eşitlik

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n l_i * \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n l_i * \cos \theta_i} \right] \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;

l_i : Her bir doğru parçasının uzunluğunu göstermektedir.

Doğru parçalarının oluşturduğu bileşke vektör (L) örnekteki doğru parçaları dağılımına bağlıdır ve

$$L = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i * \cos \theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n l_i * \sin \theta_i \right)^2} \quad (2.24)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Bileşke vektörün uzunluğunun her bir vektörün uzunlukları toplamına oranı ile numunenin anizotropi derecesi $\bar{L}$ elde edilmektedir.

$$\bar{L} = \frac{L}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (2.25)$$

$\bar{L}$ değeri dağınıklığın bir ölçüsüdür ve 0 la 1 arasında değişmektedir. $\bar{L}$ nün büyük değerleri düşük oranda dağınıklığı (anizotropik dokuyu), küçük değerleri büyük oranda dağınıklığı (isotropik dokuyu) göstermektedir. Böylece $\bar{L}$ değeri doku yönlenmesi indeksi olarak kullanılabilir. Martinez-Nistal vd. (1999) $\bar{L}$ değerini kullanarak doku yönlenmesine göre sınıflama sistemini sunmuşlardır. Buna göre

$\bar{L} = 1$: maksimum derecede izotropik yönlenme

$0.21 < \bar{L} < 1$: çok yönlenmiş doku

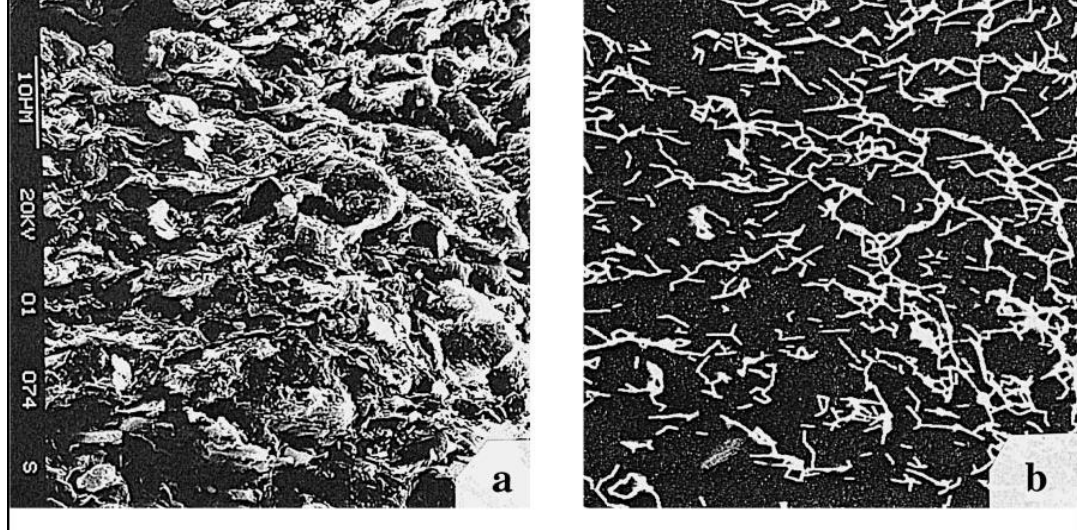
$0.15 < \bar{L} < 0.21$: az yönlenmiş doku

$\bar{L} < 0.15$: rastgele yönlenmiş doku

Yazarlar önerdikleri yöntemi Pisa Kulesi temel zeminindeki kil tabakalarına uygulamışlardır (Şekil 2.24). Alt kil tabakasından üst kil tabakasına doğru isotropik yönlenmenin ve anizotropik dokunun arttığını göstermişlerdir (Şekil 2.25). Üst kil tabakasındaki doku anizotropisinin Pisa Kulesinin oluşturduğu basınçtan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu tür dokunun kripi davranışına neden olacağını belirtmişlerdir. İotropik yönlenmenin yani anizotropik dokunun karşılıklı kil partiküllerinde negatif yüklü yüzeylerin karşı karşıya gelmesi sonucu partiküller arasında itme kuvvetlerinin oluşabileceğini ve bu yüzden partiküllerin birbiri üzerinde kaymasının kolaylaşacağını belirtmişlerdir.

Krizek vd. (1975) yaptıkları deneysel çalışmada, kaolin kilini dağınıklaştırılmış ve yumaklaştırılmış mikroyapıda hazırlayarak mikroyapıyı nicelik ve nitelik açısından tanımlamışlardır. İotropik ve anizotropik konsolidasyonla hazırladıkları numuneleri taramalı elektron mikroskobu, XRD ve optik mikroskopla inceleyerek kil partiküllerinin ilişkilerini ve yönelimlerini incelemişlerdir. Anizotropik konsolidasyon sonucunda kil partiküllerinde yönlenme, izotropik konsolidasyon sonucunda ise rastgele bir dağılım gözlemlemişlerdir. Anizotropik konsolidasyon uygulanan numunelerde gerilmenin

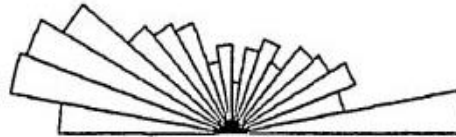
arttırılması ile yönlenmenin de artış gösterdiğini, başlangıçta dağınık mikroyapıya sahip süspansiyonda yumaklaşmış mikroyapıya sahip süspansiyondan daha fazla yönlenmenin görüldüğünü belirtmişlerdir. Konsolidasyon basıncının düşük değerlerinde (200kPa) önemli ölçüde yönlenmenin görüldüğünü belirtmişlerdir.



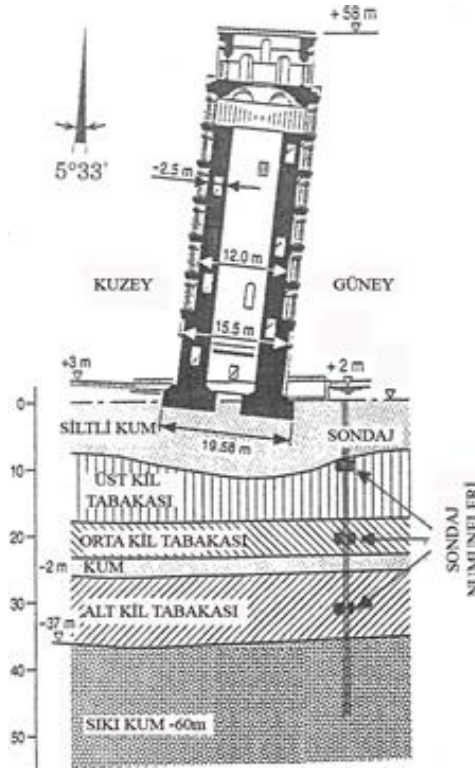
Şekil 2.22: Pleistocene jeolojik oluşumlu Pappadai kilinin ödometre deneyi sonunda a) SEM mikrografları, b) Görüntü işleme ile inceltilmiş görüntü (Martinez-Nistal vd. 1999).

Tablo 2.2: Vektör yönlenmesi değerleri (10° lik aralıklarla).

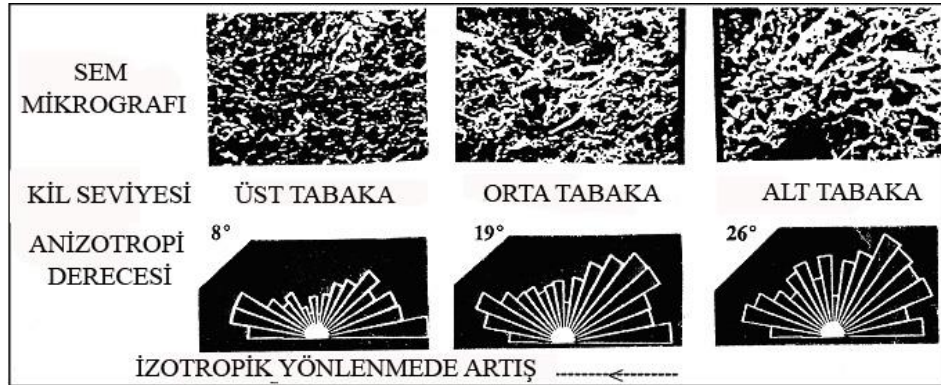
Vektör yönlenmesi	Pixel boyutu	Vektör yönlenmesi	Pixel boyutu
0 - 9	1230.273	90 - 99	447.034
10 - 19	615.617	100 - 109	368.720
20 - 29	706.483	110 - 119	600.564
30 - 39	612.502	120 - 129	644.110
40 - 49	569.244	130 - 139	712.442
50 - 59	412.946	140 - 149	1025.191
60 - 69	505.664	150 - 159	1160.159
70 - 79	436.922	160 - 169	1192.857
80 - 89	259.597	170 - 179	909.174



Şekil 2.23: Yönlenme histogramı (Martinez-Nistal vd. 1999).



Şekil 2.24: Pisa kulesi ve temel zemini kesiti (Martinez-Nistal vd. 1999).



Şekil 2.25: Pisa kulesi temel zeminindeki kil tabakalarının SEM mikrografları ve görüntü işleme süreci sonunda elde edilen anizotropi dereceleri (Martinez-Nistal vd. 1999).

Martin ve Ladd (1978) XRD kullanarak bir boyutlu anizotropik (K_0) yükleme durumunda gelişen doku anizotropisini incelemek için sistematik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında kaolin kili konsolide edildiğinde kil partikülleri yüzeyleri yükleme yönüne dik olacak şekilde yerleştiğini göstermişlerdir. Konsolidasyonun başlangıç aşamasında partikül yönlenmesi oranının yüksek olduğunu ve gerilme artımıyla bu oranın azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında

konsolide ettikleri numuneyi kalıptan çıkararak yükleme yönünü 90° değiştirerek tekrar yüklediklerinde ilk konsolidasyon basıncının 32 katında dahi ilk yükleme aşamasında oluşan anizotropi yönünü tamamen geri çevirememişlerdir. Ting (1968) ise Ko yükleme durumunda konsolide edilmiş numunenin üç eksenli deney aletinde Ko konsolidasyon basıncının 3 katı kadar izotropik gerilme durumunda yüklenmesi ile numunenin izotropik davranış sergilediğini yani yatay ve düşey numunelerin hemen hemen benzer gerilme deformasyon davranışı sergilediğini, izotropik yükleme altında eksenel ve radyal deformasyon artımlarının hemen hemen aynı olduğunu belirtmiştir. Anandarajah vd. (1996) kaolin kilinde Ko konsolidasyon basıncının 2 katı izotropik basınç altında numunenin deformasyon açısından izotropik davranış sergilediğini ancak partikül yönelmesine göre halen anizotrop olduğunu göstermişlerdir (Anandarajah vd. 1996).

2.3. ZAMANA BAĞLI MALZEME DAVRANIŞ MODELİ

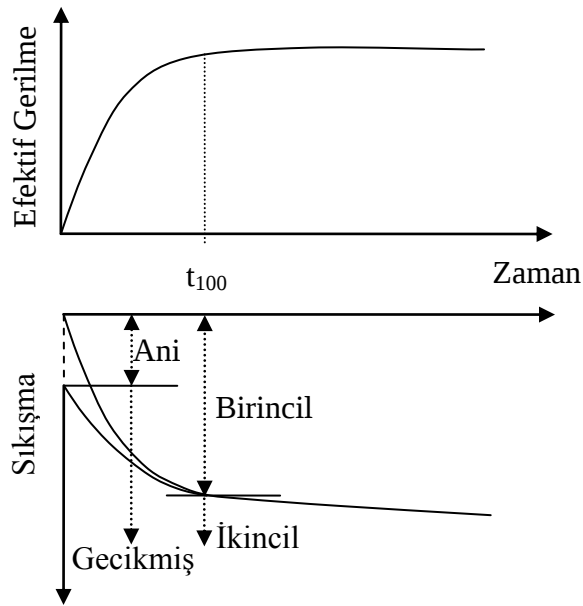
Literatürde düşük deformasyon hızında oluşan boşluk suyu basıncının yüksek deformasyon hızında oluşan boşluk suyu basıncından daha büyük olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur. Richardson ve Whitman (1963), Sheahan vd. (1996) deformasyon hızı artışıyla dayanımda meydana gelen artışın başlıca nedeninin boşluk suyu basıncındaki düşüş olduğunu belirtmişlerdir. Zhu vd. (1999) normal konsolide yoğrulmuş kilde drenajsız üç eksenli basınç ve çekme deneylerinde düşük deformasyon hızlarının yüksek boşluk suyu basıncı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte Alberro ve Santoyo (1973) boşluk suyu basıncının deformasyon hızından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Lefebvre ve LeBoeuf (1987) yapılanmış kilde boşluk suyu basıncı gelişiminin deformasyon hızından bağımsız olduğunu ancak normal konsolide kilde deformasyon hızının boşluk suyu basıncı üzerinde önemli derecede etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Yoshikuni vd. (1994,1995) konsolidasyon ve gerilme gevşemesi aşamalarından oluşan özel bir ödometre deney aleti kullanmışlardır. Deneyde drenajın önlenmesi ile sabit hacimsel deformasyonda gerilme gevşemesi deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar önemli ölçüde boşluk suyu basıncı artışı gözlemlendiğini bildirmişlerdir. Boşluk suyu basıncının gerilme gevşemesinin başlamasından önce konsolidasyon periyodu için geçen süre ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 2.9'da 1.durum kısa süreli

konsolidasyonu ve yüksek deformasyon hızını göstermektedir. İkincil konsolidasyonun durdurulduğu deformasyon hızı ne kadar yüksekse oluşan ilave boşluk suyu basıncı da o kadar yüksektir. Holzer vd. (1973) izotropik konsolidasyon deneylerinden benzer sonuçları elde etmişlerdir.

2.3.1. Zamana Bağlı Davranışı Tanımlamak İçin Viskoplastik Bünye Modelleri

Bjerrum (1967) bir zaman çizgisi modeli önermiştir. Modelde zeminin sıkışması ani (zamandan bağımsız) ve gecikmiş (zamana bağlı) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.26). Ani ve gecikmiş sıkışma kavramları 1 boyutlu sıkışma için önerilmiş olsa da 1 veya 3 boyutlu sıkışma için yaygın olarak kabul görmüştür. Ani sıkışma efektif gerilmedeki artış ile eş zamanlı oluşarak denge haline kadar boşluk oranında azalmaya sebep olur. Gecikmiş sıkışma efektif gerilmede değişim olmadan zamanla hacimdeki azalmayı yansıtmaktadır.

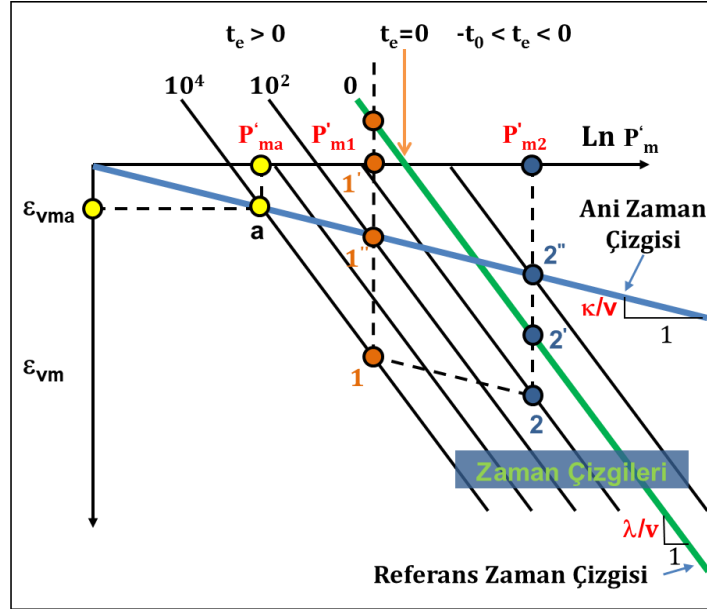


Şekil 2.26: Birincil ve ikincil konsolidasyon, ani ve gecikmiş sıkışmanın şematik gösterimi (Zhu, J.G., 1999).

2.3.2. Elastik-Visko-Plastik Model

Bjerrium (1967) çalışmalarına dayanarak Yin (1990), Yin ve Graham (1989,1994) 1 boyutlu elastik viskoplastik malzeme davranış modelini önermişlerdir. Bu modelde ani zaman çizgisi, referans zaman çizgisi ve eşdeğer zaman çizgisi açıkça tanımlanmıştır

(Şekil 2.27). Model killerin viskoz davranışını, deformasyon hızı etkisini, krip ve gerilme gevşemesini başarıyla yansıtmaktadır.



Şekil 2.27: İzotropik gerilme koşullarında ani referans ve eşdeğer zaman çizgilerinin gösterimi (Zhu, J.G., 1999).

2.3.2.1. Ani Zaman Çizgisi

Modelde izotropik gerilme durumunda zeminin ani hacim değişimi elastik kabul edilmiştir.

$$\varepsilon_{vm}^e = \varepsilon_{vm0}^e + \frac{\kappa}{v} \ln \left(\frac{p'_m}{p'_u} \right) \quad (2.26)$$

Burada;

p'_u : birim referans ortalama efektif gerilme

p'_m : ortalama efektif gerilme

ε_{vm0}^e : $p'_m = p'_u$ değerindeki hacimsel deformasyon

v : özgül hacim ($v = 1 + e$)

κ/v : Modelde malzeme parametresi ($\varepsilon_{vm} - \ln p'_m$ düzleminde ani zaman çizgisi eğimi)

m : izotropik gerilme durumunu belirtmektedir

2.3.2.2. Zaman Çizgileri

Eşdeğer zaman çizgisi (t_e), göz önüne alınan $\varepsilon_{vm} - \ln p'$ düzlemindeki bir noktaya referans zaman çizgisinden krip sonucu ulaşılması için geçen zamandır. Referans zaman çizgisi eşdeğer zaman çizgileri için bir başlangıç teşkil etmektedir. Referans zaman çizgisinde eşdeğer zaman sıfırdır ($t_e = 0$). Bu yüzden referans zaman çizgisinin altında kalan eşdeğer zaman (+) yani ($0 < t_e < \infty$), üstünde kalan eşdeğer zaman ise (-) yani ($-t_0 < t_e < 0$) dır. Burada t_0 modelde kullanılan bir parametredir.

Modelde eşdeğer zaman krip hızı ile ilişkilendirilmiştir. Büyük eşdeğer zaman küçük krip hızına ($\dot{\varepsilon}_{vm}$) karşılık gelmektedir. Eşdeğer zamana dayanarak ($\varepsilon_{vm} - p_m - t_e$) veya ($\varepsilon_{vm} - p_m - \dot{\varepsilon}_{vm}$) arasındaki ilişki tekildir ve yükleme tarihçesinden bağımsızdır.

Yin ve Graham (1994,1999) referans zaman çizgisini,

$$\varepsilon_{vm}^r = \varepsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{v} \ln \left(\frac{p'_m}{p'_{m0}} \right) \quad (2.27)$$

olarak ifade etmişlerdir. Burada;

ε_{vm0}^r : $p'_m = p'_{m0}$ değerindeki referans zaman çizgisinde yer alan hacimsel deformasyon

λ/v : Modelde malzeme parametresi ($\varepsilon_{vm} - \ln p'_m$ düzleminde referans zaman çizgisi eğimi)

Modelde referans zaman çizgisi yeri belirlendiğinde diğer zaman çizgilerinin yeri $\varepsilon_{vm} - \ln p'_m$ düzleminde yerleştirilebilmektedir.

2.3.2.3. Krip Deformasyonu

Modelde Taylor (1943) tarafından ikincil konsolidasyon hesabı için önerilen eşitliğin benzer bir formu krip (gecikmiş) deformasyonun elde edilmesinde kullanılmıştır.

$$\varepsilon_{vm}^{vp} = \frac{\Psi}{v} \ln \left(\frac{t_0 - t_e}{t_0} \right) \quad (2.28)$$

Burada;

t_e : eşdeğer zaman

Ψ/v : Modelde malzeme parametresi ($\varepsilon_{vm} - \log t$ düzleminde eğrinin doğrusal kısmının eğimi)

t_0 : Referans zaman çizgisi seçimi için kullanılan eğri uydurma parametresi

Referans zaman çizgisi belirlendiğinde $p'_m, \varepsilon_{vm}, t_e$ arasındaki ilişki, eğer p'_m, t_e değerleri biliniyorsa ε_{vm}

$$\varepsilon_{vm} = \varepsilon_{vm}^r + \varepsilon_{vm}^e = \varepsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{v} \ln \left(\frac{p'_m}{p'_{m0}} \right) + \frac{\Psi}{v} \ln \left(\frac{t_0 - t_e}{t_0} \right) \quad (2.29)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Eğer p'_m, ε_{vm} değerleri biliniyorsa t_e Eşitlik 2.29'den, Eşitlik 2.30'daki gibi elde edilebilir.

$$t_e = -t_0 + t_0 \exp \left[\left(\varepsilon_{vm} - \varepsilon_{vm0}^r - \frac{\lambda}{v} \ln \left(\frac{p'_m}{p'_{m0}} \right) \right) \frac{v}{\Psi} \right] \quad (2.30)$$

2.3.2.4. İzotropik Gerilme Durumu İçin Genel Bünye Denklemi

dt süresince çok küçük yük artışı dp'_m için elde edilecek deformasyon artışı $d\varepsilon_{vm}$, elastik (anı) $d\varepsilon_{vm}^e$ ve viskoplastik $d\varepsilon_{vm}^{vp}$ deformasyon artımlarının toplamı olarak

$$d\varepsilon_{vm} = d\varepsilon_{vm}^e + d\varepsilon_{vm}^{vp} \quad (2.31)$$

eşitliği ile elde edilebilir.

$(\dot{p}_m - \varepsilon_{vm} - t_e)$ durumundaki herhangi bir zemin elemanı için, hacimsel deformasyon

hızı $\frac{d\varepsilon_{vm}}{dt}$ veya $\frac{d\varepsilon_{vm}}{dt_e}$ ile ifade edilebilir. Ancak $\frac{d\varepsilon_{vm}}{dt}$ ve $\frac{d\varepsilon_{vm}}{dt_e}$ birbirine eşit olmalıdır.

Bu tanıma göre hacimsel deformasyon hızı $\dot{\varepsilon}_{vm} = \frac{d\varepsilon_{vm}}{dt} = \frac{d\varepsilon_{vm}}{dt_e}$ şeklinde ifade edilebilir.

Böylece Eşitlik 2.31

$$\dot{\varepsilon}_{vm} = \dot{\varepsilon}_{vm}^e + \dot{\varepsilon}_{vm}^{vp} \quad (2.32)$$

formunda yazılabilir. Eşitlik 2.28'den viskoplastik deformasyon hızı

$$\varepsilon_{vm}^{vp} = \frac{\psi}{v} \frac{1}{t_0 - t_e} \quad (2.33)$$

olarak elde edilir. Eşitlik 2.30'daki t_e Eşitlik 2.31'de yerine yazılarak

$$\dot{\varepsilon}_{vm}^{vp} = \frac{\psi}{vt_0} \exp \left[\left(\varepsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\dot{p}_m}{\dot{p}_{m0}} - \varepsilon_{vm} \right) \frac{V}{\psi} \right] \quad (2.34)$$

Eşitlik 2.26'in türevi alınarak

$$\dot{\varepsilon}_{vm}^e = \frac{\kappa}{v} \frac{\dot{\dot{p}}_m}{\dot{p}_m} \quad (2.35)$$

elde edilir. Eşitlik 2.34 ve 24, Eşitlik 2.32'de yerlerine yazılarak, izotropik gerilme durumu için elastik viskoplastik malzeme davranış modelinin eşitliği

$$\dot{\varepsilon}_{vm} = \frac{\kappa}{v} \frac{\dot{\dot{p}}_m}{\dot{p}_m} + \frac{\psi}{vt_0} \exp \left[\left(\varepsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\dot{p}_m}{\dot{p}_{m0}} - \varepsilon_{vm} \right) \frac{V}{\psi} \right] \quad (2.36)$$

olarak elde edilir.

2.3.2.5. Modelin 3 Boyutlu Formülasyonu

Deformasyonların küçük olduğu kabulü ile toplam deformasyon hızı ($\dot{\varepsilon}_{ij}$), elastik ($\dot{\varepsilon}_{ij}^e$) ve viskoplastik ($\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$) deformasyon hızlarının toplamıdır.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \quad (2.37)$$

Sekiguchi (1977) ve Nova (1982) tarafından önerilen modellerde olduğu gibi viskoplastik deformasyon hızı

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = S \frac{\partial Q}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (2.38)$$

Akma kuralı ile belirlenmektedir.

Burada;

Q : Viskoplastik potansiyel fonksiyon

S : Skaler fonksiyon

Modelde birleşik akma kuralı uygulandığından viskoplastik potansiyel fonksiyonu akma yüzeyi fonksiyonuna eşit alınmıştır

$$Q = F(\sigma'_{ij}, k) = 0 \quad (2.39)$$

Böylece viskoplastik deformasyon hızı

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = S \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (2.40)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Akma yüzeyi fonksiyonu olarak modifiye cam kili (MCC) modelindeki akma yüzeyi seçilmiştir.

$$F = p'^2 + \frac{q^2}{M^2} - p' p'_m = 0 \quad (2.41)$$

Burada;

p' : ortalama efektif gerilme ($p' = \sigma'_{ij}/3$)

q : deviator gerilme ($q = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$, $s_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij}p'$, $i = j \Rightarrow \delta_{ij} = 1$, $i \neq j \Rightarrow \delta_{ij} = 0$)

M : p' - q düzleminde kritik durum çizgisi eğimi

Eşitlik 2.40 ve 30'dan viskoplastik hacimsel deformasyon hızı

$$\dot{\epsilon}_v^{vp} = S \frac{\partial F}{\partial p} = 2(2p' - p_m') \quad (2.42)$$

şeklinde elde edilir. MCC modeline benzer şekilde akma yüzeyinde viskoplastik hacimsel deformasyon hızı sabit kabul edilmiştir ($\dot{\epsilon}_v^{vp} = \dot{\epsilon}_{vm}^{vp}$). Burada $\dot{\epsilon}_{vm}^{vp}$, p_m' gerilmesine karşılık gelen hacimsel deformasyon hızıdır.

Eşitlik 2.34'deki $\dot{\epsilon}_{vm}^{vp}$ yerine Eşitlik 2.42'deki $\dot{\epsilon}_v^{vp}$ yazılırsa, skaler fonksiyon (S);

$$S = \frac{\psi}{vt_0} \exp \left[\left(\epsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{p_m'}{p_{m0}'} - \epsilon_{vm} \right) \frac{V}{\psi} \right] \frac{1}{2p' - p_m'} \quad (2.43)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik 2.43'deki skaler fonksiyon (S), Eşitlik 2.40'da yerine yazılırsa viskoplastik deformasyon hızı;

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{\psi}{vt_0} \exp \left[\left(\epsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{p_m'}{p_{m0}'} - \epsilon_{vm} \right) \frac{V}{\psi} \right] \frac{1}{2p' - p_m'} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}'} \quad (2.44)$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik 2.37'deki elastik deformasyon hızı (isotropik elastik kabulüyle)

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{2G} s_{ij} + \frac{\kappa}{3v} \frac{\dot{p}'}{p'} \delta_{ij} \quad (2.45)$$

şeklinde verilmektedir. ($K = p' / (\kappa / v)$)

Eşitlik 2.44 ve 34, Eşitlik 2.37'da yerlerine yazılarak, 3 boyutlu elastik viskoplastik malzeme modeli

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} s_{ij} + \frac{\kappa}{3v} \frac{\dot{p}'}{p'} \delta_{ij} + \frac{\psi}{vt_0} \exp \left[\left(\epsilon_{vm0}^r + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{p_m'}{p_{m0}'} - \epsilon_{vm} \right) \frac{V}{\psi} \right] \frac{1}{2p' - p_m'} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}'} \quad (2.46)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada; $(\partial F / \partial \sigma_{ij}')$ terimleri Eşitlik 2.41 kullanılarak, (ϵ_{vm}) ise Eşitlik 2.36 kullanılarak hesaplanmaktadır.

Kritik durum zemin mekaniği uzayında model;

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{\kappa \dot{p}'}{vp'} + S(2p' - p'_m) \quad (2.47)$$

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{1}{3G} \dot{q} + S \frac{2q}{M^2} \quad (2.48)$$

eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

Modelde κ/v , λ/v , ψ/v , ϵ_{vm0}^r , p'_{m0} , t_0 , M ve G olmak üzere toplam sekiz parametre kullanılmıştır. Bu parametrelerin elde edilmesine ilişkin detaylar Zhu (1999)'da verilmiştir.

Yin ve Graham (1999) tarafından önerilen elastik viskoplastik modelde κ/v , λ/v , ψ/v , ϵ_{vm0}^r , t_0 , p'_{mo} parametrelerini çok kademeli izotropik konsolidasyon deneyinden, M ve G parametresini üç eksenli basınç veya çekme deneyinden elde etmişlerdir.

2.3.2.6. Elastik-Visko-Plastik Model (Anizotropik)

Zhou vd. (2005), Yin ve Graham (1999) tarafından önerilmiş modelin geliştirilmiş bir hali olan 3 boyutlu anizotropik elastik viskoplastik modeli sunmuşlardır. Modelde Ko konsolidasyon durumundaki killerin zamana bağlı davranışını incelemek için geliştirilmiştir. Modelde izotropik veya Ko yükleme koşullarında hacimsel krip deformasyonunun bir limite sahip olduğu doğrusal olmayan krip fonksiyonunu kullanmışlardır.

Modelde Dafalias (1987), Korhonen ve Lojander (1987) ve Wheeler vd. (2003) tarafından kullanılmış olan akma yüzeyi fonksiyonu (Q)

$$Q = (q - \alpha p')^2 / M^2 - (1 - \alpha^2 / M^2) (p'_m - p') p' = 0 \quad (2.49)$$

ve genel gerilme durumunu ele alabilmek amacıyla Xin (1988) tarafından önerilen şekil fonksiyonu π düzlemindeki göçme yüzeyi için

$$g_{(\theta)} = \frac{K'}{(2K' - 1) + (1 - K') \left[\sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) + \sqrt{3} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right]} \quad (2.50)$$

birlikte kullanmışlardır. Burada K' parametresi

$$K' = \frac{(3 - \sin \phi')}{(3 + \sin \phi')} \quad (2.51)$$

eşitliği ile tanımlıdır. ϕ' kayma mukavemeti açısıdır. θ Lode açısı

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right) \quad (2.52)$$

eşitliği ile tanımlıdır. J_2 ve J_3 deviatorik gerilme tensörünün ikinci ve üçüncü invariantlarıdır.

Wheeler vd. (2003) yumuşak killer için yeni bir anizotropik elastoplastik model sunmuşlardır (S-CLAY1). Model önerisini desteklemek amacıyla Otaniemi kili üzerinde yapılmış drenajlı üç eksenli deneyinden elde edilen gerilme izleri verilmiştir. Deneyler, farklı deformasyon durumlarında akma yüzeyi eğimini incelemek ve gerekli pekleşme kuralını tanımlayabilmek için özel olarak tasarlanmıştır.

S-CLAY1, anizotropik plastik davranışın eğik akma yüzeyi ile temsil edildiği, deformasyonların oluşması ile doku anizotropisinin oluşması veya bozulmasının modellenebilmesi için pekleşmenin dönen bileşeni ile temsil edildiği kritik durum zemin modelinin bir uzantısıdır

2.3.2.7. Elastik Davranış

Depolanma ve konsolidasyon sonrası normal konsolide killerin elastik davranışı genelde 5 bağımsız parametre ile tanımlanan çapraz anizotropik davranıştır (Graham ve Houlsby 1983). S-CLAY1 gibi anizotropinin gelişmesi veya bozulmasını dikkate alan bir modelde anizotropik elastik davranışın kullanılması yüklemenin ileriki aşamalarında elastik anizotropinin değişmesine imkan sağlamalıdır. Böyle bir durum 21 bağımsız parametre ile tanımlanan en genel elastik anizotrop davranışın ele alınmasıdır ki davranış modelinin çok karmaşık olmasına neden olur.

S-CLAY1 normal konsolide veya aşırı konsolidasyon oranının düşük olduğu yumuşak killerin davranışını incelemek için geliştirilmiştir. Gerilmelerdeki çok küçük artışların akmaya neden olduğu bu tür zeminlerde plastik deformasyonlar baskın rol oynamaktadır. Bu nedenle elastik deformasyonlar ihmal edilebilir mertebede

kalmaktadır. Modeldeki basitliğin korunması için elastik davranış izotrop kabul edilmiştir.

Modelin basitliğini korumak ve uygulamada yumuşak killerin modellenmesinde en temel gereksinim olan plastik deformasyonların oluşumu ve ilerlemesini modelleyebilmek için doğrusal olmayan küçük deformasyonların incelendiği, sınır yüzey (bounding surface) formülasyonu (Dafalias ve Hermann 1982, Whittle ve Kavvadas 1994) veya çoklu akma yüzeyi (multiple yield surfaces) (Al-Tabbaa ve Wood 1989, Stallebrass 1990) modelde kullanılmamıştır. Bu kabul, doğrusal olmayan küçük deformasyonların çok önemli olduğu aşırı konsolide kil davranışı için geçerli değildir. Elastik bölgede yükleme boşaltma eğrisinin çakışık olduğu model tekrarlı yükleme ve kazı modellemesi için uygun değildir.

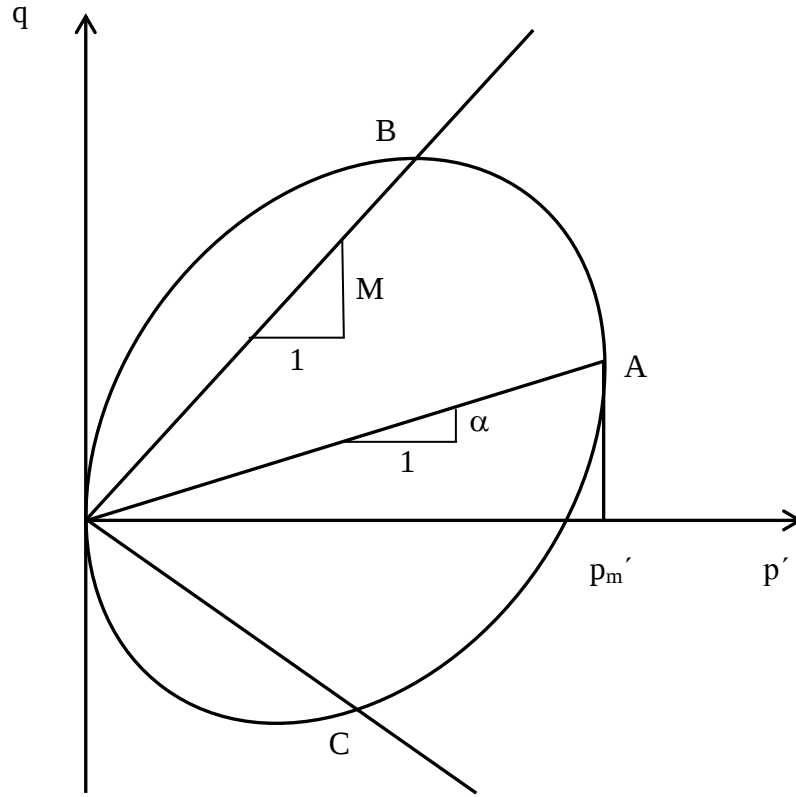
2.3.2.8. Akma Eğrisi

Modelde akma eğrisi olarak, Dafalias (1987), Korhonen ve Lojander (1987) tarafından önerilen basitleştirilmiş üç eksenli gerilme uzayında kesilmiş (sheared) elips kullanılmıştır. Akma eğrisi Eşitlik 2.53 ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir,

$$f = (q - \alpha p')^2 - (M^2 - \alpha^2)(p_m' - p')p' = 0 \quad (2.53)$$

p_m' ve α sırasıyla akma eğrisinin büyüklüğünü ve eğimini tanımlamaktadır. α 'nın değeri zeminin plastik anizotropisinin ölçüsüdür. $\alpha = 0$ için zemin davranışı izotropdur ve akma eğrisi modifiye Cam kili modelindeki aynı olur.

Akma eğrisinin orijinde ve A noktasında ($\eta = \alpha$) düşey, akma eğrisinin kritik durum çizgisi ile kesiştiği ($\eta = \pm M$) üç eksenli basınç ve çekme durumlarına karşılık gelen B-C noktalarında akma eğrisi eşitliğindeki $(M^2 - \alpha^2)$ teriminden kaynaklanan yatay teğeti vardır (Şekil 2.28). Üç eksenli basınç ve çekme durumları için M değeri ($\eta - \alpha$)nın pozitiften negatife doğru değişmesi ile farklı değerler alabilir. Ancak M değerinin basitçe değiştirilmesi akma eğrisinde istenmeyen süreksizliklerin oluşmasına neden olur.



Şekil 2.28: S-CLAY1 modeli akma yüzeyi (Wheeler vd. 2003).

2.3.2.9. Akma Kuralı

Deneysel çalışmalar sonucunda Graham vd. (1983), Korhonen ve Lojender (1987) yumuşak killler için eğik akma eğrisinin kullanılması durumunda birleşik akma kuralının kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ancak, Davies ve Newson (1993), Whittle ve Kavvadas (1994) birleşik olmayan akma eğrisinin kullanılmasını önermektedirler. S-CLAY1 modelinde basitliğin korunması ve literatürde aksine bir fikir birliği sağlanamaması nedeni ile birleşik akma kuralı kullanılmıştır.

$$\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2(\eta - \alpha)}{M^2 - \eta^2} \quad (2.54)$$

2.3.2.10. Pekleşme Kuralı

S-CLAY1 modeli iki pekleşme kuralını içermektedir. Birincisi modifiye cam kili modelinde kullanıldığı gibi sadece hacimsel plastik deformasyonlarla ilişkilendirilmiş ve akma eğrisi büyüklüğünün değişimini tanımlayan pekleşme kuralıdır.

$$dp'_m = \frac{vp'_m d\varepsilon_v^p}{\lambda - \kappa} \quad (2.55)$$

Burada λ isotropik yükleme altında isotropik numune için anizotropide değişimin olamadığı ($\alpha = \text{sabit}$) $v\text{-ln } p'$ düzleminde sabit η gerilme izi için sıkışma eğrisinin eğimidir. İkinci pekleşme kuralı ise, plastik deformasyonlar neticesinde anizotropideki gelişme veya bozulmayı temsil ederek akma eğrisi eğimindeki değişimi tanımlayan dönen pekleşme kuralıdır.

$$d\alpha = \mu \left[(\chi_v(\eta) - \alpha) < d\varepsilon_v^p > + \beta (\chi_d(\eta) - \alpha) |d\varepsilon_d^p| \right] \quad (2.56)$$

Hacimsel plastik deformasyonun (ε_v^p), α yı o anki gerilme oranı (η) ye bağlı $\chi_v(\eta)$ hedef değerine taşımaya çalıştığı kabul edilmiştir. Bu kabulün dayanağı, hacimsel plastik deformasyonların tanelerin temas noktalarındaki kaymayı kapsamasıdır. Bunun sonucu olarak anizotropik konfigürasyon ve tanelerin yeniden yerleşimi gerçekleşmektedir. Bu durum plastik deformasyonların olduğu gerilme durumunun anizotropisinin kontrolü altında gerçekleşmektedir. Eş zamanlı olarak, plastik kayma deformasyonun (ε_d^p), (α) yı o anki gerilme oranı (η) ye bağlı $\chi_d(\eta)$ hedef değerine taşımaya çalıştığı kabul edilmiştir. (ε_v^p) ve (ε_d^p) tanelerin farklı yeniden yerleşimleri için olduğundan $\chi_v(\eta)$ ve $\chi_d(\eta)$ değerleri birbirinden farklıdır. Pekleşme kuralındaki (β) parametresi bir zemin sabitidir. (β) parametresi, (ε_v^p) ve (ε_d^p) nin, (α) nın o anki değeri üzerine etkisini kontrol etmektedir. $\beta = 0$ limit durumunda sabit bir gerilme oranında (η) yükleme, (α) nın $\chi_v(\eta)$ asimptoduna yaklaşmasına neden olmaktadır. (α) ve $\chi_v(\eta)$ arasındaki fark, hacimsel plastik deformasyon artışı ile eksponansiyel olarak azalmaktadır. $\beta = \infty$ limit durumunda ise (α), plastik kayma deformasyonlarındaki artış ile $\chi_d(\eta)$ asimptoduna yaklaşmaktadır. Gerçek zeminde sonlu bir (β) değeri için (α), $\chi_v(\eta)$ ve $\chi_d(\eta)$ arasında bir değer almaktadır. (ε_v^p) nin hakim olduğu düşük gerilme oranlarında (α) değeri $\chi_v(\eta)$ değerine yaklaşmaktadır. (ε_d^p) nin hakim olduğu kritik duruma yaklaşan yüksek gerilme oranlarında (α) değeri $\chi_d(\eta)$ değerine yaklaşmaktadır. Gerilme oranının değişken olduğu herhangi bir gerilme

izinde (α) değeri sürekli olarak değişmektedir. Pekleşme kuralındaki (μ) zemin sabiti, (α) nın o anki hedef değerine yaklaşma oranını kontrol etmektedir. Pekleşme kuralında $|d\varepsilon_d^p|$ bileşenindeki mutlak değer işareti, plastik kayma deformasyonlarının, plastik kayma deformasyonu değişimi işaretinden bağımsız olarak her zaman (α) yı $\chi_d(\eta)$ hedef değerine taşımaya çalışmasını sağlamaktadır. Pekleşme kuralında $\langle d\varepsilon_v^p \rangle$ bileşenindeki $\langle \rangle$ işlem operatörü $d\varepsilon_v^p > 0 \Rightarrow \langle d\varepsilon_v^p \rangle = d\varepsilon_v^p$, $d\varepsilon_v^p \leq 0 \Rightarrow \langle d\varepsilon_v^p \rangle = 0$ anlamına gelmektedir. Böylece model kritik durumun kuru tarafında $d\varepsilon_v^p$ nin negatif değerleri için de anlamlı olmaktadır. $\langle \rangle$ işlem operatörünün kaldırılması kuru taraftaki akma durumunda (α) nın hedef değer olan $\chi_v(\eta)$ den sapmasına neden olur.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 ZAMANA BAĞLI KİL DAVRANIŞIN 1 BOYUTLU YÜKLEME ALTINDA İNCELENMESİ

Zamana bağlı kil davranışın bir boyutlu konsolidasyon şartlarında incelenmesi yük veya deformasyon hızı kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda klasik ödometre deney aleti boyut olarak küçük numunelerde yük kontrollü konsolidasyon deneylerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır. Aynı boyuttaki numunelerde deformasyon hızı kontrolü konsolidasyon deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için klasik ödometre hücrelerinde ve yükleme kollarında bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu iki deney tipinde de drenajsız yüzeyde yükleme nedeniyle oluşan ilave boşluk suyu basıncının takibi için ödometre hücresine boşluksuyu basıncı ölçer monte edilmiştir. Daha büyük boyuttaki numunelerde bir boyutlu konsolidasyon deneylerinin yük ve deformasyon hızı kontrolü ile gerçekleştirilmesi amacı ile büyük boyutlu hücreler imal edilmiştir. Bir boyutlu konsolidasyonda zamana bağlı kil davranışının incelenmesinde kullanılan modifiye edilmiş ödometre deney aleti ve büyük boyutta numunelerin konsolidasyonuna imkan sağlayan konsolidasyon hücresinin detayları bu bölümün alt bölümlerinde açıklanmıştır.

3.1.1. Ödometre Hücresinde Sabit Yük Artımı ve Deformasyon Hızı Kontrollü Konsolidasyon Deneyleri

Bu kısımda, laboratuvarında mevcut olan klasik yük kademesi kontrollü ödometre deney aletinde tek yönlü drenaja izin verilen durumda drenajsız yüzeyde boşluk suyu basıncı ölçümüne olanak sağlayacak değişiklik, boşluk suyu basınçlarının sağlıklı ölçümü için numuneye verilmesi gereken ters basıncın uygulanmasına olanak sağlayan değişiklik ve ödometre hücresinin deformasyon hızı kontrollü yükleme çerçevesinde kullanılarak deformasyon hızı kontrollü konsolidasyon deneyi yapılmasına olanak sağlayan değişiklik açıklanacaktır.

Bilindiği gibi yaygın olarak kullanılan ödometre hücrelerinde konsolidasyon süresince ilave boşluk suyu basıncı değişimi ölçümü yapılmadığından bu hücrelerde ne ters basınç uygulaması için bir düzenek ne de boşluk suyu basıncı ölçerlerin takılabileceği bir yer mevcut değildir. Ancak konsolidasyon süresince ilave boşluk suyu basıncının ölçümü, küçük boyutlu numune olduğu için birincil ve ikincil konsolidasyon bölgelerinin herhangi bir dolaylı hesaplamaya gerek kalmaksızın net bir şekilde ortaya koymaktadır. Klasik kademeli yük kontrollü ödometre deneyi kullanılarak zamana bağlı davranışın incelenmesinde birincil ve ikincil konsolidasyonun boşluk suyu basıncı ölçümü ile belirlenmesinin ve ters basınç uygulanmasının faydası kil yapısının mikro yapısının değişiminin takibinde ortaya çıkmaktadır. Bu konu kil yapısının değişimin incelendiği bölümde açıklanacaktır.

Ayrıca klasik ödometre deney hücresinin, deformasyon hızı kontrollü konsolidasyon deney hücresi olarak kullanılmasında, drenajsız yüzeyde ilave boşluk suyu basıncının takibi zaruridir.

Bu nedenlerden dolayı ödometre hücresinde Şekil 3.1’de gösterildiği gibi hücre tabanında delikler açılarak hücre çıkışında gerek boşluksuyu basıncı ölçerin doğrudan bağlanabileceği gerekse boru rekoru bağlantısı ile boşluksuyu basıncı ölçere ulaşılacak bağlantı yuvası açılmıştır. Ayrıca hücre tabanında, taban poroz taşın oturabileceği ölçüde, 50 mm çaplı ve 4.5 mm çapında yuva açılmıştır (Şekil 3.2). Yine hücre tabanında numuneyi çevreleyen konsolidasyon halkasının alt yüzeyinin oturacağı kısma oring yuvası açılmış ve oring yerleştirilmiştir. Bu oringin görevi numune tabanındaki ilave boşluksuyu basıncının sağlık ölçülmesi için konsolidasyon ringi ve konsolidasyon hücresi arasında geçirimsizliği sağlamaktır.

Ödometre hücresi içine ters basınç uygulanabilmesi için hücrenin atmosfer basınçtan ayrılıp kapalı bir sitem haline getirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple ödometre hücresi açık yüzüne 15mm kalınlığında akrilik malzemeden kapak imal edilmiştir. Bu kapağın üst yüzünde hücre içerisinin suyla doldurulması sonrasında sıkışan havanın tahliyesi için gerekli hava alma vidası yuvası ve hücre basıncının uygulanması için basınç kaynağı ve hücre arasındaki boru bağlantısına imkan sağlayan boru bağlantı rekoru yuvası açılmıştır. Ödometre hücresi çekme çubukları uzatılarak kapaktan geçeceği yuvaları kapak boyunca açılmıştır. (Şekil 3.3). Kapağın alt yüzünde ödometre hücresi et

kalınlığı boyutunda 4mm genişliğinde ve 5mm yüksekliğinde oring yuvası açılmıştır (Şekil 3.4). Ödometre hücresi yükleme kolu Şekil 3.5’deki gibi değiştirilerek kapak merkezinde yuvası açılmıştır. Bu yuvada artık piston görevi gören yükleme kolu ile kapaktaki piston yatağı görevini gören yuva arasında sızdırmazlığı sağlamak için iki adet o ring kullanılmıştır. Deney düzeneğinde hücre basıncı ters basınç olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle hücre basıncının numuneye nüfuzunda üst başlık konsolidasyon ringi ve çekme çubuklarına takılarak üst başlığı yükeleme ekseninde sabitleyen aparat arsında herhangi bir tıkanıklık oluşması sonucu ters basıncın sağlıklı olarak numuneye ulaşamaması durumunu engellemek için ödometre üst başlığında ters basıncın üst başlıktan geçerek üst poroz taşa ulaşmasını sağlayacak delikler açılmıştır (Şekil 3.6). Konsolidasyon aletinde alt poroz, taş numune, üst poroz taş ve üst başlığın yerleştirilmiş hali Şekil 3.7’de verilmiştir. Konsolidasyon hücresinde, kapak ve yükleme kolunun yerleştirilmiş hali Şekil 3.8’de verilmiştir. Ödometre hücresinde yapılan değişiklikler sonucu konsolidasyon hücresi gerek yük kademelerinin kontrol edildiği klasik ödometre deneyi yükleme aparatında gerekse deformasyon hızının kontrol edildiği yükleme aparatında konsolidasyon deneylerinin yapılmasına hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.1: Konsolidasyon hücresi tabanında boşluk suyu basıncı ölçümü için yapılan değişiklik.



Şekil 3.2: Konsolidasyon hücresi tabanındaki yuvaya poroz taş yerleştirilmiş hali.



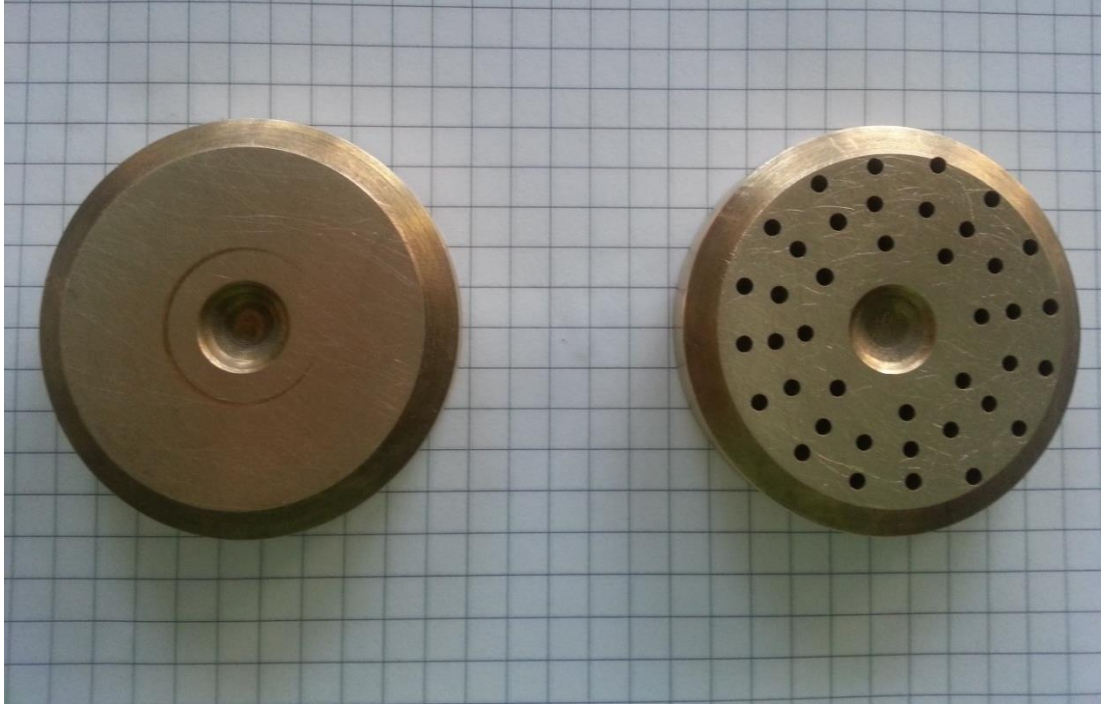
Şekil 3.3: Konsolidasyon hücresi kapağının üst yüzü.



Şekil 3.4: Konsolidasyon hücresi kapağının alt yüzü.



Şekil 3.5: Ödometre yükleme kolunda yapılan değişiklik sonucu oluşturulan piston.



Şekil 3.6: Ödometre üst başlığında açılan delikler.



Şekil 3.7: Konsolidasyon aletinde alt poroz, taş numune, üst poroz taş ve üst başlığın yerleştirilmiş hali.

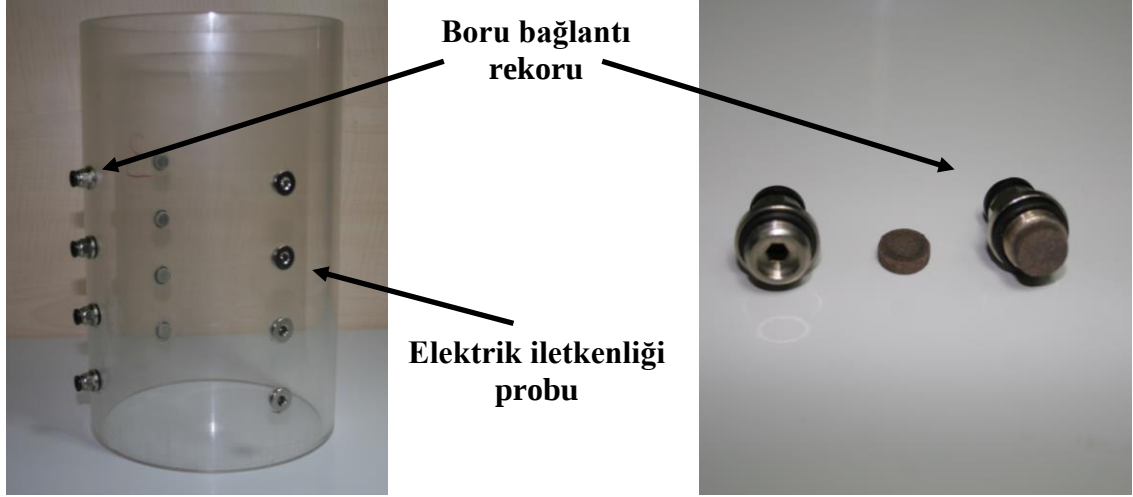


Şekil 3.8: Konsolidasyon hücresinde, kapak ve yükleme kolunun yerleştirilmiş hali.

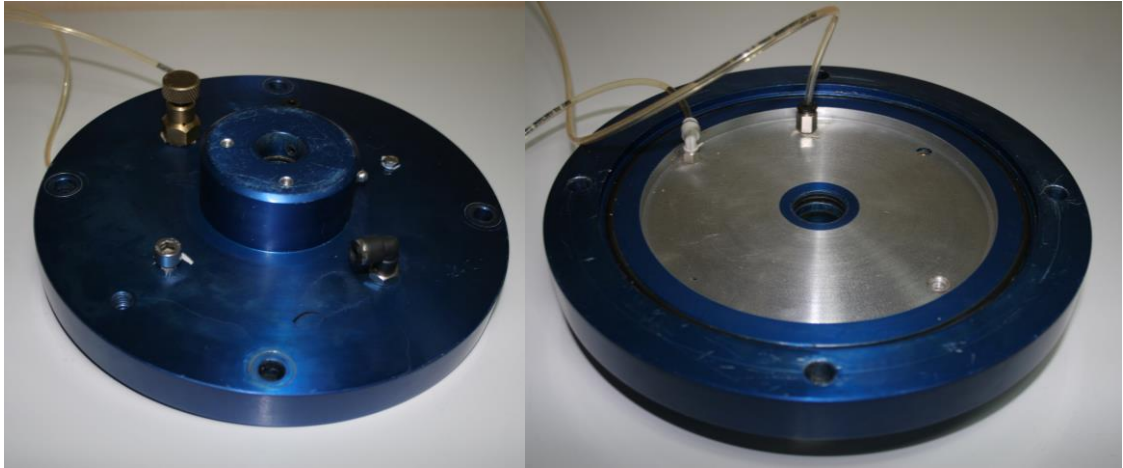
3.1.2. Büyük Konsolidasyon Hücrelerinde Sabit Yük Artımı ve Deformasyon Hızı Kontrollü Konsolidasyon Deneyleri

Ödometre deney numunelerinden daha büyük boyuttaki numunelerde bir boyutlu konsolidasyon deneylerinin yük ve deformasyon hızı kontrolü ile gerçekleştirilmesi amacı ile büyük boyutlu hücreler imal edilmiştir. Bu hücrelerin iç çapı 183 mm, et kalınlığı 10 mm ve yüksekliği 300 mm olan akrilik silindirlerden oluşmaktadır (Şekil 3.9). Bu silindir üzerinde silindir enkesitinde 90° aralıklı 3 delik olmak üzere toplam dört enkesitte 12 delik bulunmaktadır. Her bir enkesitte aralarında 180° açı bulunan karşılıklı delikler elektrik iletkenliği problarının yerleştirilmesi için açılmıştır. Her bir enkesitteki diğer delik ise boşluksuyu basıncı ölçümü için açılmıştır. Karşılı 4 çift elektrik iletkenliği probu olmak üzere 8 adet elektrik iletkenliği probu bulunmaktadır. Boşluksuyu basıncı ölçümü için $\varnothing 6$ mm boru bağlantı rekoru kullanılmıştır. Bu rekorların hücre iç cidarındaki kısmına 4mm kalınlığındaki poroz taştan 11 mm çapında küçük poroz taşlar kesilerek yapıştırılmıştır. Boru bağlantı rekorlarının hücre dışındaki kısmına 30mm uzunluğunda 6mm çapındaki polyüratan boruların diğer uçları boşluksuyu basıncı ölçerlere monte edilerek silindir cidarında 50mm aralıklarla 4 farklı

kotta boşluksuyu basıncı ölçümü gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 3.9). Akrilik hücre kapaklarının üstten ve alttan görünüşü Şekil 3.10’de gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Büyük konsolidasyon deneyi akrilik hücre ve boru bağlantı rekoruna poroz taş yapıştırılmış hali.



Şekil 3.10: Büyük konsolidasyon hücresi kapağı.

Büyük konsolidasyon hücresinde kullanılan piston ve büyük konsolidasyon hücresi ve tüm aparatları Şekil 3.11’de verilmiştir.

Büyük konsolidasyon hücrelerinin tasarlanması sırasında, numune üst ve alt yüzünde 183 mm çaplı poroz taşların tedarik edilmesi ihtiyacı oluşmuş ancak bu ihtiyaç uzun

süren araştırmaya rağmen piyasadan tedarik edilememiştir. Bu sebeple 183 mm çaplı ve 4.5 mm yüksekliğinde poroz taşlar laboratuvarında üretilmiştir. Bu işlem için kullanılan kum 30 ve 40 nolu elekler arasında kalan malzemeden kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.12). Ağırlıkça kumun %5'i oranında epoksi yapıştırıcı ve %5 oranında sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi yapıştırıcı ve sertleştirici önce küçük bir kap içerisinde karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışım Şekil 3.13'de görüldüğü üzere özel olarak imal edilen kalıp içerisine dökülmüştür. Daha sonra kalıp alanından daha büyük bir cama az miktarda yağ sürülerek karışımın üzerine bastırılmıştır. Bu işlem sonrası kalıptaki kum ve epoksi yapıştırıcı karışımı Şekil 3.14'deki gibi elde edilmektedir. Her ne kadar konsolidasyon sürecinde poroz taş eğilmeden ziyade kuşaklanmış şekilde basınca maruz kalsada taşıma ve yerleştirme işlemleri sırasında kırılmasını önlemek için polyüretan file epoksi yapıştırıcı ile poroz taşın iki yüzüne de yapıştırılmıştır (Şekil 3.15).



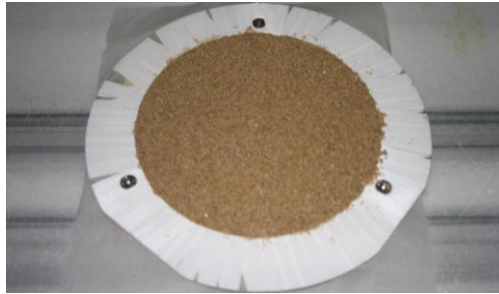
Şekil 3.11: Büyük konsolidasyon hücresinde kullanılan piston ve büyük konsolidasyon hücresi.



Şekil 3.12: Poroz taş imalatında kullanılan kum ve epoksi yapıştırıcı.



Şekil 3.13: Poroz taş kalıbına dökülen epoksi yapıştırıcı kum karışımı.



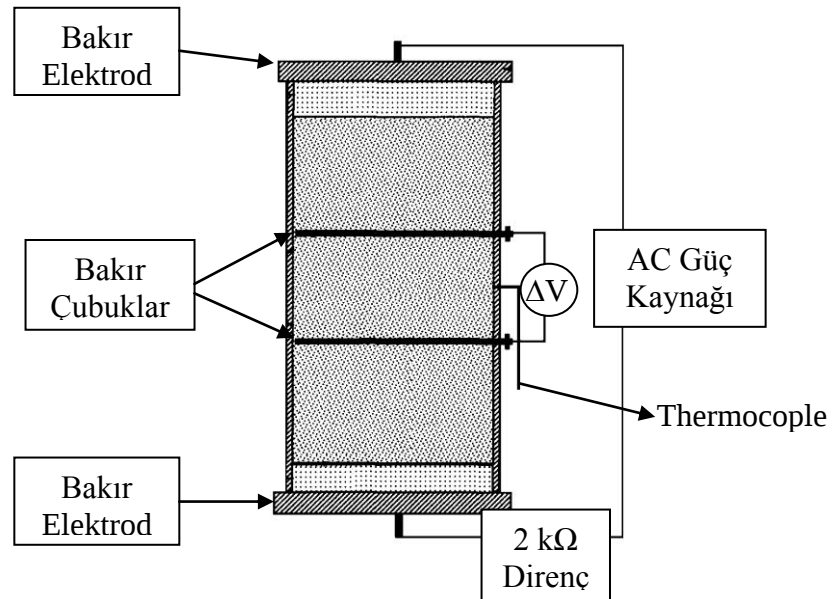
Şekil 3.14: Kalıp içersinde imal edilen poroz taş.



Şekil 3.15: Polyüratan file kaplanmış poroz taş.

3.2. ELEKTRİK DİRENCİ ÖLÇÜMÜ

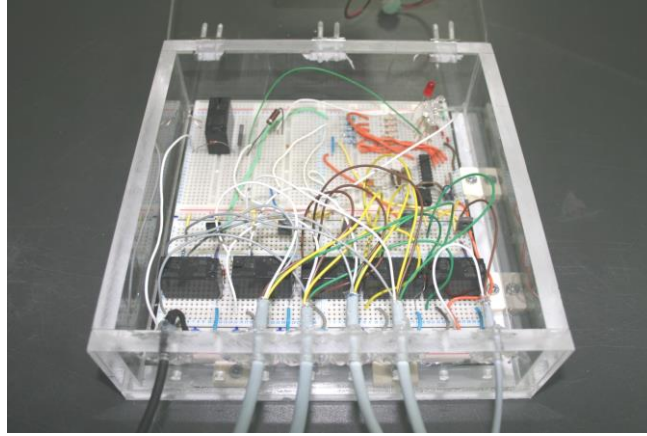
Elektrik direnci ölçümü için Abu-Hassanein vd. (1996)'da Şekil 3.16'da verilen kompaksiyon moldunda sıkıştırılmış kil numunelerin elektrik direnci ölçümüne benzer şekilde ölçen cihaz geliştirilmiştir. Elektrik direnci ölçümünde, DC akımın kullanılması durumunda mikro yapıda bozulma olduğu bilinmektedir. Bu sebeple elektrik direnci ölçümünde AC akım kullanılmıştır. 20 V AC sinüzoidal akım 100Hz frekansta $1k\Omega$ dirençten geçirilerek büyük konsolidasyon hücrelerinde yatay ve düşey yönde ΔV potansiyel farkı ölçülmüştür (Şekil 3.17). Elektrik direnci ölçümünde büyük kompaksiyon hücresinde sırayla 4 yatay kesitte karşılıklı probalar arasında ve düşeyde karşılıklı probalar arasında olmak üzere 5 farklı kesitte akımı yönlendiren anahtar düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 3.18). Bu anahtar düzeneğine, Şekil 3.19'da verilen NI6024E DAQ kartından alınan akım, veri toplama ünitesi giriş çıkış kartından geçirilerek anahtarlama kartına iletilmiştir. NI6024E DAQ kartından 20V AC sinüzoidal akımı 100Hz frekansta uygulayabilmek ve probalar arasındaki potansiyel farkı gerçek zamanlı olarak kaydedebilmek için LabView programında kod yazılmıştır. Bu kod EK 2'de verilmiştir.



Şekil 3.16: Kompaksiyon moldunda elektrik iletkenliği ölçümü (Abu-Hassanein vd. 1996).



Şekil 3.17: Büyük konsolidasyon hücresinde elektrik direnci ölçümü.



Şekil 3.18: Büyük konsolidasyon hücresinde elektrik direnci ölçümünde akımı yönlendiren anahtar düzeneği.



Şekil 3.19: NI6024E DAQ kartı ve giriş çıkış bağlantı kartı.

3.3. FOTOGRAMETRİK YÖNTEMLE DEFORMASYONLARIN TESPİTİ

Üç eksenli deneylerinde geleneksel olarak hacim değişimi, boşluk suyu değişiminin büret veya hacim değişim üniteleri ile ölçülmesiyle elde edilir. Ancak bu yöntem doygun olmayan zeminlerde doğru sonuç vermemektedir. Çünkü bu tür zeminlerde sadece boşluk suyu değil aynı zamanda boşluklardaki havanın hacminde de değişim meydana gelmektedir (Gachet vd. 2006).

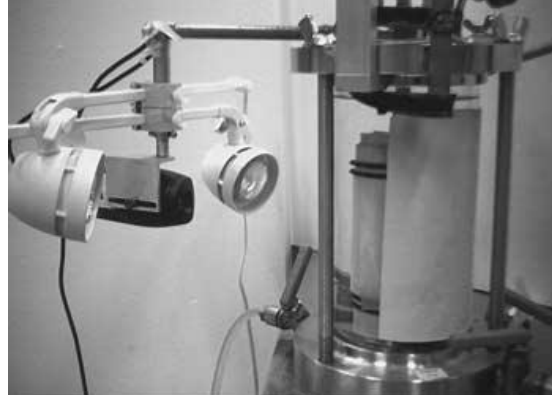
Bununla birlikte üç eksenli deneylerde radyal deformasyon ölçümü membrana tutturulan deplasman sensörleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu tarz cihazlarla genelde numune boyunca en fazla 3 noktada deformasyon ölçümü gerçekleştirilebilmekte ve numunenin hacimsel veya kayma deformasyonlarının tespiti için bazı kabuller kullanılmaktadır. Ayrıca membrana bu tür sensörlerin yerleştirilmesi oldukça hassas bir işlemdir ki doğru yapılmazsa büyük hatalara neden olabilmektedir (Laloui vd. 2006).

Gachet vd. (2006) hacim değişimi ölçümü için Macari vd. (1997) görüntü işleme tekniğini temel alan ancak akrilik hücre ve hücre içindeki suyun büyütme etkisini dikkate alarak bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde deney süresince numunenin hücre dışından fotoğrafları çekilerek bu fotoğrafların görüntü işleme teknikleri kullanılarak numune profili ve hacminin zamanla değişiminin elde edilmesine dayanmaktadır (Şekil 3.20).

Görüntü işleme tekniği ile hacim değişimi elde edilmesi yönteminin bir diğer avantajı ise, lokal kayma bantlarının takip edilebilmesidir. Asaoka vd. (1997), Alshibli vd. (2000) ve Higo vd. (2004) üç eksenli deney numunelerinden elde ettikleri fotoğrafların görüntü analizlerinden bölgesel kayma bölgelerinin gelişimini gözlemlemişlerdir. Higo vd. (2004), dikdörtgen prizması şeklindeki üç eksenli deney numunesinde membran üzerinde oluşturdıkları 2mm kenar uzunluğundaki karelerden oluşan ağıın deney esnasında zamanla şekil değişimini fotoğraflardan takip etmişlerdir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri sonlu elemanlardan oluşan ağıın düğüm noktalarındaki yer değiştirme ile benzeştirerek sayısal çözümlemeye gitmişler ve 3 boyutlu bir viskoplastik model geliştirmişlerdir.

Bu doktora çalışmasında, büyük konsolidasyon hücrelerinde düşey deformasyonların takibinde fotogrametrik yöntemle deformasyon takibi tekniği kullanılmıştır. Bu amaç

doğrultusunda 2 adet kompakt kameranın deklanşörü yeniden düzenlenerek bilgisayar kontrollü hale getirilmiştir (Şekil 3.21). LabView programında yazılan kod yardımı ve NI-DAQ6024E kartından alınan dijital çıkış yardımı ile fotoğraf makinalarının tetiklenmesi sağlanmıştır. Elde edilen görüntüler Gachet vd. (2006) yöntemi kullanılarak Mathematica programında yazılan kodla deformasyonlar hesaplanmıştır.



Şekil 3.20: Üç eksenli deneyinde deformasyonların fotoğrafla takibi (Gachet vd. 2006).



Şekil 3.21: Büyük konsolidasyon hücrelerinde düşey deformasyonların fotogrametrik yöntemle takibi için oluşturulan sistem.

3.4. ESEM GÖRÜNTÜLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMİ

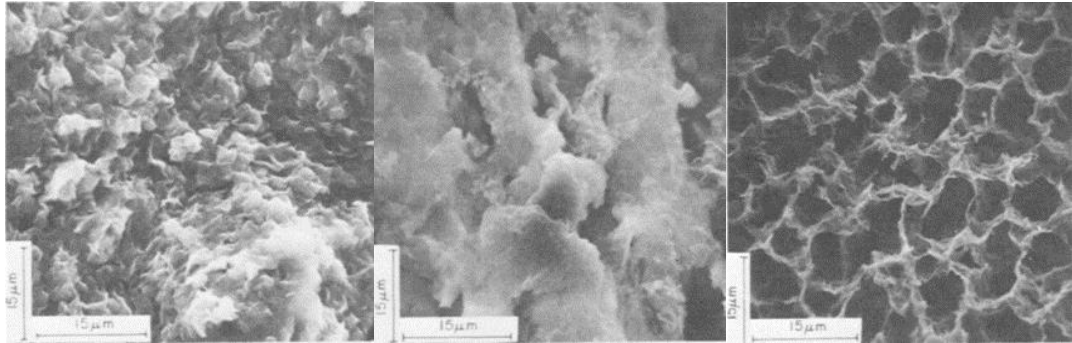
Literatürde taramalı elektron mikroskobunun (SEM) kil dokusunun nitelenmesinde kullanılmasına ilişkin çalışmalar mevcuttur (Quigley ve Thompson 1966, Tovey 1971, Barden ve Sides 1971). Son yıllarda görüntü işleme tekniklerindeki ilerlemeler neticesinde taramalı elektron mikroskobu görüntüleri dijital ortamda işlenerek partikül yönelmesi dağılımı ile ilgili nicel veriler elde edilebilmektedir (Anandarajah vd. 1996).

Elektron mikroskobu görüntülerinin analizinde en kritik safalardan birisi, görüntülerin alınacağı numunelerin hazırlanmasıdır. Elektron mikroskobu görüntüleri alınmadan önce numune içindeki suyun tahliye edilmesi gerekmektedir. Bunu modern elektron mikroskopları bir ölçüde gerçekleştirebilse de kil gibi yüksek su içeriğine sahip malzemelerdeki suyun tamamen ortamdan uzaklaştırılması zordur. Bu nedenle elektron mikroskobu görüntülerinin alınacağı numunelerden suyun arındırılması istenir. Bunun için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Örneğin hava kurusu numuneler, veya etüvde kurutulan numuneler gibi. Ancak bu tarz kurutma işlemleri kil gibi büzülme çatlakları oluşan malzemelerde mikro dokunun tamamen değişmesine neden olmaktadır. Numune içindeki suyun dondurulması ve süblimleşme yani buzun katı halden gaz hale getirilerek ortamdan uzaklaştırılması yönteminde ise doku üzerinde kuruma nedeniyle oluşacak değişimleri azaltmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus suyun çok hızlı dondurulmasıdır, eğer su yavaş dondurulursa sıvı halden katı hale geçerken hacim artışı oluşacak ve bu nedenle mikro dokuda değişim meydana gelecektir.

Dondurma işlemi sırasında doku bozulmasının diğer bir nedeni, buz kristallerinin bünyesindeki yabancı maddeleri tanecik kenarına iterek büyümesidir. Bu süreçte küçük kristaller dokuda daha az bozulmaya neden olmaktadır.

Amorf yapıda camsı buz oluşturulması durumunda kristallenme oluşmayacağından suyun donması sürecinde hacim artışı yaşanmaz. Ancak bu tipte buz oluşturabilmek için dondurma işleminin çok hızlı olması gerekmektedir. Gilliot (1976), elektron mikroskobu altında kil numunelerinin doku analizi için numune hazırlanması başlıklı makalesinde, zemin numunesinin sıvı azot içerisine daldırılması ile boşluk suyunun hızlı dondurulduğu düşünülse de kristallenmeyi önleyecek hızda dondurmanın gerçekleşemediğini belirtmiştir. Bunun zemin numunesini çevreleyen gazın yalıtım zarfı

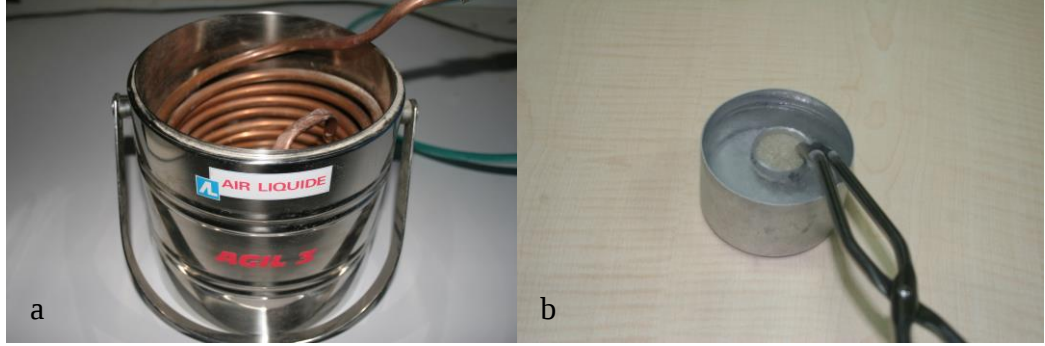
gibi davranmasından kaynaklandığını aktarmıştır. Bu problemin üstesinden gelmek için, numunenin doğrudan sıvı azot içerisine daldırılarak dondurulması yerine, sıvı azot içerisinde soğutulmuş propane, isopane veya freon 22 gazlarına daldırılmasını gerektiğini belirtmiştir. Bu gazların donma noktası çok düşük olduğundan çok düşük sıcaklıklarda bile sıvı halde kalabilmeleri ve kaynama noktalarının da sıvı azota göre çok daha yüksek olması nedeni zemin numunesinin bu gazlar içine daldırılması sonucu, sıvı azottaki gibi buharlanma gerçekleşmeyeceğinden dondurma işlemi daha verimli olmaktadır. Sonuç olarak Gillot (1976), dondurma hızı ve kurutma yönteminin, flokül yapıdaki Wyoming bentonit kilinde dikkate değer farklılıklar oluşturduğunu göstermiştir (Şekil 3.22). Şekilde görüldüğü gibi hava kurusu ve doğrudan sıvı azot içerisine daldırılıp dondurulup süblimleşme ile kurutulan numunelerde kil yapısını çevreleyen bulutsu bir yapı görülmektedir. Bu bulutsu yapı mikrografların görüntü analizinin yapılamamasına neden olmaktadır. Ancak sıvı azot içerisinde soğutulan freon gazında dondurularak süblimleşme ile kurutulan numunede bu bulutsu yapı gözlenmemektedir.



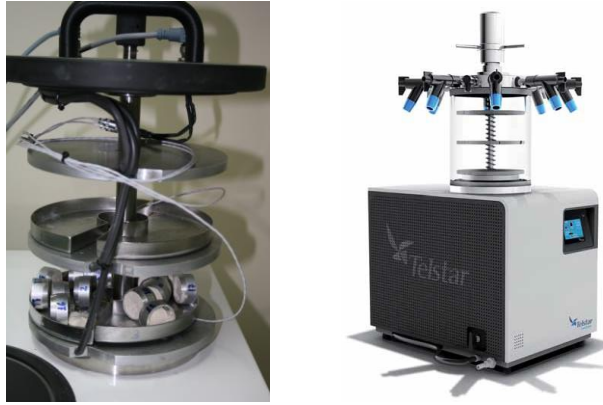
Şekil 3.22: Flokül bentonit, a) hava kurusu, b) sıvı azot içinde dondurularak süblimleşmeyle kurutulmuş, c) sıvı azot içinde soğutulmuş freon içinde dondurulmuş, hallerinin SEM fotoğrafları Gillot (1976).

Bu sebeplerden dolayı, bu doktora tezinde, kaolin kilinin ESEM görüntüleri ile doku değişiminin incelenmesinde, ESEM numuneleri hazırlamak için, sıvı azot içinde soğutulmuş propan kullanılmıştır. Bunun için Şekil 3.22’de görüldüğü gibi devar kabı içine 10mm çaplı bakır boru helisel şekilde yerleştirilerek, devar içine sıvı azot dökülmesi ve bakır boru içinden geçirilen propan gazının soğutulması ile sıvı halde propan elde edilmiştir. Sıvı propan içinde kil numuneleri dondurulmuştur (Şekil 3.23). Süblimleşme işlemi ise Şekil 3.24’de gösterilen liyofilizatör yardımıyla

gerçekleştirilmiştir. Dondurularak süblimleşme yöntemi ile kurutulan kaolin numunesinde, kurutma işleminin durdurularak süblimleşme sürecindeki kaolin numunesinin durumu Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.23: a) Sıvı azot içinde propan gazının soğutularak sıvı halde propan elde edilmesine olanak sağlayan düzenek, b) Kaolin numunesinin sıvı propan içinde dondurulması.



Şekil 3.24: Dondurulan kaolin numunelerinin süblimleşme yöntemiyle kurutulmasında kullanılan liyafilizatör.



Şekil 3.25: Süblimleşme yöntemiyle kurutulurken kurutma işlemi yarıda kesilmiş kaolin numunesi.

3.5. ESEM GÖRÜNTÜLERİNİN GÖRÜNTÜ ANALİZİ

Elektron mikroskobu görüntülerinde, önce siyahın sıfıra beyazın 255'e karşılık geldiği renk skalasında dijital ortama aktarılır ve görüntüdeki her nokta koyuluğuna göre 0 ile 255 arasında bir değer alır. Elektron mikroskobu görüntüsünde numunedeki boşluk hacmi koyu, kil kenarları açık renkte görünür. x-y düzlemindeki görüntünün z eksenini koyuluğu gösterecek şekilde üç boyutlu çizimi sonucunda dorukları kil kenarlarını gösteren dağlık ve numunedeki boşlukları gösteren vadi şeklinde topografik görüntü elde edilmiş olur. Bu görüntünün konturları ise koyuluğa göre eşyükselti eğrilerine karşılık gelmektedir.

Bu doktora çalışmasında görüntü işleme sürecinde, Rasband (1997-2009) tarafından geliştirilen, açık erişimli ImageJ programı kullanılmıştır. ESEM görüntülerinde kil ile boşluklar izodata eşik algoritması kullanılarak ayırt edilmiştir. Parlaklık değeri eşik değerden yüksek olan pikseller kil topraklarının parçası olarak alınmıştır. Bu görüntü daha sonra, siyahın kil topraklarını, beyazın topraklar arası boşlukları temsil ettiği ikili görüntüye dönüştürülmüştür. Bu ikili görüntüler ImageJ programındaki su akıtma çizgisi fonksiyonu ile parçalara ayrılmıştır. Bu fonksiyon, ayrık tanelerin temas noktalarından veya yüzeylerinden birbirinden ayırmaktadır. Bu bağımsız parçalardan alanları belli bir eşik değerden büyük olanlar seçilmiştir. Eşzamanlı olarak, en uygun elips yöntemiyle bu parçaları temsil eden elipsler elde edilmiştir. Bu çalışmada, hem doku anizotropisi hem de kil toprakları boyutu dağılımının bulunması hedeflenmektedir. Doku yönlenmesinin elde edilebilmesi için, en uygun elips yöntemi ile her bir elipsin, çevresi, büyük ve küçük eksenini ve büyük eksenin yatay eksenle yaptığı açı elde edilmiştir. Her bir elipsin, büyük ekseninin boyu ve yönlenmesi 10° aralıklı açısal histogramların oluşturulmasında kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen sonuçlar (Yiğit ve Çinicioğlu 2010, 2011)'de sunulmuştur.

4. BULGULAR

Bu doktora çalışması kapsamında, likit limit su muhtevasında kaolin numunesinde, deformasyon hızının deney boyunca sabit tutulduğu, deney devam ederken arttırıldığı ve azaltıldığı yükleme kombinasyonları kullanılarak küçük ve büyük numunelerde CRS deneyleri gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon deneyleri sonrasında ESEM görüntüsü için numune alınarak süblimleşme tekniği ile kurutularak ESEM görüntüleri alınmıştır. Yüksel (2007) tarafından gerçekleştirilen ödometre deneyleri ve bu deneyler sonrasında çekilmiş ESEM fotoğrafları da ayrıca kullanılmıştır. ESEM görüntüleri görüntü işleme yöntemleriyle analiz edilmiş ve bir boyutlu konsolidasyon deneylerinde uygulanan dış yükler altında mikro dokunun değişimi incelenerek makro boyuttaki etkisi yorumlanmıştır.

4.1. ÖDOMETRE DENEYLERİ

Bu kısımda, ödometre deneylerine ait gerilme deformasyon ilişkileri ve ESEM görüntüleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. ESEM görüntülerinin görüntü analizleri gerçekleştirilerek mikro doku değişimi, tüm konsolidasyon süreci ve ikincil konsolidasyon süreci için ayrı ayrı ele alınarak incelenmiştir. Bu doktora çalışmasında kullanılan ödometre deney sonuçları ve ödometre deneyleri sonrasında çekilmiş ESEM görüntüleri Yüksel (2007)'den alınmıştır.

Burada öncelikle Yüksel (2007)'de uygulanan deney programı hakkında bilgi verilecek ve sonrasında ESEM fotoğraflarının görüntü analizleri ile topakların yönlenmesi, alansal büyüklüklerinin dağılımı tüm konsolidasyon süreci ve krip süreci olarak iki kısımda ele alınacaktır. Yoğrulmuş kaolin kili numuneleri %26 su muhtevasında hazırlanmıştır. 5 grup halinde 25 konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Her bir grup deney önceden belirlenmiş gerilme düzeyine erişebilecek şekilde tasarlanmıştır. Her bir gruba uygulanacak gerilme artışı seviyeleri farklı bir maksimum düzeye kadar ulaştırılmıştır ve tanımlanan maksimum basınç seviyeleri 20, 50, 100, 200 ve 400 kPa olarak seçilmiştir. Tüm grupların başlangıç gerilme düzeyi 2.5 kPa olarak seçilmiştir.

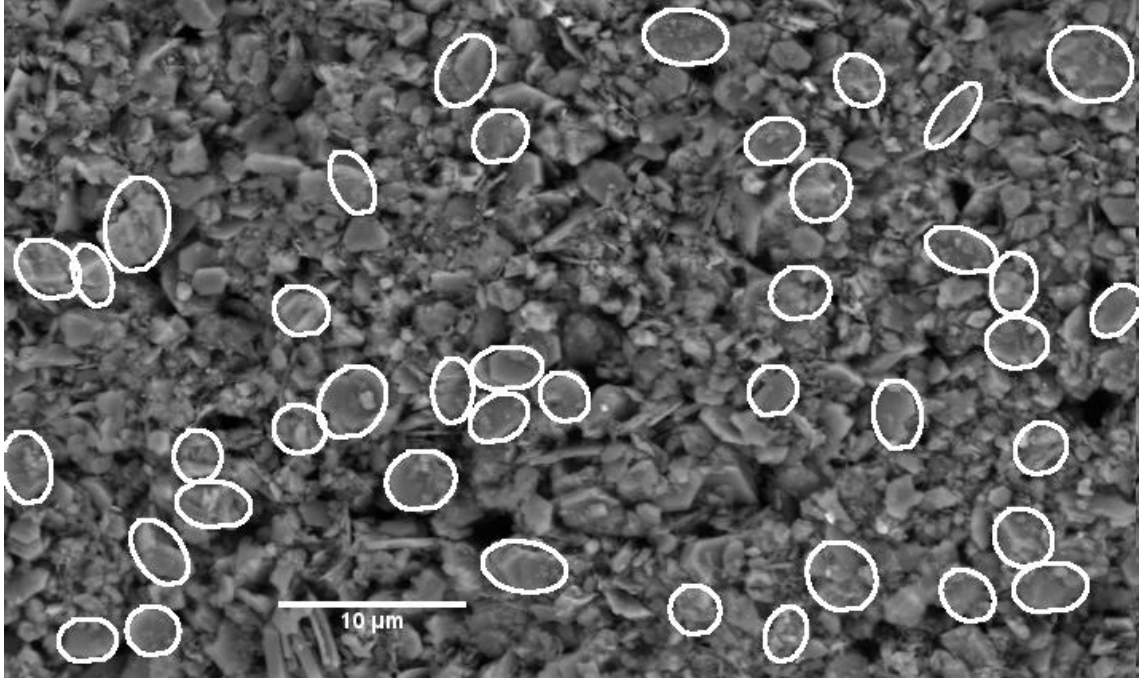
Bu gerilme düzeyi numuneye 1 saat boyunca etkilmiştir. Sonraki yüklemeler için yük artım oranı 2'dir ve her bir yükleme 24 saat boyunca uygulanmıştır. Maksimum gerilme düzeyine ulaşıldıktan sonra, bu gerilme düzeyi 1 dakika, 15 dakika, 24 saat 72 saat uygulanmıştır. Bunlara ek olarak, maksimum gerilme düzeyine ulaştıktan sonra, şişmiş zemin davranışını incelemek için yük, 24 saat boyunca zemin üzerinde tutulmuş ve daha sonra yük kaldırılmıştır. Bu sırada boşaltma oranı 0.5 olarak seçilmiş ve her bir kademe yük kaldırılmadan önce 2 saat süre ile beklenmiştir. 25 deneyin her birinden, düşey düzlemde, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ numune alınmış ve herbir numuneden 3 adet olmak üzere toplamda 75 ESEM görüntüsü çekilmiştir. Böylece, yük artımı ve konsolidasyon derecesinin doku anizotropisi üzerine etkisini temsil edecek mikro-doku görüntüsü elde edilmiştir.

4.1.1. ÖDOMETRE DENEYLERİNDE ESEM GÖRÜNTÜLERİNİN TÜM KONSOLİDASYON SÜRECİNDEKİ DAVRANIŞI YORUMLAMAK İÇİN KULLANILMASI

Bu doktora çalışmasında görüntü işleme sürecinde, daha önceki bölümlerde ESEM görüntülerinin elde edilmesi ve görüntü analizi kısmında açıklanan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle görüntü analizi gerçekleştirilmiş bir esem fotoğrafı Şekil 4.1'de örnek olarak verilmiştir. Burada $5 \mu\text{m}^2$ eşik değerden daha büyük alana sahip kil topraklarını temsil eden alanları içine alan elipsler görülmektedir. En uygun elips yöntemi ile her bir elipsin, çevresi, büyük ve küçük eksen ve büyük eksenin yatay eksenle yaptığı açı elde edilerek, doku yönlenmesi hakkında fikir edinmek mümkün olmaktadır (Yiğit 2010, Yiğit ve Çinicioğlu 2010, 2011).

Her bir elipsin, büyük ekseninin boyu ve yönlenmesi 10° aralıklı açısal histogramların oluşturulmasında kullanılmıştır. Görüntünün ortalama yönlenmesi Martinez-Nistal vd. (1999) tarafından kullanılan yönteme benzer şekilde elde edilmiştir. Bileşke vektörün uzunluğunun tüm vektörlerin uzunluğunun toplamına oranı doku yönlenmesi olarak tanımlanmıştır. Bu oran vektörlerin dağılımını göstermektedir ve değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir. Eğer elipslerin büyük eksenleri tercihi yönlenmeye (iso-orientation) sahipse doku yönlenmesi değeri 1'e yaklaşmaktadır ve anizotropik dokuya karşılık

gelmektedir. Eğer büyük eksenler rastgele yönlenmiş ise doku yönlenmesi değeri 0'a yaklaşmakta ve izotropik dokuya karşılık gelmektedir.

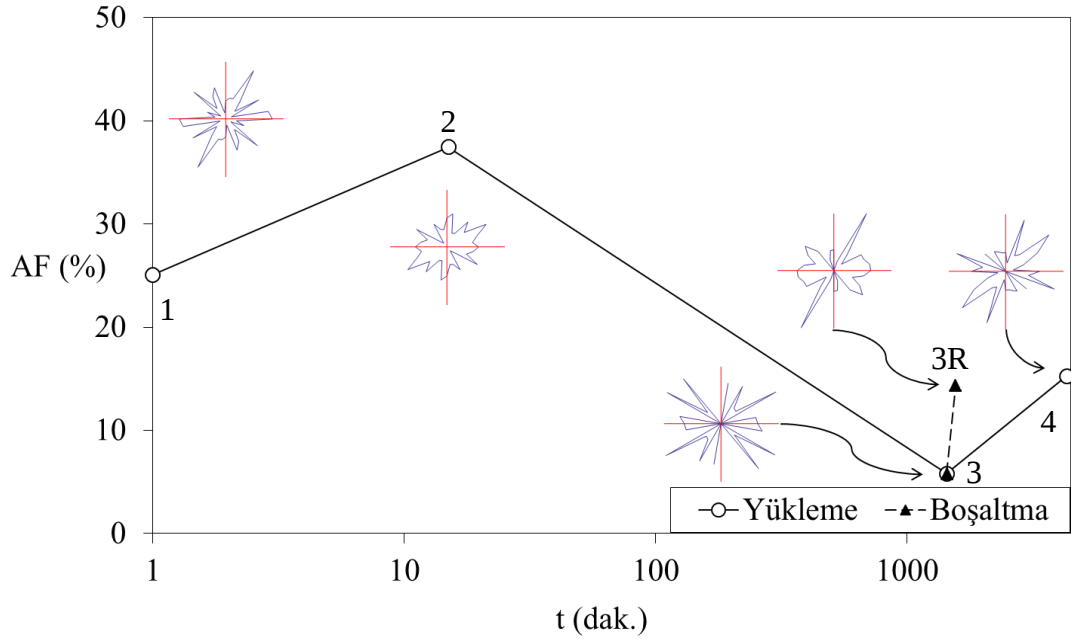


Şekil 4.1: ESEM görüntüsünde $5\mu\text{m}^2$ den büyük alanlı elipslerin dağılımı.

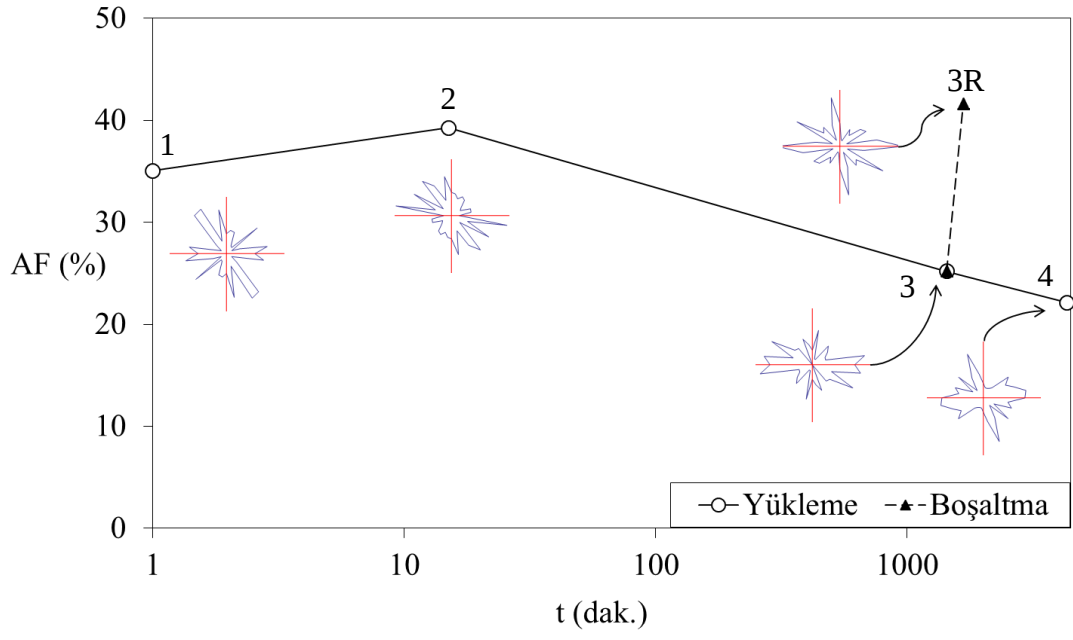
Konsolidasyon deneyi sürecinde yüke ve zamana bağlı olarak dokudaki değişimi takip edebilmek amacıyla kil yumaklarının büyüklüklerine göre dağılımına bağlı bir sınıflandırma yapılmış, bunun için de alan oranı, AF olarak adlandırılan yeni bir tanımlama yapılarak topaklanmış yapının büyüklüğünün dağılımını temsil etmekte kullanılmıştır. Bir eşik değerden daha büyük alana sahip tane gruplarının alanlarının toplamının, orijinal görüntü alanına oranı AF olarak tanımlanmıştır. Her bir 5 set deney için konsolidasyon süresine bağlı olarak AF değeriindeki değişim ve bunlara ait açsal histogramlar Şekil 4.2-6'da verilmiştir. Şekillerdeki 1,2,3 ve 4 numaralı noktalar maksimum konsolidasyon gerilmesinde sırasıyla 1 dakika, 15 dakika, 24 saat ve 72 saatlik yüklemelerdeki doku durumlarına karşılık gelmektedir. 3R noktası ise maksimum konsolidasyon basıncında 24 saat yüklemeden sonra boşaltma durumunu göstermektedir.

Düşük gerilme düzeyinde, konsolidasyon başladıktan hemen sonra 1 ve 2 noktaları arasında AF değeriinde bir artış görülmektedir (Şekil 4.2,3). Bu duruma, kil topakları arasındaki boşlukların drenaj nedeni ile azalması ve aynı zamanda kil topaklarının

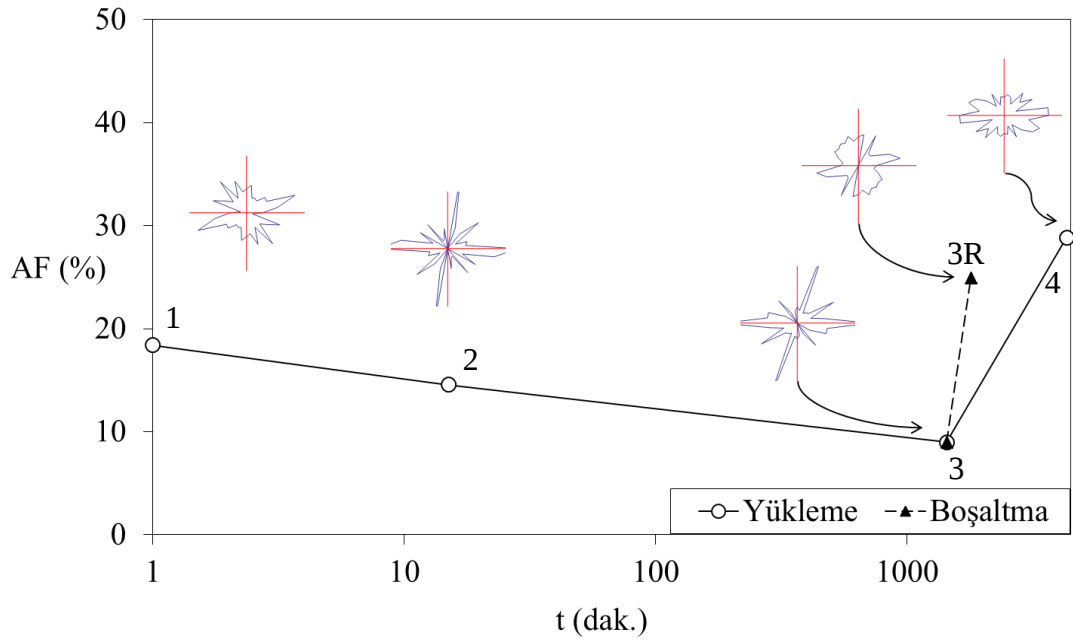
birbiri ile temas noktalarının veya temas yüzeylerinin artmasıyla daha büyük kil topaklarının meydana gelmesinin sebep olduğu düşünülmektedir. Maksimum basınç değerinin 50 kPa olduğu Şekil 4.3’de, 20 kPa olduğu Şekil 4.2’ye göre AF’deki artışın daha az olduğu görülmektedir. Davranışın birbirini izlemesi nedeni ile AF’nin değişimi 100 kPa gerilme düzeyinde yön değiştirmiştir (Şekil 4.4). Konsolidasyon süresi 15 dakikaya ulaştığında AF daha küçük değer almaktadır. Şekil 4.4’de 1 ve 2 noktaları arasında AF’de önemli bir değişim gözlenmezken 200 ve 400 kPa’lık yüksek gerilme düzeylerinde AF değeri dikkate değer bir şekilde azalmaktadır (Şekil 4.4,5). Bu durum yüksek gerilme düzeyinin aniden uygulandığı, ilk dakika içinde değişimin gerçekleştiği, kil topakları paketinin göçmesi ile açıklanabilir. 2 noktasından 3 noktasına giderken gözlenen davranış bir şekilde 1 ve 2 noktaları arasında gözlenen davranışın tersidir. Konsolidasyon sürecinin ilerleyen aşamalarında, viskoz etkilerin hakim olduğu 3 ve 4 noktaları arasında da davranışta benzer eğilim görülmektedir.



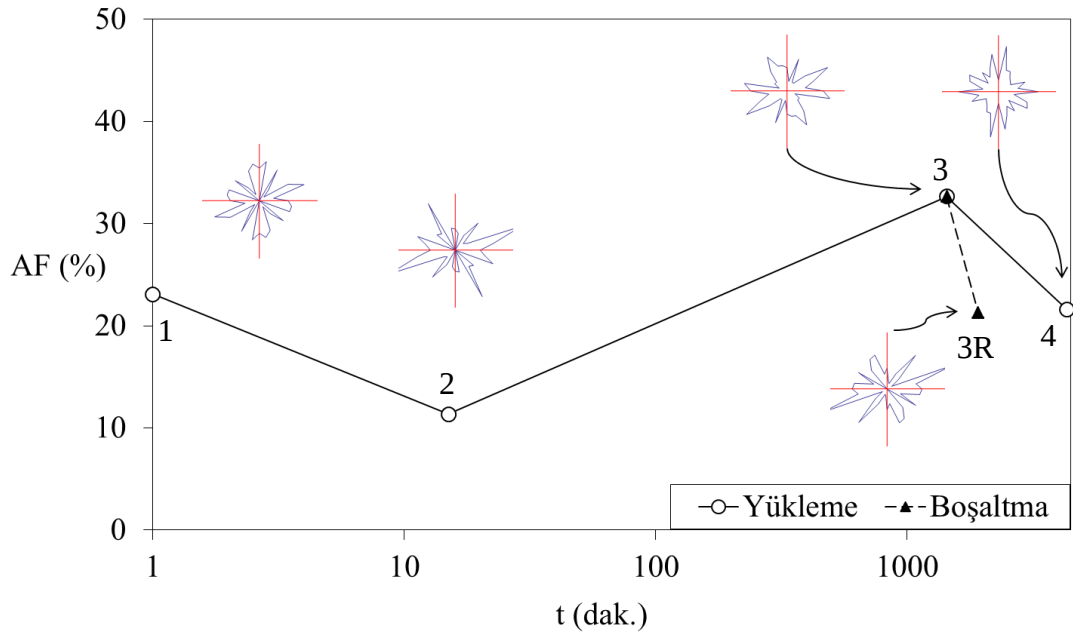
Şekil 4.2: 20 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.



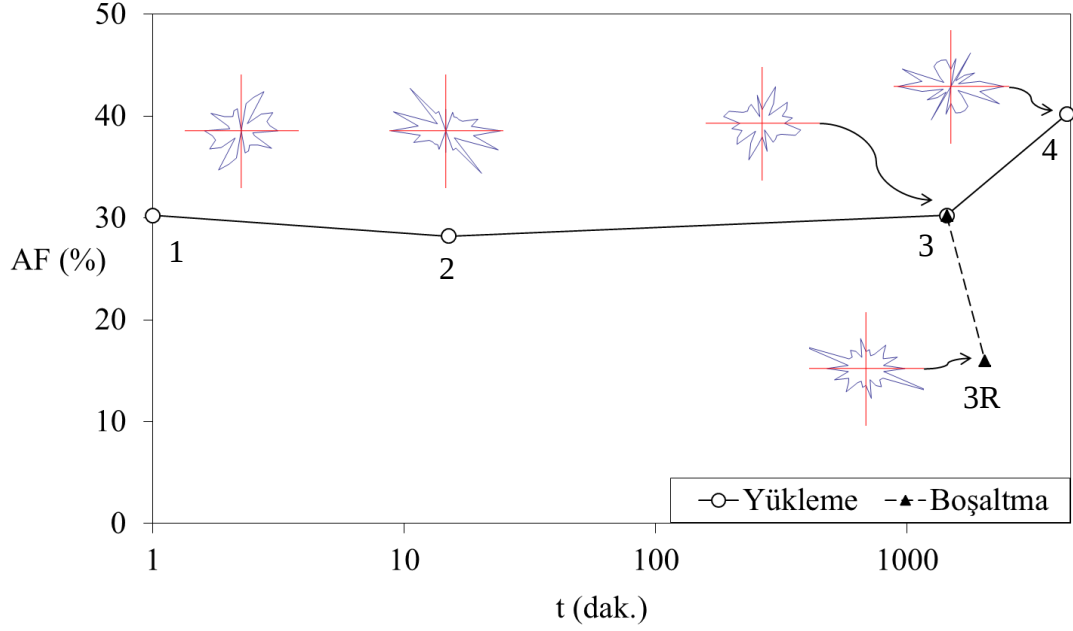
Şekil 4.3: 50 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.



Şekil 4.4: 100 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.



Şekil 4.5: 200 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.



Şekil 4.6: 400 kPa basınçta AF nin konsolidasyon süresiyle değişimi.

Boşaltma evresinin doku durumunu gösteren 3R noktası, düşük gerilme düzeyinde boşaltma öncesi durumun çok üzerinde yer almaktadır (Şekil 4.2-4). Ancak yüksek gerilme düzeyinde 3R noktası boşaltma öncesi noktanın altında görünmektedir (Şekil 4.5,6).

Genel olarak davranış, kil topakları, makro-boşluklar ve mikro-boşluklara uygulanan dış etkiden dolayı bunlar arasında sürekli bir etkileşimin oluşması ve çok uzun süren dengeye ulaşma çabası olarak özetlenebilir.

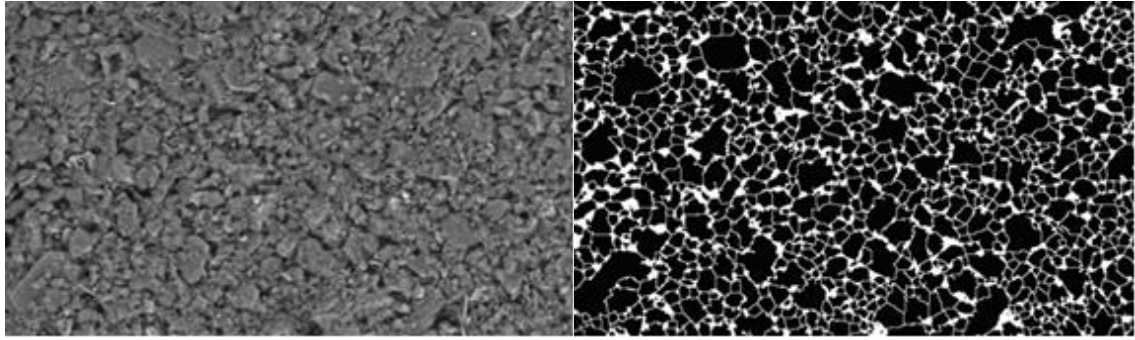
Doku yönlenmesi, her bir konsolidasyon kademesi için doku yönlenme indeksi olarak belirlenmiş ve değerler Tablo 4.1’de verilmiştir. Doku yönlenme indeksinin dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu nedenle, kullanılan kaolin kilinde, çift yönlü drenaj şartlarında gerçekleştirilen standart ödometre deneylerinde, bu çalışmada seçilen gerilme düzeylerinde doku yönlenmesinin etkilenmediği sonucuna varılabilir.

Tablo 4.1: Maksimum konsolidasyon basıncı altında konsolidasyon süresine bağlı olarak doku yönlenme indeksinin değişimi.

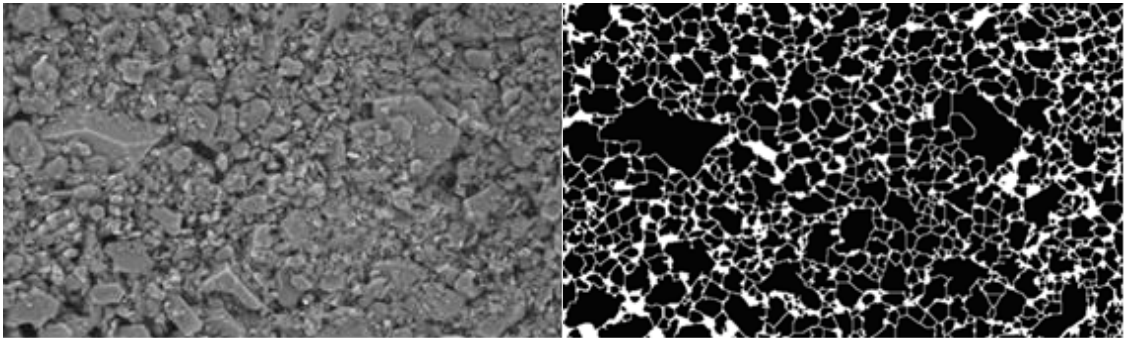
MBK*	1	2	3	3R**	4
(kPa)	1 dakika	15 dakika	24 saat	***	72 saat
20	0.61	0.60	0.56	0.56	0.60
50	0.64	0.68	0.54	0.58	0.56
100	0.63	0.58	0.56	0.63	0.55
200	0.62	0.56	0.56	0.56	0.64
400	0.61	0.56	0.60	0.59	0.61
* MBK : Maksimum basınç kademesi.					
** Boşaltma *** Maksimum basınç kademesine bağlı.					

ESEM görüntülerinin sayısallaştırılması ile kil topaklarının alanlarının büyüklükleri de elde edilmiştir. 20 ve 400 kPa gerilmelerinin 1 dakika uygulanması sonucunda elde edilen ESEM görüntülerinin doğal ve sayısallaştırılmış halleri Şekil 4.7,8’de verilmiştir. Kil topaklarının alanları kullanılarak gradasyon eğrileri, elek analizi sonuçlarının oluşturulmasında kullanılan yöntemle benzer şekilde fakat sayısallaştırılmış mikrogramlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan 20, 50, 100, 200 ve 400 kPa

yüklemelerinin 1, 15, 1440 ve 4320 dakika uygulanması sonucu oluşan gradasyon eğrileri Şekil 4.9-13’de verilmiştir. Gradasyon eğrilerinde kil topaklarının incelik derecesinin değişim miktarını belirlemek için $5\mu\text{m}^2$ alan değeri eşik değeri olarak seçilmiş ve bu eşik değere karşılık gelen “% geçen” değeri incelik yüzdesi (İY) olarak adlandırılmıştır. İY değerleri kullanılarak aynı gerilme altında farklı yükleme sürelerinde gradasyon eğrilerindeki değişim yorumlanmıştır. Buna göre, 20 kPa yükleme durumunda, Şekil 4.9’da, ilk 15 dakika sonunda kil topakları alanlarında artış olduğu, 1440 ve 4320 gibi daha uzun süreli yükleme durumlarında kil topakları alanlarının gittikçe azaldığı görülmektedir. Bu durumun sırasıyla düşük gerilme uygulamalarında erken yükleme evrelerinde topaklanma ve uzun süreli yüklemelerde ise topaklarda ayrışmanın bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. 400 kPa yükleme durumunda ise, Şekil 4.13’de erken yükleme evrelerinde kil topaklarında ayrışma gözlenirken, 4320 gibi uzun süreli yükleme durumunda topaklanma görülmüştür.



Şekil 4.7: 20 kPa yüklemenin 1 dakika etkilmesi sonucunda elde edilen ESEM görüntüsünün doğal ve sayısallaştırılmış hali.



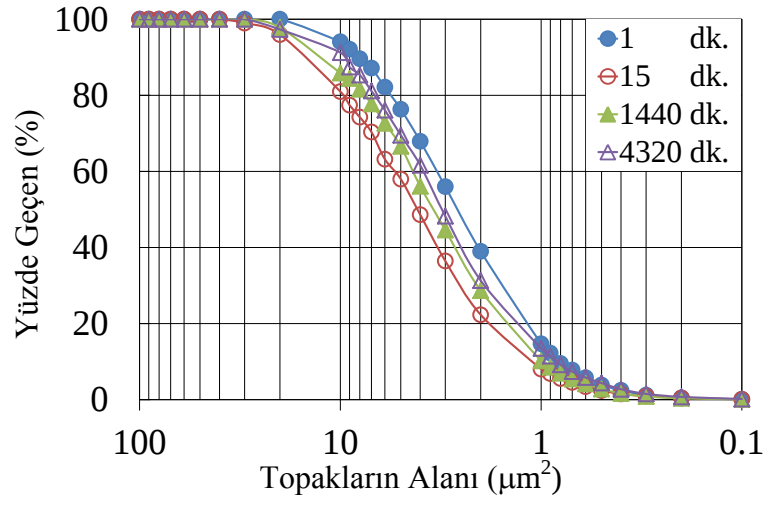
Şekil 4.8: 400 kPa yüklemenin 1 dakika etkilmesi sonucunda elde edilen ESEM görüntüsünün doğal ve sayısallaştırılmış hali.

Konsolidasyon deneyleri için numune hazırlanırken başlangıç koşullarının aynı olması konusunda özen gösterilmiştir. Buna karşın, her bir konsolidasyon basıncı için bir birine benzeyen fakat yine de farklılıkları bulunan 4 boşluk oranı – zaman grafiği elde edilmiştir. Her bir sette, yani her bir konsolidasyon basıncında, boşluk oranı zaman grafiğindeki farklılığın giderilerek tekil bir boşluk oranı zaman ilişkisi elde edebilmek, deneylerde süreklilik ve uygunluk şartlarını sağlayabilmek ve mikrografların deneyleri temsil edebilirliğini arttırmak için bir normalleştirmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için her bir sette, boşluk oranı zaman grafiğinde deney sonunda en büyük boşluk oranını veren deney referans deney olarak alınmıştır. Aynı konsolidasyon basıncında, gruptaki diğer üç deney sonucunda elde edilen boşluk oranları referans deneyden elde edilen boşluk oranı ile normalleştirilmiştir. Beklendiği gibi, deney grubunda en büyük boşluk oranını veren ve bu yüzden referans seçilen değer, 1 dakikalık yükleme sonunda elde edilmiştir. Alonso ve Navarro (2005) ödometre deneyinden elde edilen boşluk oranı (e) ve bunun makro ve mikro bileşenlerini (e_M and e_m) Eşitlik 4.1’de verildiği gibi ilişkilendirmişlerdir.

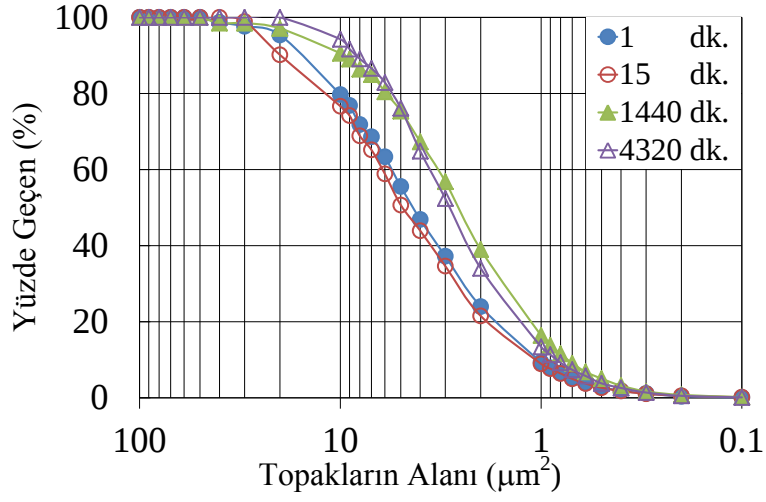
$$e = e_M + e_m \quad (4.1)$$

Burada e_m kümeler ve partiküller içindeki mikro boşluk oranı, e_M ise serbest su ve hava ile ilişkili makro boşluk oranıdır. Makro boşluk oranını mikrograflardan elde etmek mümkün olduğu halde mikro boşlukların elde edilmesi mümkün değildir. Bu çalışmada boşluk oranı (e) konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilirken, makro boşluk oranları (e_M), aynı süreye karşılık gelen mikrograflardan elde edilmiştir. Makro boşluk oranı, görüntü analizi sonucunda elde edilen makro boşlukların alanının yine aynı analizden elde edilen kil bölgelerini temsil eden alanlara oranı olarak tanımlanmıştır.

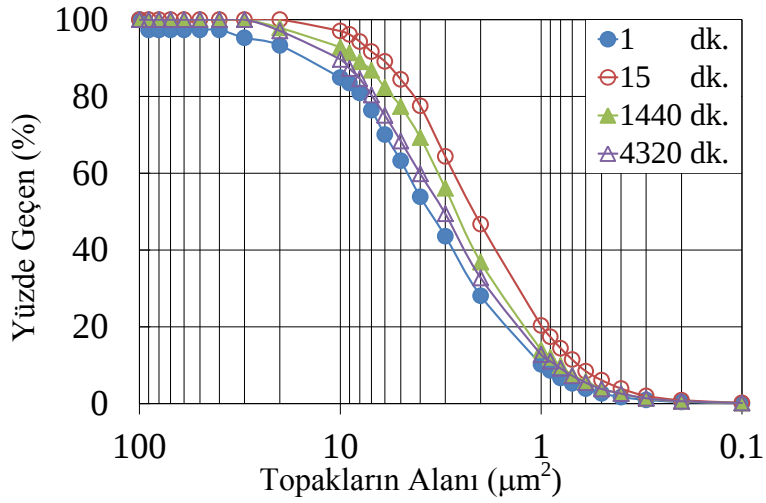
Boşluk oranı ve makro boşluk oranının bilinmesi durumunda Eşitlik 1’den mikro boşluk oranı elde edilebilmektedir. Her bir deney grubunda boşluk oranı değerleri referans boşluk oranı ile normalleştirilmiştir ($e_{ref} = e_{maks}$). Normalleştirme işlemi aynı zamanda e_M ve e_m üzerinde de yapılmıştır (Eşitlik 4.2-6). Burada “i” değeri deney grubundaki 4 farklı yükleme süresini saymaktadır. ξ konsolidasyon deneylerinden elde edilen boşluk oranları üzerinde yapılan normelleştirmeyi, χ ise e_M ’nin aynı yükleme süresi ve konsolidasyon basıncındaki karşılığı olan boşluk oranına göre normalleştirilmesini göstermektedir.



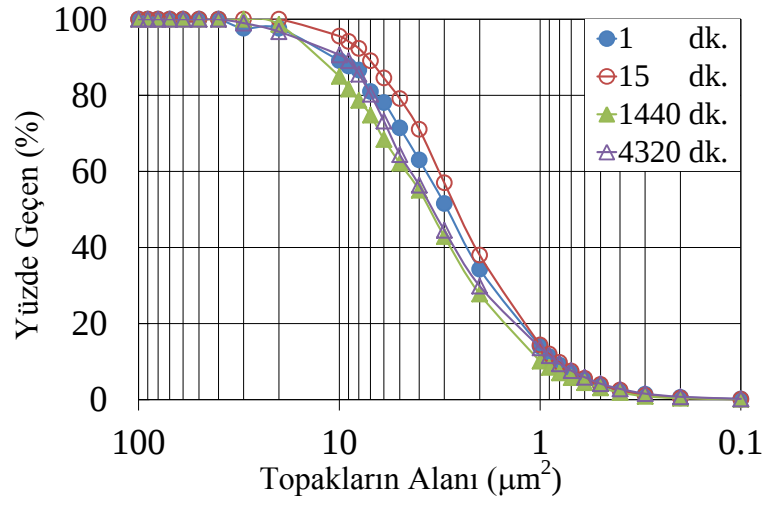
Şekil 4.9: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (20 kPa).



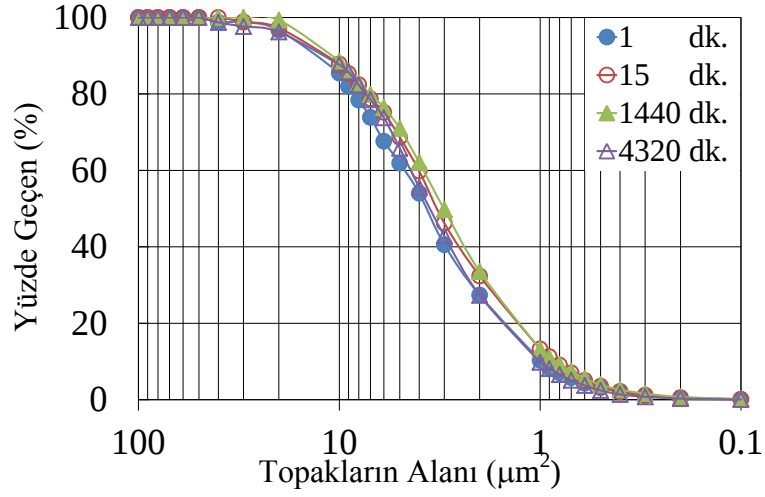
Şekil 4.10: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (50 kPa).



Şekil 4.11: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (100 kPa).



Şekil 4.12: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (200 kPa).



Şekil 4.13: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi (400 kPa).

$$\xi_i = \frac{e_i}{e_{ref}} \quad (4.2)$$

$$\chi_i = \frac{e_{m,i}}{e_i} \quad (4.3)$$

$$(1 - \chi_i) = \frac{e_{m,i}}{e_i} \quad (4.4)$$

$$\frac{e_{m,i}}{e_{ref}} = \xi_i * \chi_i \quad (4.5)$$

$$\frac{e_{m,i}}{e_{ref}} = \xi_i * (1 - \chi_i) \quad (4.6)$$

Konsolidasyon deneyinin doğası gereği boşluk oranı değerleri deney boyunca azalır. Boşluk oranı azalırken, Eşitlik 4.1'in yapısından dolayı makro ve mikro boşluk oranı değerlerinin değişiminde dalgalanma görülmektedir. Ancak e değerlerindeki azalmanın, e_M veya e_m değerlerindeki azalmadan kaynaklandığı söylenemez. Bunun aksine, davranışın kümelerin veya topakların, birikimini ve ayrışmasını içeren tekrarlı bir süreç olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, gözlenen bu davranışın açıklığa kavuşturulması için bir hipotez geliştirilmiştir. Öne sürülen hipoteze göre, deneyin erken evrelerinde boşluk oranındaki azalma, makro boşluklardaki suyun drenajından kaynaklanmaktadır. Makro boşluklardaki azalmayla uyumlu olarak, topaklar bir birine yaklaşarak kayma gerilmesi iletmeye başlamaktadır. Bu süreçte zamanla kümelerde ayrışma meydana gelmektedir. Kil topaklarının ayrışması ile topaklar arasındaki mikro boşluklar makro boşluklara eklenmekte ve böylece mikro boşluklar azalmaktadır. Eş zamanlı olarak konsolidasyon nedeniyle makro boşluklardaki suyun ortamdan drene olması nedeniyle makro boşluklar azalmaktadır. Bu çalışmada normalleştirilmiş makro ve mikro boşluk oranlarının değişimi izlenerek topakların oluşması ve ayrışması incelenmiştir. Topakların birikimi ve ayrışması olayı uygulanan gerilme ve yükleme süresine göre farklılık gösterebilmektedir. 20, 50, 100, 200 ve 400 kPa yüklemeleri sonucunda elde edilen normalleştirilmiş boşluk oranlarının, yükleme süresine göre değişimleri sırasıyla Şekil 4.14.a-e'de verilmiştir. Buna göre 20 kPa gibi düşük gerilme durumunda, erken yükleme evrelerinde mikro boşluklarda artış gözlenmiş uzun süreli yüklemelerde ise mikro boşluklarda azalma gözlenmiştir (Şekil 4.14.a). Bu durum sırasıyla topaklanma ve topaklarda ayrışma olarak yorumlanmıştır. 400 kPa gibi yüksek gerilme durumunda yükleme süresindeki artışla mikro boşluklarda artış-azalma-artış şeklinde bir dalgalanma gözlenmektedir (Şekil 4.14.e). Bu durum sırasıyla topaklanma-ayrışma-topaklanma olarak yorumlanmıştır. Uygulanan diğer gerilme durumlarında sıralama farklı olabileceği gibi, yapılanma derecesi ve uygulanan konsolidasyon basıncına göre farklılık gösterebilir. Bu çalışmada öne sürülen hipotezdeki davranışın göstergeleri, kümelerin farklı zaman ve gerilme düzeylerindeki gradasyonlarının değişimleri ve normalleştirilmiş mikro boşluk oranı değişimleri izlenerek de incelenmiştir.

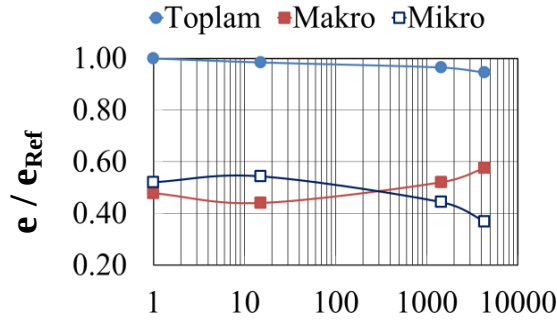
Düşük konsolidasyon basınçlarında, erken yükleme evrelerinde, topaklar arası boşluklarda yani e_m 'de azalma ve yeni topakların oluştuğu görülmüştür. Yüksek

konsolidasyon basınçlarında, erken yükleme evrelerinde, tersine bir sonuç elde edilmiştir. Aynı şekilde düşük ve yüksek konsolidasyon basınçlarındaki davranışlar neredeyse bir birinin tam tersidir. Benzer davranış mikro boşlukların değişiminin incelenmesinde de elde edilmiştir. Büyük mikro boşluk (e_m) değerleri küme oluşumlarını, düşük değerleri ayrışmayı göstermektedir. Bütün konsolidasyon basıncı ve yükleme süreleri göz önüne alındığında ayrışma ve topaklaşma süreci bir birini takip etmektedir. Bu çalışmada öne sürülen hipotez kapsamında mikro mekanik konsolidasyon davranışı genel olarak açıklanmıştır.

Davranış incelik yüzdesi değerleri açısından takip edildiğinde, 20 ve 50 kPa gibi düşük konsolidasyon basınçlarında, erken yükleme evrelerinde, kümelerin olduğu görülürken, uzun süreli yükleme durumlarında ise davranış kümelerde ayrışmanın gözlenmesi şeklinde tam tersi yönde gerçekleşmektedir. Göreceli olarak yüksek, 100, 200 ve 400 kPa yüklemelerde ise davranış genelde düşük yüklemelerde gözlenenin tam tersidir.

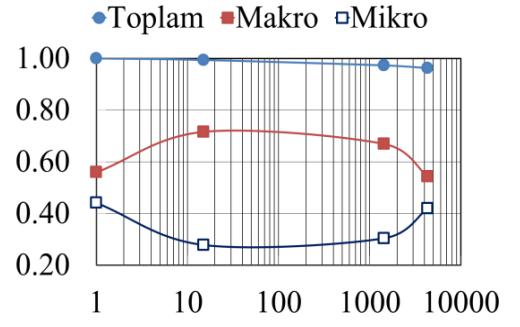
Davranış e_m değerleri açısından incelendiğinde, 20 kPa konsolidasyon basıncında, erken yükleme evrelerinde, e_m değerlerinin arttığı, uzun süre yükleme durumlarında ise azaldığı gözlenmektedir. Bu durum sırası ile, kümelerin oluşması ve ayrışması anlamına gelmektedir. 50 kPa yükleme durumunda ise, ilk 15 dakikada e_m değerinin azaldığı, uzun süreli yükleme durumunda ise arttığı görülmektedir. Bu nedenle, 50 kPa yükleme sonunda mikro boşluk oranı, 20 kPa yükleme sonunda elde edilenden daha büyüktür. 100 ve 200 kPa yükleme durumlarında ise e_m değerleri erken yükleme evrelerinde azalıp, zamanla artış ve daha sonra azalma göstermektedir ki bu davranış 400 kPa durumunun tam tersidir.

Beklendiği gibi, incelik yüzdesi değişimindeki genel eğilimin, e_m 'deki değişimin tam tersi yönde oluşmuştur. Çünkü incelik yüzdesinin küçük değerleri iri taneli gradasyonu işaret etmektedir. İncelik yüzdesinin küçük değerleri ile e_m 'nin büyük değerleri, aynı anlama gelmekte ve büyük kümeleri göstermektedir. Bu sonuç, öne sürülen hipotezi desteklemek açısından çok değerlidir. Zira incelik yüzdesi sadece sayısallaştırılmış mikrograflardan elde edilmişken, e_m ödometre ölçümleri ve mikrografların birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. Bu nedenle, makro davranış ve mikro ölçümler arasında bir bağlantı kurulabilir.



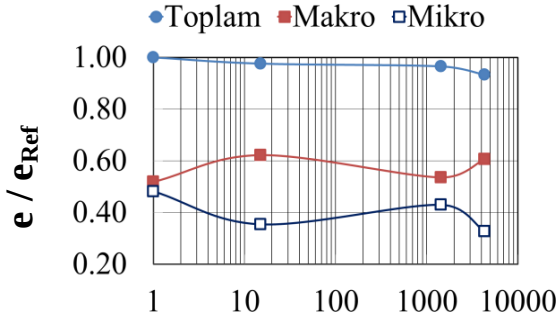
Yükleme Süresi (dk)

a



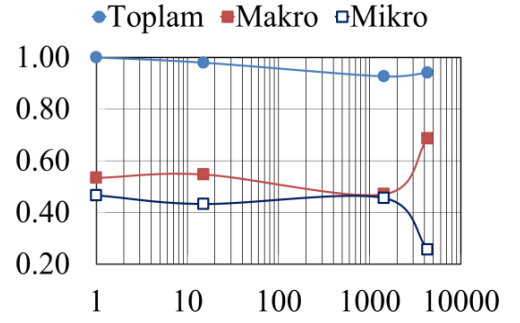
Yükleme Süresi (dk)

b



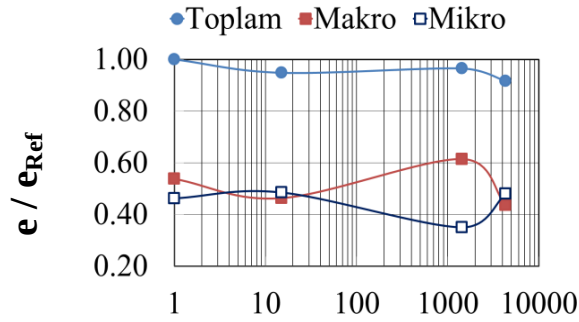
Yükleme Süresi (dk)

c



Yükleme Süresi (dk)

d



Yükleme Süresi (dk)

e

Şekil 4.14: Normalleştirilmiş boşluk oranlarının yüklemeye süresine göre değişimi a) 20 kPa, b) 50 kPa, c) 100 kPa, d) 200 kPa, e) 400 kPa.

4.1.2. ÖDOMETRE DENEYLERİNDE ESEM GÖRÜNTÜLERİNİN İKİNCİL KONSOLİDASYON SÜRECİNDEKİ DAVRANIŞI YORUMLAMAK İÇİN KULLANILMASI

Bu kısımda klasik ödometre deneyinde kilin ikincil konsolidasyon davranışı sürecinde mikro boyuttaki mekanizmanın araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için literatürdeki iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Bunlardan ilki Navarro ve Alonso (2001), ikincil konsolidasyon davranışı için kil-su etkileşimi temel teorilerini esas alan ve bunları, makroskopik ödometre deney sonuçları ile ilişkilendirerek, kil topaklarından makro boşluklara, mikro boşluk suyu transferini öngören bir dehidratasyon modelidir. Kullanılan ikinci model ise Yin (1999) tarafından öne sürülen limit değere sahip doğrusal olmayan analitik krip fonksiyonudur.

4.1.2.1. Navaro Alonso Modelinin Kullanılması

Bu kısımda klasik ödometre deneyinde kilin ikincil konsolidasyon davranışı sürecinde mikro boyuttaki mekanizmanın araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla bir boyutlu konsolidasyon deneyleri sonunda çekilen, ESEM mikrografları ile konsolidasyon süreci takip edilmiştir. Deneylerin sonunda alınan mikrografların sayısallaştırılması ile, kil topakları alansal büyüklüklerinin derecelenme eğrileri elde edilmiştir. Derecelenme eğrilerinde, yaklaşık olarak eğrilerin ortasında yer alan ve eğriler arasında en büyük farkın gözlenebildiği, $5\mu\text{m}^2$ alanı eşik değeri olarak tespit edilmiştir. Bu eşik değere karşılık yüzde geçen değeri İncelik Yüzdesi (İY) olarak adlandırılarak kil topaklarının dağılması ve yeniden topaklanmasını gösteren bir parametre olarak kullanılmıştır. Kil topakları içindeki mikro boşluk oranının kil topaklarının dağılması ile azaldığı, yeniden topaklanmasıyla arttığı hipotezi ile incelik yüzdesinin, mikro boşluk oranı değişimini yansıttığı gösterilmiştir. Diğer taraftan, Navarro ve Alonso (2001), ikincil konsolidasyon davranışı için kil-su etkileşimi temel teorilerini esas alan ve bunları, makroskopik ödometre deney sonuçları ile ilişkilendirerek, kil topaklarından makro boşluklara, mikro boşluk suyu transferini öngören bir dehidratasyon modeli, geliştirmişlerdir. Bu kısımda Navarro ve Alonso (2001) modeli tarafımızca elde edilen mikro boyuttaki incelik yüzdesi parametresi ile birlikte değerlendirilmiştir. Böylece, daha önceki çalışmalarda (Yigit 2010, Yigit ve Cinicioglu 2011,2012) ortaya atılan konsolidasyon sürecinde kil topaklarının dağılması ve yeniden topaklanması hipotezi,

sayısallaştırılmış mikrograflar yardımıyla bir boyutlu ikincil konsolidasyon modeline yerleştirilmiştir.

Konsolidasyon sürecinde zamana bağlı oturmaların hesaplanabilmesi için iki farklı hipotez bulunmaktadır; hipotez A'ya göre bu tür oturmalar birincil konsolidasyon sonrası oluşurken, hipotez B'ye göre tüm konsolidasyon sürecinde meydana gelmektedir. Ne var ki bu iki hipotezde de, ödometre deney sonuçlarından elde edilen düşey deformasyon veya boşluk oranı - zaman grafiklerinin, birincil konsolidasyon sonrası kısmı, logaritmik fonksiyonlar kullanılarak modellenmektedir.

Delage ve Lefebvre (1984), bir boyutlu konsolidasyon deneyinde, farklı konsolidasyon kademelerinde kil yapısındaki değişimi incelemek için civa poroziyometresi deneyini kullanmışlardır. Önkonsolidasyon basıncında kil yapısındaki göçmenin aşamalı olarak gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Griffiths ve Joshi (1989), konsolidasyon deneyi numunelerinde gerçekleştirdikleri civalı poroziyometri deney sonuçlarından, konsolidasyon nedeniyle oluşan hacim değişiminin büyük boşlukların hacim değişiminden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Kil toprakları içindeki boşlukların ise konsolidasyon sürecinden etkilenmediğini belirtmişlerdir. Griffiths ve Joshi (1991), ikincil konsolidasyon sürecinde 100-1000nm boyutundaki boşlukların etkilendiğini göstermişlerdir. Delage ve Lefebvre (1984), bu boyuttaki boşlukların, ikili yapı kuvvetlerinin etkiyebilmesi için çok büyük olduğunu vurgulamışlardır. Bu nedenle, Griffiths ve Joshi (1991), ikincil konsolidasyonun, mikro boşlulardaki suyun drenajından kaynaklanmadığı sonucuna varmışlardır.

Buna karşın, Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005), ikincil konsolidasyon sürecinde gerçekleşen mikro konsolidasyon sürecinin, kil topraklarının, makro boşluklara doğru su kaybı ile oluştuğunu öne sürmüşlerdir. Bu düşünceye dayanarak, ikincil konsolidasyon sürecinde, hacimsel deformasyonu açıklamak için Navarro ve Alonso (2001), Alonso ve Navarro (2005) kil-su etkileşimi temel teorilerini, makroskopik ödometre deney sonuçları ile ilişkilendirerek, kil topraklarından makro boşluklara, mikro boşluk suyu transferini içeren konsolidasyon modelini geliştirmişlerdir.

Navarro ve Alonso (2001), Alonso ve Navarro (2005) tarafından önerilen, modelde, kil topaklarının permeabilitesi, boyutu ve rijitliğinin ölçüsü olan bir malzeme parametresi tanımlanarak; bu parametre ikincil konsolidasyonda mikro boşluktan makro boşluğa kütleli su transferi davranışını kontrol eden parametre olarak önerilmiştir. Ancak, bu malzeme parametresinin mikro boyuttaki su transferini kontrol ettiği savunulmakla birlikte, bu parametre mikro boyutu yansıtan hiçbir deney veya gözlemden elde edilmemiştir. Sadece makro boyutta ölçülen konsolidasyon davranışına ve bu davranışın ana mekanizması olduğu iddia edilen klasik konsolidasyon teorisi prensiplerine dayandırılmış kuramsal bir modellemeye bağlı olarak mikro boyut parametresi olarak önerilmiştir.

Bu doktora çalışmasının ana hedeflerinde biri ise mikro boyuttaki davranış ile makro boyuttaki konsolidasyon deneyleri ile ölçülen davranış arasında gerçek bir bağ kurabilmektir. Bunun için konsolidasyon deneylerinin farklı yükleme ve ikincil konsolidasyon sürelerine ait evrelerini yansıtacak şekilde alınan mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen bulgularla Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005)'de aktarılan modelin geçerliliği araştırılmıştır. Bunun için, mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen incelik yüzdesi, İY ile Navarro ve Alonso tarafından önerilen malzeme parametresi ilişkilendirilmiştir.

Navarro ve Alonso (2001)) ve Alonso ve Navarro (2005) tarafından önerilen modelde mikro boşluk suyunun makro boşluklara transferi C malzeme parametresi tarafından kontrol edilmektedir ve C parametresi, mikro boşluk suyunu içinde barındıran kil topaklarının permeabilitesi, boyutu ve rijitliğinin bir ölçüsüdür.

Diğer taraftan, ödometre deneylerinde gerilme deformasyon davranışının yanı sıra, mikro boşlukların SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri ile takip edildiği çalışmalardan, Adamcewicz vd. (1997), basınç artışıyla tane gruplarının büyüklüğünde azalma gözlemlendiğini, bu durumun taneler arası bağların yenilmesinden ve kopmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Bu araştırmaların bir arada irdelenmesi konsolidasyon süreci veya özel olarak konsolidasyon sürecinin sadece suyun transferi ile açıklanamayacağını ve su

transferinin yanı sıra kil topraklarının parçalanma veya birbirlerine entegre olarak topraklanma davranışının da sürecin içine dahil edilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Bu doktora çalışmasında, Navarro ve Alonso (2001) tarafından önerilen modeldeki malzeme parametresi C ile ikincil konsolidasyon sürecinin çeşitli evrelerine ait mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen ve kil topraklarının boyutlarındaki değişime işaret eden incelik yüzdesi İY değerleri arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmış ve ikisi arasında bir ilişki elde edilmiştir. Bu sonuç mikro konsolidasyonu açıklamak için sadece mikro boşluktan makro boşluğa su transferi önermesinin yeterli olmadığını ifade etmektedir. Ayrıca, bu doktora tezi kapsamında mikro boyutta elde edilen incelik yüzdesi parametresi makro boyuttaki davranış modelinin içine katılmış olup, bu da benzer çalışmalar içinde bir ilk olma niteliğindedir.

Navarro ve Alonso (2001) ödometre deneyinden elde edilen boşluk oranı (e) ve bunun makro ve mikro bileşenlerini (e_M ve e_m) Eşitlik 4.1'deki gibi ilişkilendirmişlerdir. Burada mikro boşluk oranı, e_m topraklar içinde hapsolmuş olan mikro boyuttaki boşlukların oranı, e_M ise topraklar arasında serbest olarak yer alan makro boşlukların oranıdır.

Navarro ve Alonso (2001) ikincil konsolidasyonun mikro boşluklardan makro boşluklara suyun kütleli transferi ile oluştuğu hipotezine dayandırdıkları bir model geliştirmişler ve klasik ödometre deneyinin ikincil konsolidasyon aşamasını önerdikleri mikro boşluktan makro boşluğa su transferi teorisine göre modellemişlerdir. Bu modelleme sonunda, mikro boşluk oranı değişim hızını Eşitlik 4.7'deki gibi elde etmişlerdir.

$$\dot{e}_m = (1 + e) * \frac{G}{\rho_m} * [\sigma_{i-1} * \text{Exp}[\Delta e_m / D] - \sigma_i] \quad (4.7)$$

Burada, D , zeminin topraklarının içindeki mikro yapının gerilme ortamını etkileyen ve Navarro ve Alonso (2001) tarafından şişme basıncı, π olarak tanımlanan parametrenin mikro boşluk oranı ile değişimini gösteren parametre, σ_i ve σ_{i-1} sırasıyla şimdiki ve önceki yükleme kademelerindeki toplam gerilmelerdir. Δe_m , şimdiki yükleme kademesinde oluşan, mikro boşluk oranındaki değişimdir ve yükleme kademesi

başlangıcı ve sonu arasındaki mikro boşluk oranı farkına denktir ($\Delta e_m = e_{m0} - e_m$). Navarro ve Alonso çalışmasında kil topaklarının içindeki mikro boşluk suyu ile topakların arasında serbest olarak yer alan makro boşluklardaki su arasındaki kütleli transferin ivmesini tanımlayan G/ρ_m parametresi transfer katsayısı olarak tanımlanmıştır. Kil topakları dış sınırındaki makro boşluk suyu potansiyeli ile, iç bünyedeki potansiyel farkı mikro konsolidasyon olayını tetiklemektedir. Navarro ve Alonso (2001), belirli bir kil topağının mikro boşluklarından makro boşluklara transfer edilen suyun kütle transfer hızının hesaplanması için klasik konsolidasyon teorisi prensiplerini uygulayan bir modelleme geliştirmişlerdir. Bu hız, zamanla veya alternatif olarak kil topağı hacimsel deformasyonu ile azalmaktadır. Ancak yeni bir yük kademesinde transfer hızı yine artarak bir önceki kademenin başlangıç evrelerindeki değere benzer bir değere yükselmektedir. Bu nedenle, her bir yükleme kademesinde, ikincil konsolidasyon başlangıç hızlarının benzer olacağı beklenmektedir. Bu eğilim G/ρ_m parametresi ile gösterilebilmektedir. Navarro ve Alonso (2001), Eşitlik 4.7'yi kullanarak mikro boşluk oranındaki azalmayla G/ρ_m parametresinin üstel fonksiyon şeklinde azaldığını göstermişler ve $G/\rho_m - \Delta e_m$ grafiğinde geçirilen en uygun eğrinin Eşitlik 4.8'deki gibi olacağını belirtmişlerdir. Eşitlik 4.8'deki C parametresini, mikro boşluk suyunu içeren kil topaklarının, permabilitesinin, boyutunun ve rijitliğinin bir ölçüsü olan malzeme parametresi olarak tanımlamışlardır.

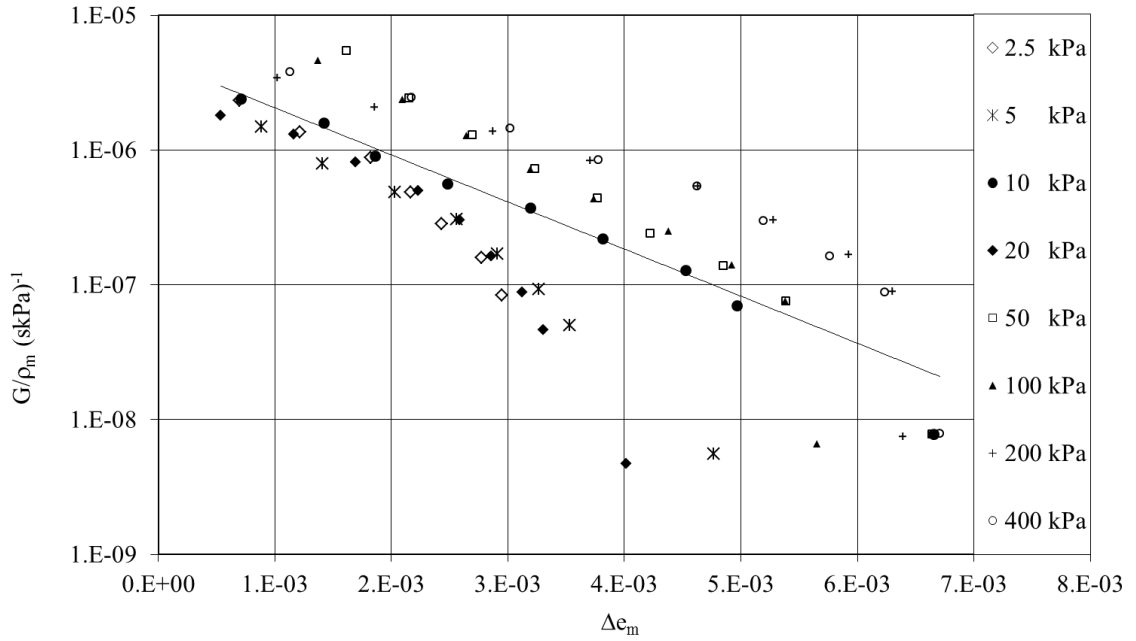
$$\frac{G}{\rho_m} = \frac{G_0}{\rho_{m0}} * \text{Exp}[-\Delta e_m / C] \quad (4.8)$$

Sayısal analiz sonuçları farklı yük aşamaları veya farklı ikincil konsolidasyon süreleri içinde, kil topakları boyutlarının parçalanma veya farklı kil topaklarının birbirine tutunması ile topaklaşma şeklinde değiştiğini göstermektedir. Bu sonuç ayrıca yapılan sayısallaştırma analizleri ile İncelik Yüzdesi olarak tanımlanan bir parametre ile sayısal olarak da tanımlanmıştır. Halbuki Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005)'de topakların parçalanması veya birleşerek büyümesi gibi bir mekanizma tanımlanmamıştır. Sadece topakların mikro boşluklarından makro boşluklara su transferi veya genel ortam efektif gerilme değerinin topak içindeki şişme basıncından büyük olması durumunda ise makro boşluktan mikro boşluğa su transferi mekanizması tanımlanmıştır.

Bu durumda, tarafımızca gözlenen parçalanma-topaklaşma mekanizması ile Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005) önerdikleri model arasında bir geçiş veya karşılıklılık noktasını aramanın mikro davranışı anlamak veya değerlendirmek bakımından yararlı olacağı düşünülmüştür. Eşitlik 4.8, C ve Δe_m parametrelerine bağlı olarak ikincil konsolidasyon sürecinin ölçümlerine eğri uydurularak elde edilmiş bir eşitliktir. Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005) teorisi ikincil konsolidasyon sürecinde ölçülen boşluk oranı değişimlerinin sadece mikro boşluktaki değişimden kaynaklandığı tezini savunduğu için eşitliğin içinde Δe_m vardır. C ise G/ρ_m ve Δe_m 'i bağlayan ve ikincil konsolidasyon ölçümlerinden bulunan bir parametredir.

Buna göre Navarro ve Alonso yaklaşımı, Yüksel (2007) konsolidasyon ölçümlerine uygulanırsa bir C değeri elde edilecektir. Diğer taraftan tarafımızca yapılan mikro boyuttaki davranışa ait mikrografların sayısallaştırma analizinin sonucu olarak bir incelik yüzdesi parametresi elde edilmiştir. Buna göre C parametresi ile tarafımızca tanımlanan İY parametresi arasında bir karşılıklılık olmalıdır. Diğer taraftan eğer böyle bir karşılıklılık elde edilirse bu, Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005) teorisinin önerdiğinden daha farklı bir mekanizmanın varlığının göstergesi olacaktır.

Bunun için Yüksel (2007) tarafından gerçekleştirilen konsolidasyon deneylerinde, ikincil oturmaları Navarro ve Alonso (2001) dehidratasyon modeliyle hesaplamak için $G/\rho_m - \Delta e_m$ grafikleri çizilerek Eşitlik 4.8 formunda en uygun eğriyi veren parametreler bulunmuştur. Örneğin Şekil 4.15'de 400 kPa'lık konsolidasyon basıncının 1440 dakika süre etkitildiği deneyde her bir basınç kademesindeki mikro boşluk oranı değişimi ile transfer katsayısının değişim grafiği verilmiştir.

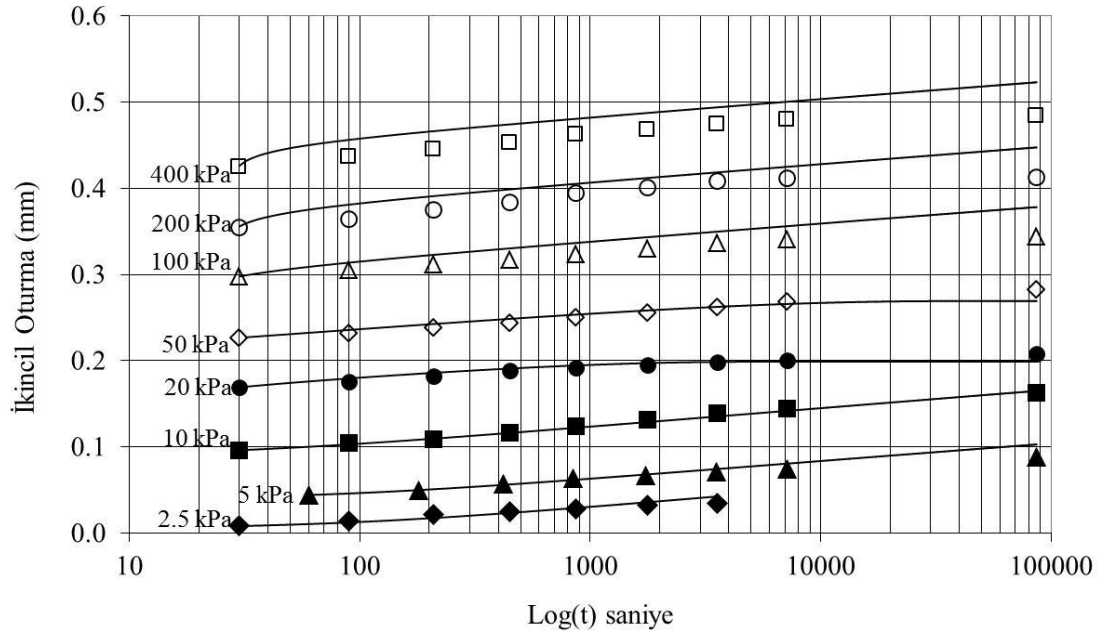


Şekil 4.15: 400 kPa (1440 dakika süreli yükleme) basınç kademesine çıkarken gerçekleştirilen yükleme adımlarında, mikro boşluk oranı değişimi ile G/ρ_m parametresinin değişimi.

Buna göre 400 kPa'lık konsolidasyon basıncının 1440 dakika süre ile etkitildiği deneyde en uygun eğri, $G_0/\rho_{m0} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ (skPa)}^{-1}$ ve $C = 1.243 \cdot 10^{-3}$ değerinde geçmektedir. 400 kPa'lık maksimum konsolidasyon basıncının 1440 dakika süre ile etkitildiği deneyde, maksimum basınç kademesine ulaşınca kadar geçen her bir yükleme kademesinde oluşan ikincil oturmalar Şekil 4.16'da verilmiştir.

Navarro ve Alonso (2001) tarafından önerilen ikincil konsolidasyon modelinde C parametresi, kil topaklarının boyutu, permeabilitesi ve rijitliğinin bir ölçüsü olan malzeme parametresi olarak verilmiştir. Ancak, Navarro ve Alonso yaklaşımı geçerli olsa bile kil topakları içindeki mikro boşluk suyunun, makro boşluk suyuna hareketi nedeni ile mutlaka kil topakları boyutu ve dizilimleri etkilenecektir. Diğer taraftan, boyut değişimi tarafımızca mikro boyutta gözlenmiştir ve kil topakları dikkate alındığında, boyutları ve dizilimleri değiştiğinden, makro özelliklere etkisi de değişmelidir. Bu nedenle Navarro Alonso (2001)'in aksine, kil topaklarının boyutu ve dizilimindeki değişimin, permeabilite ve kil topaklarının rijitliğini de değiştireceğinden C 'nin bir sabit olamayacağı düşünülmektedir.

Yüksel (2007)'de her bir maksimum konsolidasyon basıncının (20, 50, 100, 200 ve 400 kPa), 1440 ve 4320 dakika süre ile etkitildiği deneylerdeki G_0/ρ_{m0} ve C parametreleri Navarro ve Alonso (2001) yöntemine göre elde edilmiştir. Bu C değerlerine karşılık, her bir deneydeki mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen incelik yüzdesi değerleri Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16: 400 kPa (1440 dakika süreli yükleme) basınç kademesine çıkarken gerçekleştirilen yükleme adımlarında oluşan ikincil oturmalar.

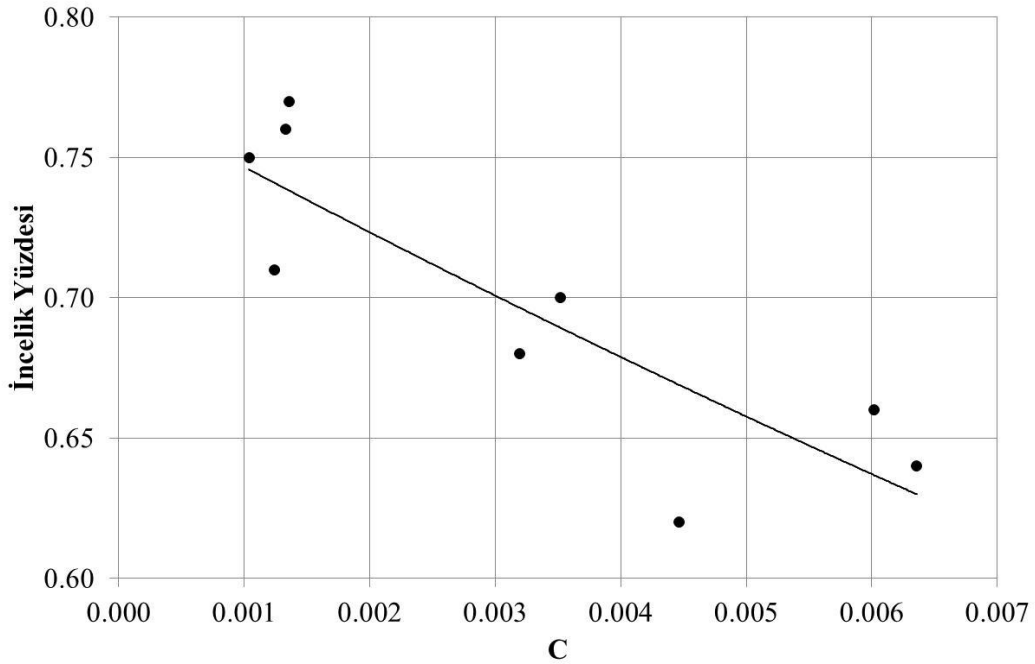
Buna göre, incelik yüzdesi değerindeki artışa karşılık C parametresinde azalma meydana gelmektedir ve aralarında bir ilişki elde edilebileceği görülmektedir. C ve İY arasındaki ilişki grafikteki en uygun eğri ile Eşitlik 4.9'daki gibi elde edilmiştir.

$$\dot{IY} = \dot{IY}_0 * \text{Exp}[H * C] \quad (4.9)$$

Burada, $\dot{IY}_0$, başlangıç incelik yüzdesi değeri ve H'nin ise incelik yüzdesinin değişimini tanımlaması sebebi ile toprak boyut değişim parametresi olarak tanımlanabilir. Toprak boyutlarının değişimi mikro-makro boşluklar arası çift yönlü olabilecek su transferi ile birlikte toprak rijitliğine de bağlı olmak durumundadır. Bu değerlendirmeler H'nin bir malzeme parametresi olduğunu düşündürmektedir. Bu değerler, gerçekleştirilen deneyler için sırasıyla, %77 ve 0.032 olarak elde edilmiştir.

Eşitlik 4.9'dan, C parametresi çekilerek, Eşitlik 4.8'da yerine yazılırsa, transfer katsayısı Eşitlik 4.10' daki gibi incelik yüzdesi değişimi ve su transferinin birleşik etkisine bağlı olarak elde edilebilir.

$$\frac{G}{\rho_m} = \frac{G_0}{\rho_{m0}} * \text{Exp} \left[\frac{0.032 * \Delta e_m}{\ln \left[\frac{iY}{iY_0} \right]} \right] \quad (4.10)$$



Şekil 4.17: İncelik yüzdesi ve C parametresi arasındaki ilişki.

Böylece, mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen ve kil topaklarının konsolidasyon sürecinde, dağılması veya yeniden topaklanmasını gösteren incelik yüzdesi parametresi Navarro ve Alonso (2001) tarafından önerilen ikincil konsolidasyon modelini modifiye ederek kullanılmıştır. Yiğit ve Çinicioğlu (2011)'de incelik yüzdesinin, konsolidasyon kademesi ve yükleme süresi ile değişimi verilmiştir. Bu bulgular konsolidasyon ve ikincil konsolidasyon sürecinde zemin topaklarının parçalanarak boyutunun küçüldüğünü veya birbirine eklenerek boyutunun büyüdüğünü gösteren bilgiyi vermektedir. Söz konusu bulguların bir özeti Tablo 4.2'de sunulmaktadır. Daha önce, derecelendirme eğrilerinde, incelik yüzdesindeki artış, küçük kil topakları ve düşük mikro boşluk oranı ile, incelik yüzdesindeki azalma büyük kil

topakları ve büyük mikro boşluk oranı ile ilişkilendirilmiştir. Buna göre Eşitlik 4.10'da incelik yüzdesindeki artış, transfer katsayısında azalma ve buna bağlı olarak Eşitlik 4.7'de düşük mikro boşluk oranı değişim hızına karşılık gelmektedir. İncelik yüzdesindeki azalma ise, yüksek transfer katsayısı ve yüksek mikro boşluk oranı değişim hızına karşılık gelmektedir. Tablo 4.2'de maksimum konsolidasyon basıncında aynı yükleme süreleri göz önüne alındığında, 1440 dakikalık yükleme süresinde, 20-50, 50-100, 100-200 ve 200-400 kPa basınç kademelerindeki artışla incelik yüzdesi sırasıyla, artış, artış, azalma ve artış yönünde değişmekte buna bağlı olarak, kil topaklarının dağılma ve yeniden topaklanması, dağılma, dağılma, topaklanma ve dağılma şeklinde değişmektedir. 4320 dakikalık yükleme süresinde ise, incelik yüzdesi sırasıyla, artış, azalma, azalma ve artış yönünde değişmekte buna bağlı olarak, kil topaklarında, dağılma, topaklanma, topaklanma ve dağılma şeklinde değişim elde edilmektedir. Bu bulgulara mikro – makro boşluk suyu transferinin her iki yönde olabileceğini ve transfer mekanizmasının dağılma ve topaklaşma mekanizmaları ile birlikte değerlendirilmesinin gerekliliğini ifade etmektedir.

Tablo 4.2: Yükleme süresi ve kademesi ile incelik yüzdesi değişimi.

Basınç Kademesi (kPa)	20	50	100	200	400
İY1440 dk (%)	67	75	77	62	71
İY4320 dk (%)	70	76	68	64	66

Konsolidasyon deneyinin doğası gereği boşluk oranı değerleri deney boyunca azalır. Boşluk oranı azalırken, Eşitlik 4.1'in yapısından dolayı makro ve mikro boşluk oranı değerlerinin değişiminde dalgalanma görülmektedir. Ancak e değerlerindeki azalmanın, e_M veya e_m değerlerindeki azalmadan kaynaklandığı söylenemez. Bunun aksine, davranışın kümelerin veya topakların, birikimini ve ayrışmasını içeren tekrarlı bir süreç olduğu düşünülmektedir. Yiğit ve Çinicioğlu (2011, 2012)'de bu davranışın açıklığa kavuşturulması için bir hipotez geliştirilmiştir. Öne sürülen hipoteze göre, deneyin erken evrelerinde boşluk oranındaki azalma, makro boşluklardaki suyun drenajından kaynaklanmaktadır. Makro boşluklardaki azalmayla uyumlu olarak, topaklar birbirine yaklaşarak kayma gerilmesi iletmeye başlamaktadır. Bu süreçte zamanla kümelerde ayrışma meydana gelmektedir. Kil topaklarının ayrışması ile topaklar arasındaki mikro

boşluklar makro boşluklara eklenmekte ve böylece mikro boşluklar azalmaktadır. Eş zamanlı olarak konsolidasyon sırasında hidrolik eğimin yönünde oluşan değişimler suyun mikro boşluktan makro boşluğa transferinin yanısıra makro boşluktan mikro boşluğa transferine de sebep olabilmekte ve bu iki durum topraklarda hacim değişimi sonucu, toprakların dağılmasına ya da daha büyük toprakların oluşmasına sebep olabilmektedir.

Bu doktora çalışmasında, Navarro ve Alonso (2001) tarafından öne sürülen ikincil konsolidasyon dehidratasyon modelindeki, mikro boşluk suyunu içeren kil topraklarının, permabilitesinin, boyutunun ve rijitliğinin bir ölçüsü olan C malzeme parametresi; Yiğit ve Çinicioğlu (2011)'de tanımlanan, mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen derecelendirme eğrileri ve incelik yüzdesi parametresi ile yeniden düzenlenmiştir.

Böylece deney sonlarında çekilen mikrograflardan elde edilen bulgular modele yerleştirilmiştir. Sayısallaştırılmış mikrograflardan elde edilen kil toprakları büyüklükleri ilk defa bir konsolidasyon modeline yerleştirilmiştir. Bu tür çalışmalar için bunun önemli bir ilk adım olduğu ve bir mikro parametrenin böyle makro boyuttaki bulgular cinsinden ifade edilmesinin yolunun açıldığı düşünülmektedir.

4.1.2.2. Doğrusal Olmayan Analitik Krip Fonksiyonunun Kullanılması

Bu kısımda, Yin (1999) tarafından öne sürülen, limit değere sahip doğrusal olmayan analitik krip fonksiyonu, ESEM görüntülerinden elde edilen incelik yüzdesi parametresi ile birlikte kullanılacaktır. Yin (1999)'da krip fonksiyonu Eşitlik 4.11'deki gibi verilmiştir.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\psi}{v} \text{Ln} \left[\frac{t + t_0}{t_0} \right] \quad (4.11)$$

Burada, $\Delta\varepsilon$ krip birim deformasyonu, t krip deformasyonu için geçen süre, t_0 referans zaman, ψ/v Yin ve Graham (1994)'de kullanılan krip parametresi, v özgül hacimdir. Eşitlik 4.11'deki ψ/v parametresi Eşitlik 4.12'deki gibi açılmaktadır.

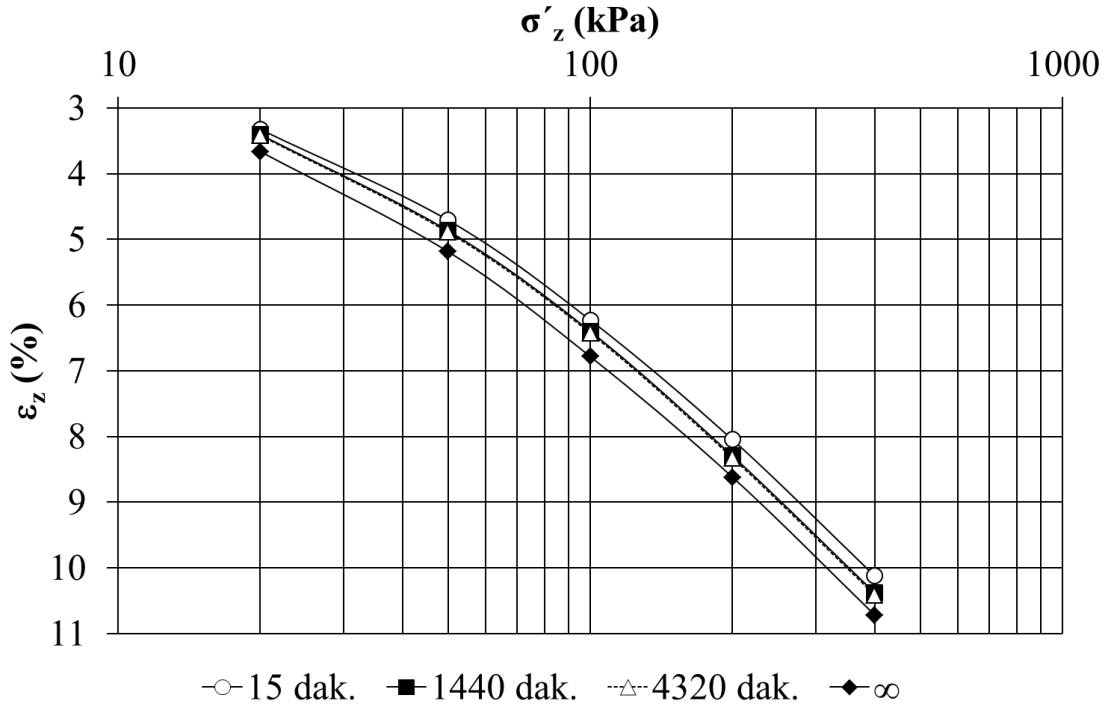
$$\frac{\psi}{v} = \frac{\psi_0'}{1 + (\psi_0' / \Delta \varepsilon_1) \ln[(t + t_0) / t_0]} \quad (4.12)$$

Burada; $\Delta \varepsilon_1$ kripi birim deformasyonunun limit değeri, ψ_0' ise ψ/v nin referans zamandaki değeridir. Eşitlik 4.12 gereği ψ/v sabit olmayıp kripi süresindeki artışla azalmaktadır. Ayrıca ψ/v parametresinin gerilme düzeyine bağlı olduğu da belirtilmelidir.

Bu doktora çalışmasında, kripi fonksiyonu kullanılarak, ödometre deneylerinden 400 kPa yüklemesinin 1440 dakika süre ile uygulandığı deney sonucu Şekil 4.18'deki gibi modellenmiştir. Birincil konsolidasyon yaklaşık olarak 15 dakikada sona ermektedir. Bu nedenle referans zaman 15 dakika olarak alınmıştır ($t_0 = 15$ dakika). 1440 dakikalık toplam yükleme süresinin $1440 - 15 = 1425$ dakikası kripi yüklemesi olarak gerçekleşmektedir ($t = 1425$ dakika). Modelin deney sonuçlarına uygulanması ile, 400 kPa'lık yüklemenin 4320 dakika süre uygulandığı deney modellenmiştir (Şekil 4.18). Bununla birlikte, ψ_0' ve $\Delta \varepsilon_1$ parametreleri, deneysel çalışma kısmında açıklanan, 20, 50, 100 ve 400 kPa'lık yüklemelerin herbiri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu yüklemelerin, 15, 1440 ve 4320 dakika süre ile uygulandığı deneyler için ψ/v parametresi, ψ_0' , $\Delta \varepsilon_1$ ve t 'ye bağlı olarak elde edilmiştir.

ψ/v parametresi, Eşitlik 4.12'nin doğası gereği artan yükleme süresi ile azalmaktadır. Şekil 4.19,20'de, yükleme süresi ile gradasyon eğrilerinin farklı yönde değişebildiğini göstermektedir. Sonuçta gradasyon eğrilerinin ve kripi hızının yükleme süresi ile değiştiği ortadadır. Bu nedenle, İY ile ψ/v parametreleri arasında bir ilişkinin varolabileceği düşünülmüştür. Ödometre deney sonuçları, deformasyon – zaman grafiğinden birincil konsolidasyon bitiş zamanı elde edilmiştir. Yine ödometre deney sonuçlarından, gerilme – deformasyon grafiklerinden, birincil konsolidasyon sonrası kripi deformasyonları elde edilmiştir. Birincil konsolidasyon bitiş süresi, yükleme süresi ve kripi deformasyonları kullanılarak, 20, 50, 100 ve 400 kPa'lık yüklemelerin herbiri için 15, 1440 ve 4320 dakikalık yükleme sürelerine bağlı olarak ψ/v , kripi hızları elde edilmiştir. Bu kripi hızları, gradasyon eğrileri kısmında hesaplanan, İY, incelik yüzdesi değerleri ile birlikte, ait oldukları, gerilme ve yükleme süresine bağlı olarak Şekil 4.21'de verilmiştir. Şekilde sembollerin büyüklükleri yükleme süresi ile orantılıdır.

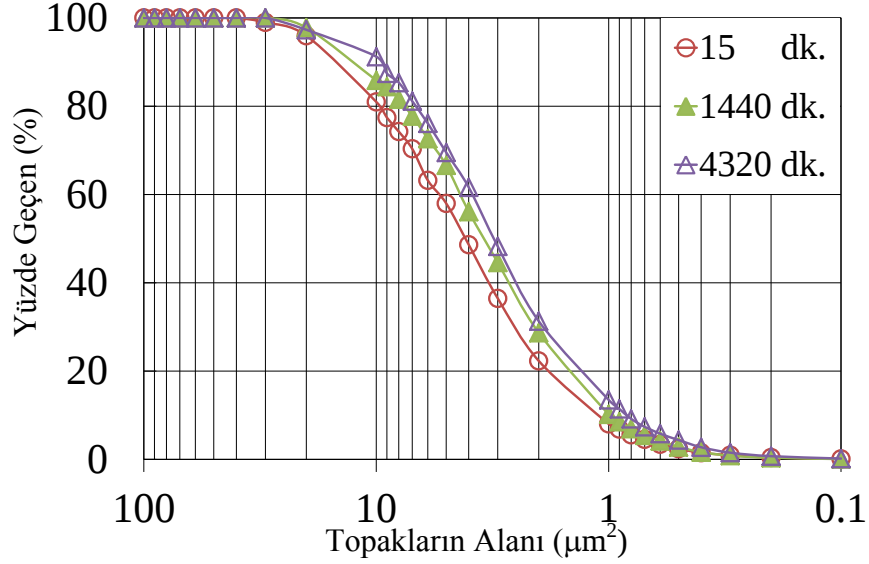
Şekilde herhangi bir gerilme değerini gösteren sembolün en küçük değeri 15 dakikalık yüklemeyi, orta büyüklükteki sembol 1440 dakika yüklemeye süresini, en büyük sembol ise 4320 dakikalık yüklemeye süresini göstermektedir. 20 ve 50 kPa'lık nispeten düşük gerilmelerde, incelik yüzdesinin yüklemeye süresindeki artış ile arttığı görülmektedir.



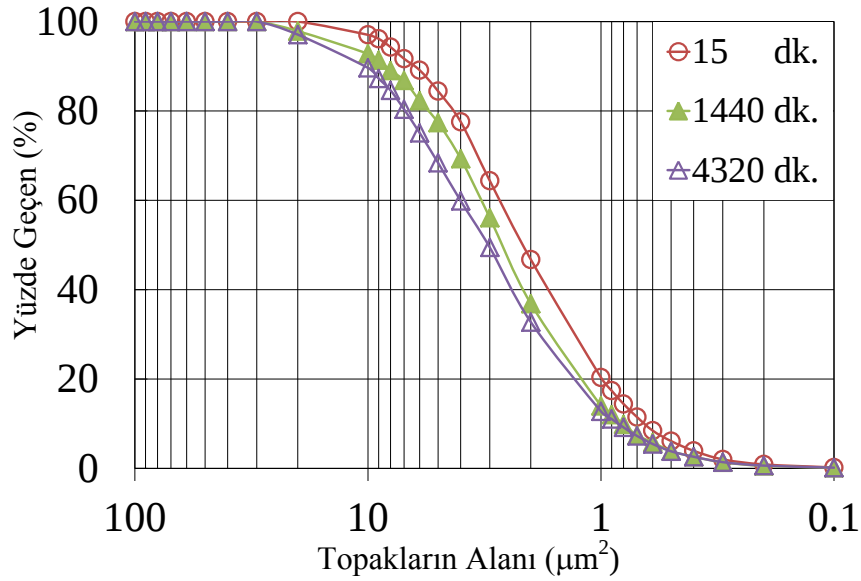
Şekil 4.18: 400 kPa'lık maksimum basınç kademesinde 1440 dakika beklenilen ödometre deneyine ait zaman çizgileri.

İncelik yüzdesi artışının topakların ayrışması olarak yorumlanmaktadır. 100, 200 ve 400 kPa'lık nispeten yüksek gerilmelerde ise, incelik yüzdesi değeri artan yüklemeye süreleri ile azalmaktadır. Bu durum ise topaklanma olarak yorumlanmıştır. ψ/v parametresi her gerilme durumunda, yüklemeye süresi ile azalmaktadır. 20 ve 50 kPa'lık gerilmelerde, ψ/v parametresi ile İY, ters yönde değişmekle birlikte, aralarında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. 100, 200 ve 400 kPa'lık gerilmelerde, İY ve ψ/v aynı yönde değişmektedir. Bu parametrelerin her ikisi de yüklemeye süresindeki artış ile azalmaktadır. Bunlara ek olarak, yüksek gerilme düzeylerinde, aynı yüklemeye sürelerinde, düşük gerilme düzeylerine göre daha yüksek ψ/v değeri elde edilmiştir. Şekil 4.21'den 100 kPa gerilme değeri bir eşik değeri gibi görülmektedir. Bu gerilmeden daha düşük ve yüksek gerilme durumlarında İY değerlerinin zamanla değişimi ve buna bağlı olarak ψ/v parametresi ile ilişkisi değişiklik göstermektedir. Bu bulgu McConnachie

(1974)'de belirtildiği üzere, yükleme etkisindeki kil topaklarının, 10-100 kPa arasında, konsolidasyon mekanizmasında temel değişiklikler olduğu sonucu ile uyumludur.



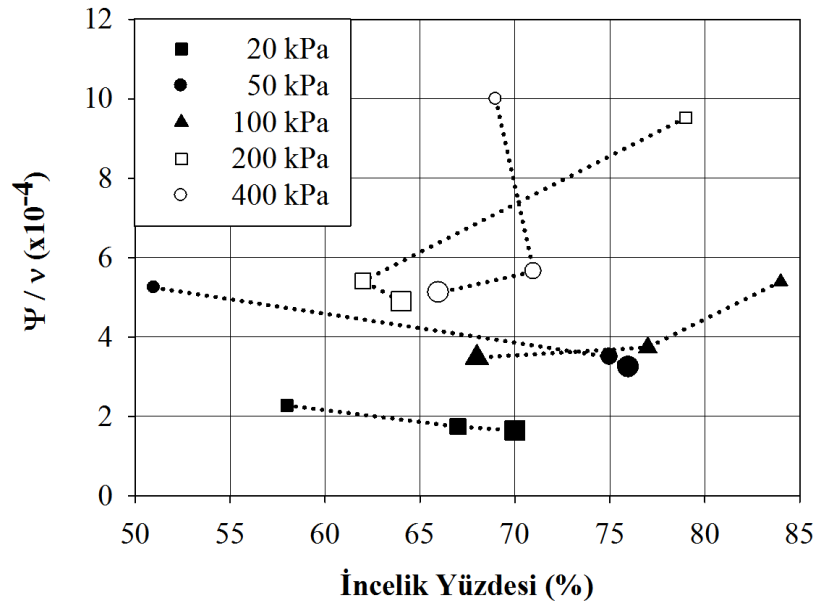
Şekil 4.19: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi 20 kPa.



Şekil 4.20: Gradasyon eğrilerinin yükleme süresine göre değişimi 100 kPa.

Ödometre deneylerinde, düşey efektif gerilme düzeyi ve yükleme süreleri kullanılarak krip hızı ile deney sonlarında alınmış mikrografların analizinden elde edilen gradasyon eğrilerini tanımlayan incelik yüzdesi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Krip hızları zamanla, azalırken İY değerleri, uygulanan gerilmenin 100kPa dan küçük veya büyük olmasına göre farklı değişimler göstermektedir. 100 kPa'dan küçük gerilmelerde, İY değerleri, krip süresindeki artış ile artarken. 100 kPa'dan büyük gerilmelerde, İY

değerleri, kripi süresindeki artış ile azalmaktadır. İY değerlerindeki artış, toprakların ayrışması şeklinde yorumlanmıştır. Ters olarak, İY değerlerindeki azalma, topraklanma olarak yorumlanmıştır. 100 kPa mikro ölçümler yönünden eşik gerilme değeri olarak görülmektedir. McConnachie (1974) sonuçları ile uyumlu bu bulguya farklı bir yaklaşımla ulaşılmıştır. Her ne kadar, aynı gerilme altında, farklı kripi süreleri için alınan mikrogram sayısı yetersiz olsada, genel olarak, aynı gerilme altında, farklı kripi süreleri için, İY ve kripi hızı arasında doğrusal bir ilişki göze çarpmaktadır. Bu doğrusal ilişki 100 kPa'dan düşük gerilmelerde negative eğime sahipken, 100 kPa'dan büyük gerilmelerde negative eğime sahiptir.



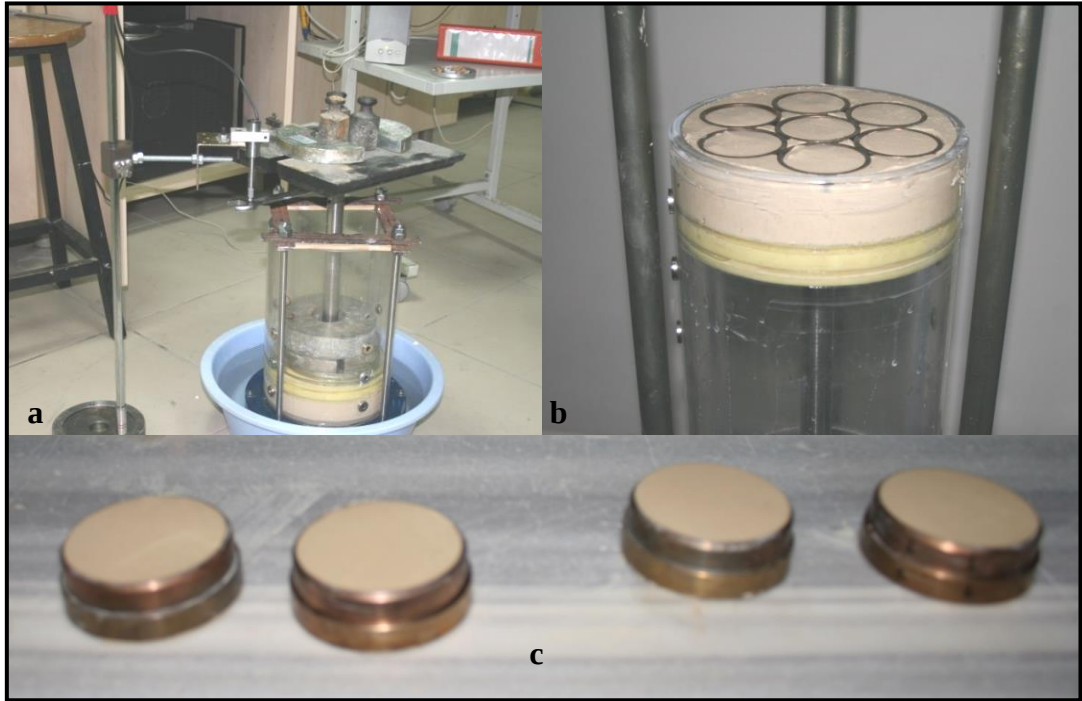
Şekil 4.21: ψ/v -İncelik yüzdesi arasındaki ilişki.

4.2. KÜÇÜK BOYUTLU NUMUNELERLE YAPILAN CRS DENEYLERİ

Küçük boyutlu numunelerde CRS konsolidasyon deney numuneleri, likit limit değerinde su muhtevasında hazırlanan kaolin kilinin büyük konsolidasyon hücresinde 20 kPa yükleme altında konsolide edilerek ödometre halkalarına taşınması suretiyle hazırlanmıştır. Bu süreç Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Küçük numunelerde CRS konsolidasyon deneyleri, önceki bölümde de bahsedildiği gibi ödometre hücresinde değişiklikler yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Değiştirilen

ödometre hücresi serbest basınç deneyi yükleme çerçevesine yerleştirilerek yükleme yapılmıştır (Şekil 4.23). Deney sonunda konsolidasyon halkası içindeki numuneye, alüminyum halka batırılarak ESEM görüntüsü için numune hazırlama yöntemi kısmında anlatılan dondurma ve kurutma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4.24). Deney programı, Tablo 4.3’de verilmiştir. Belirtilen yükleme programından elde edilen gerilme şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.25-28’de verilmiştir. Bu deneyler sonunda çekilen ESEM fotoğrafları Şekil 4.29-32’de verilmiştir.



Şekil 4.22: a) Büyük konsolidasyon hücresinde 20 kPa altında konsolidasyon, b) konsolide edilmiş kaolin kiline ödometre halkalarının yerleştirilmiş hali, c) konsolide edilmiş numunenin ödometre halkalarına taşınmış hali.

Tablo 4.3: Küçük numunelerde CRS deney programı.

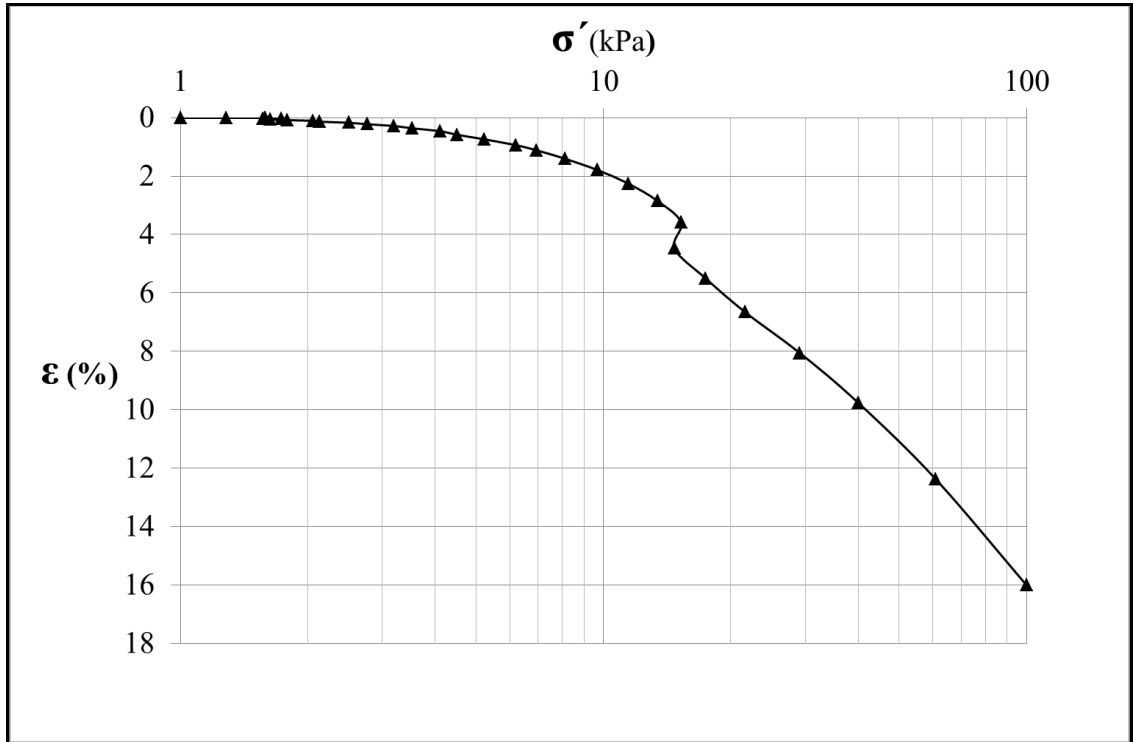
No	Ters Basınç (kPa)	Yükleme Hızı (mm/dak)	Merkezdeki Efektif Basınç Kademesi (kPa)	Yükleme Hızı (mm/dak)	Merkezdeki Efektif Basınç Kademesi (kPa)
CRSÖ-01	100	0.021	0-100	-	-
CRSÖ-02	100	0.021	0-50	-	-
CRSÖ-03	100	0.021	0-50	0.107	50-100
CRSÖ-04	100	0.021	0-50	0.0043	50-100



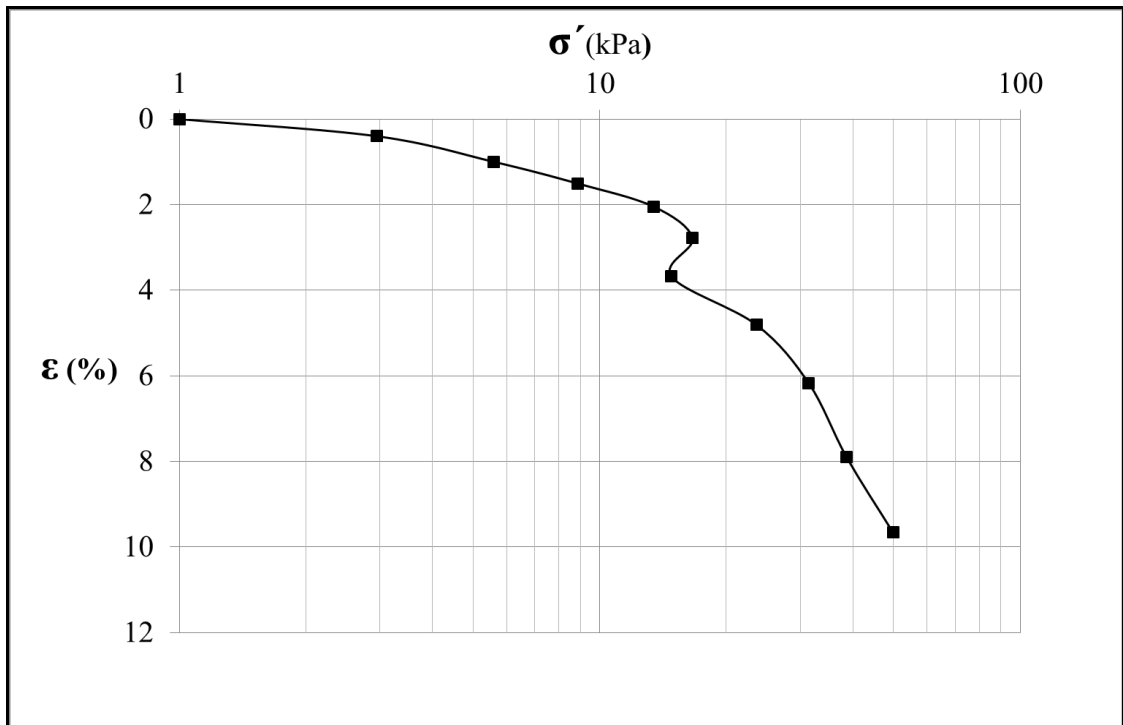
Şekil 4.23: Serbest basınç yükleme çerçevesine yerleştirilmiş CRS hücresi.



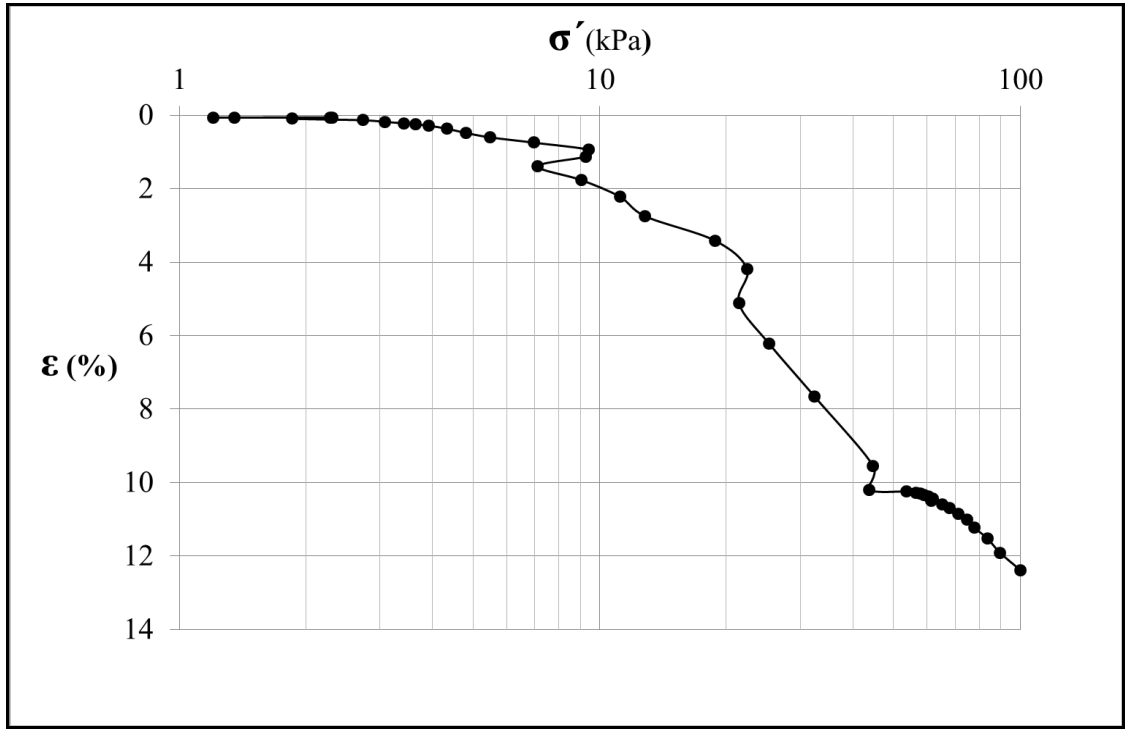
Şekil 4.24: Küçük boyutlu CRS konsolidasyon deneyi sonrası ESEM görüntüsü için numune alma işlemi.



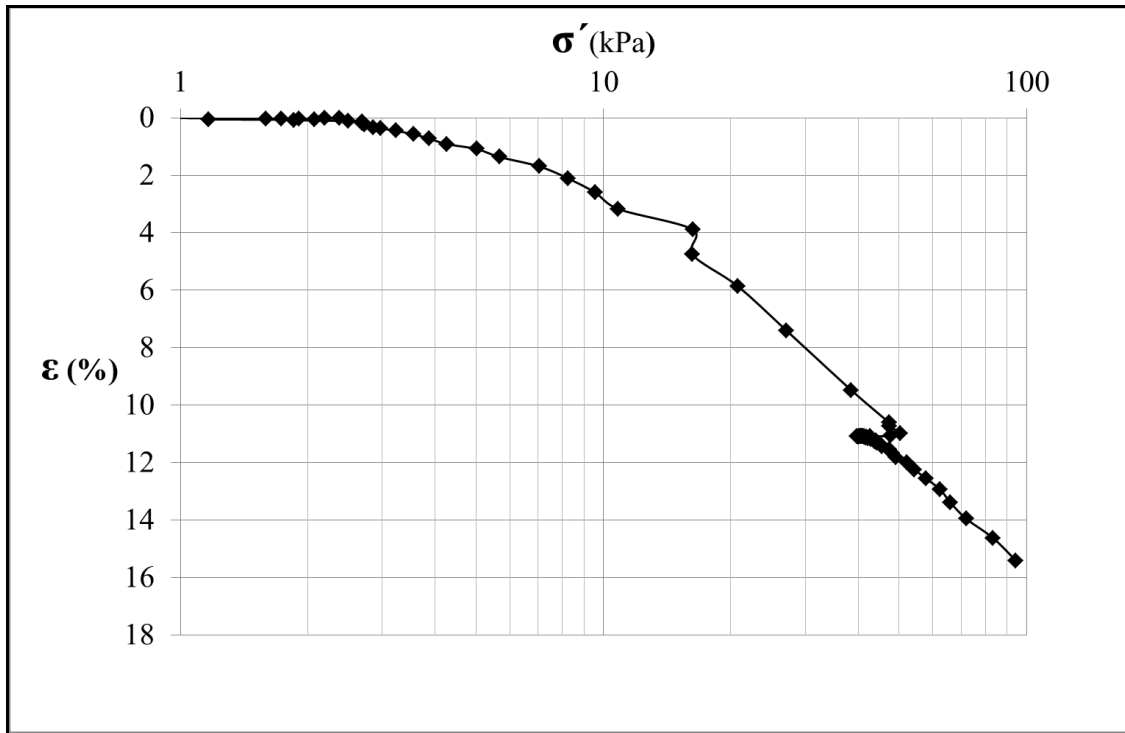
Şekil 4.25: CRSÖ-01 gerilme deformasyon eğrisi.



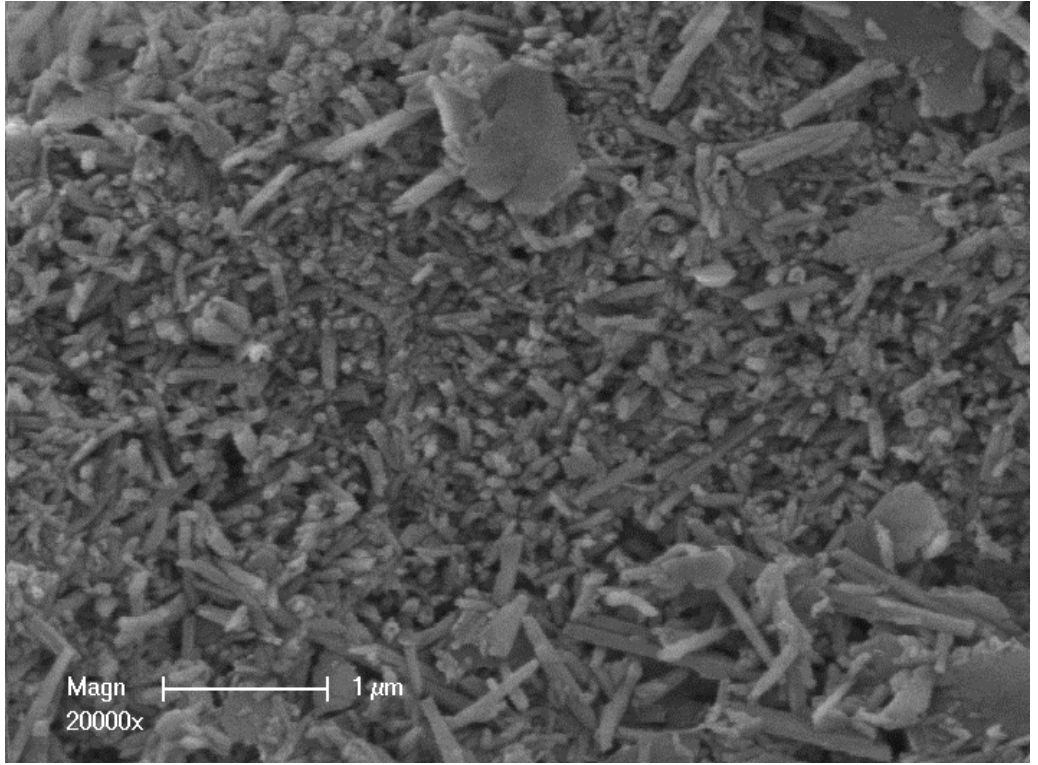
Şekil 4.26: CRSÖ-02 gerilme deformasyon eğrisi.



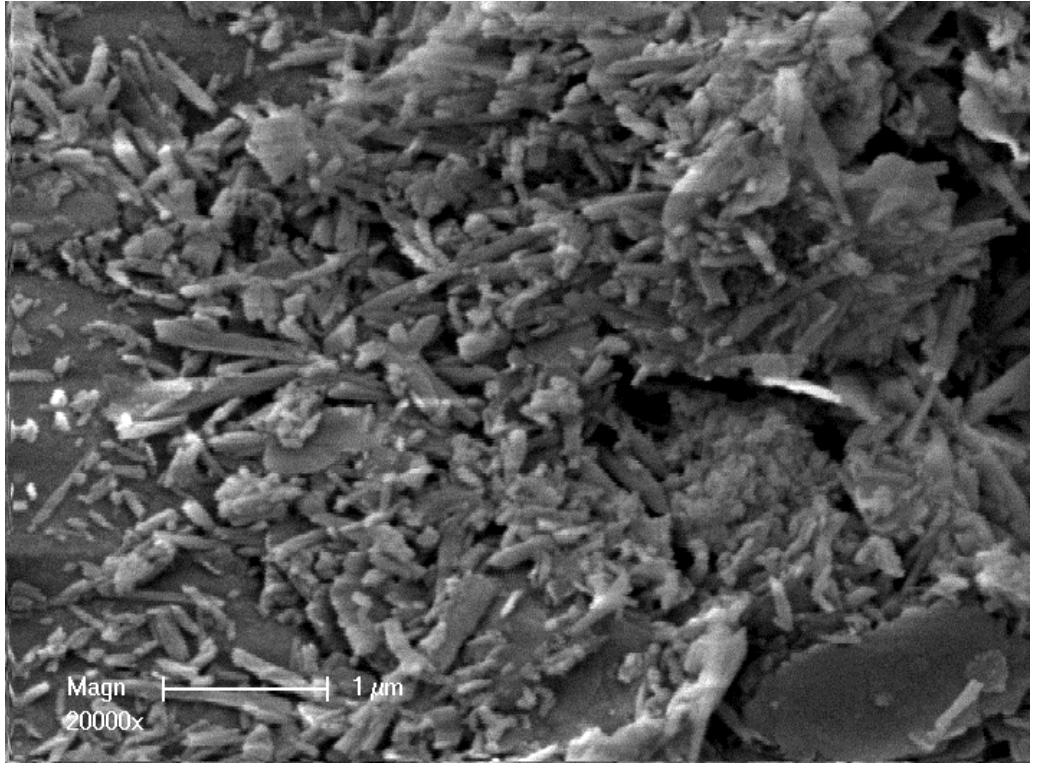
Şekil 4.27: CRSÖ-03 gerilme deformasyon eğrisi.



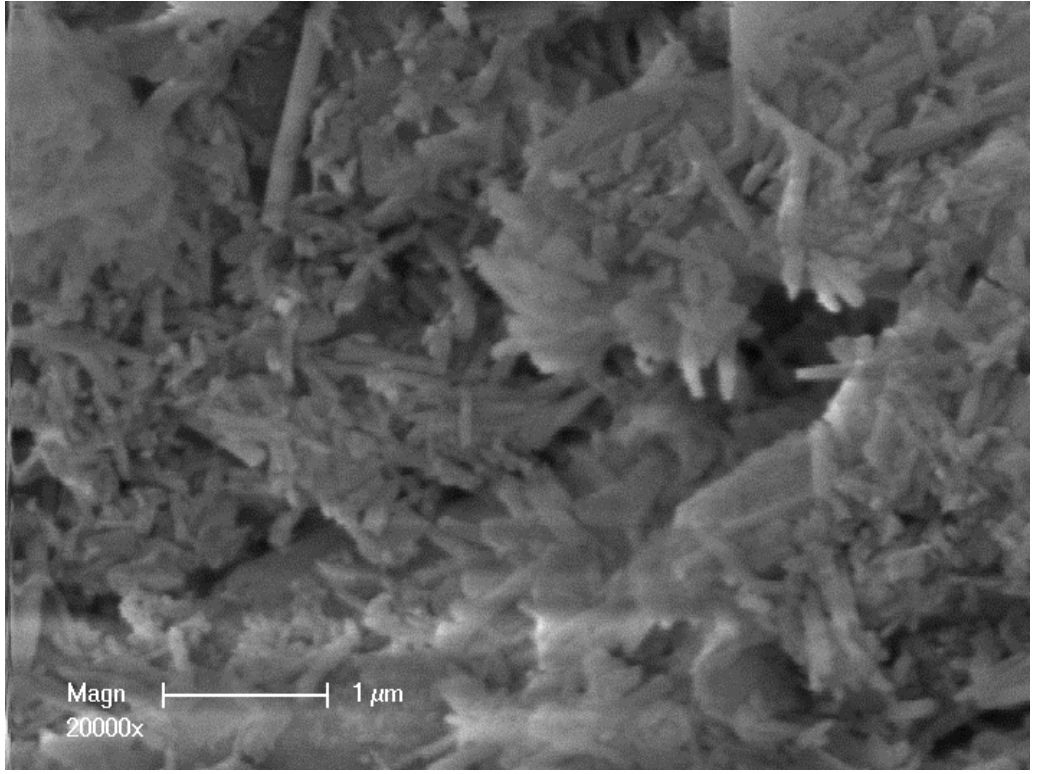
Şekil 4.28: CRSÖ-04 gerilme deformasyon eğrisi.



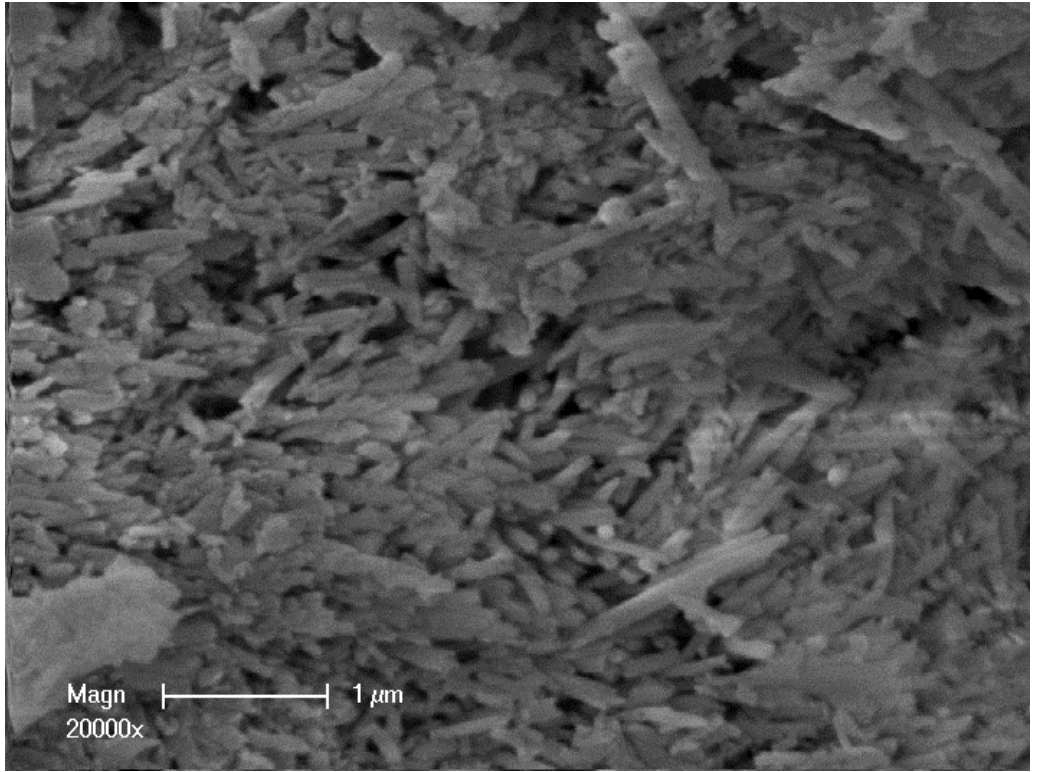
Şekil 4.29: CRSÖ-01 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.



Şekil 4.30: CRSÖ-02 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.



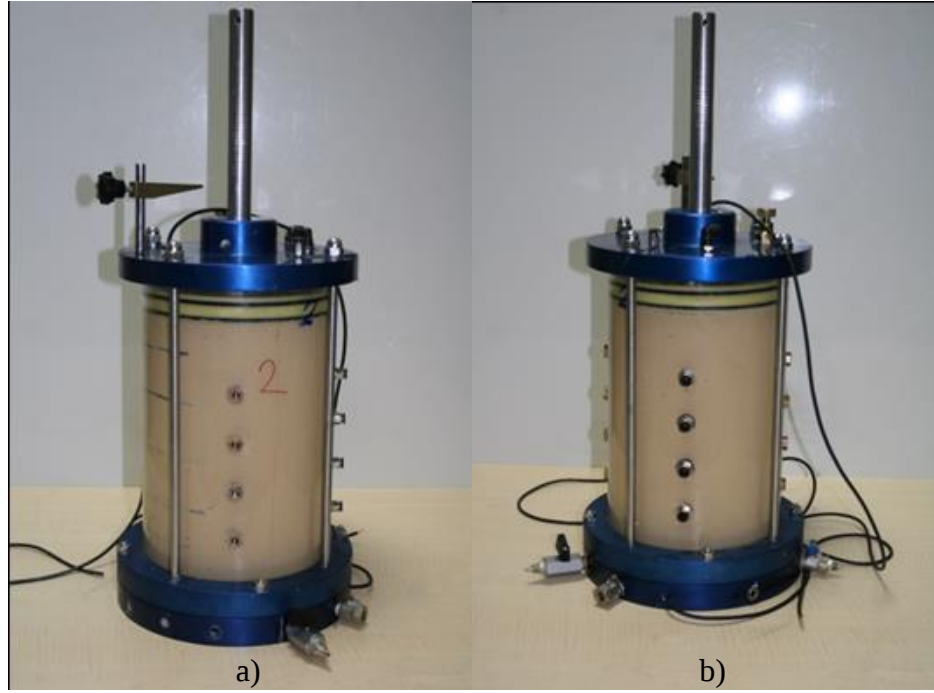
Şekil 4.31: CRSÖ-03 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.



Şekil 4.32: CRSÖ-04 deney numunesinden çekilen ESEM fotoğrafı.

4.3. BÜYÜK BOYUTLU NUMUNELERLE YAPILAN CRS DENEYLERİ

Büyük numunelerde CRS konsolidasyon deneyleri, önceki bölümde belirtildiği üzere üç eksenli deney hücresinde yapılan değişikliklerle elde edilen deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki şekilde hücre içerisine likit limit kıvamında su muhtevasına sahip kaolin numunenin yerleştirilmiş hali görülmektedir. Büyük numunede CRS konsolidasyon deneyinde, şekilde görüldüğü üzere pleksi hücreye takılan boşluk suyu basıncı ölçerler, düşey yönde farklı noktalarda efektif gerilmelerin ölçülmesi mümkün olmaktadır (Şekil 4.33). Deneye 0.0375 mm/dak. yükleme hızı ile başlanarak, üstten ikinci sıradaki boşluk suyu basıncı ölçer seviyesinde efektif gerilmenin 50 kPa'ya ulaştığı anda yükleme hızı 0.075 mm/dak. değerine yükseltilerek deneye devam edilmiş ve yine aynı seviyede efektif gerilmenin 100 kPa değerine ulaştığı anda deney sonlandırılmıştır. Deneyde kullanan bütün yükleme çerçeveleri, ölçüm ve kayıt cihazları Şekil 4.34'de verilmiştir.



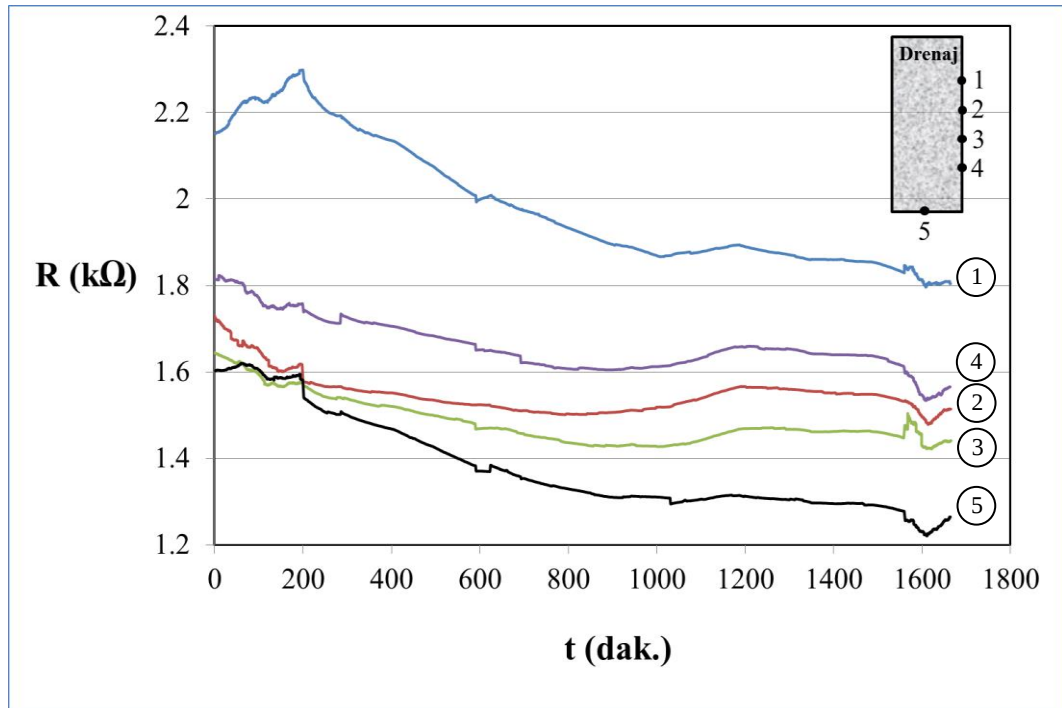
Şekil 4.33: a) Elektrik iletkenliği ölçüm probu, b) Boşluk suyu basıncı transducerlerinin takılacağı bağlantı rekorları.



Şekil 4.34: Büyük numunelerde CRS deney düzeneği.

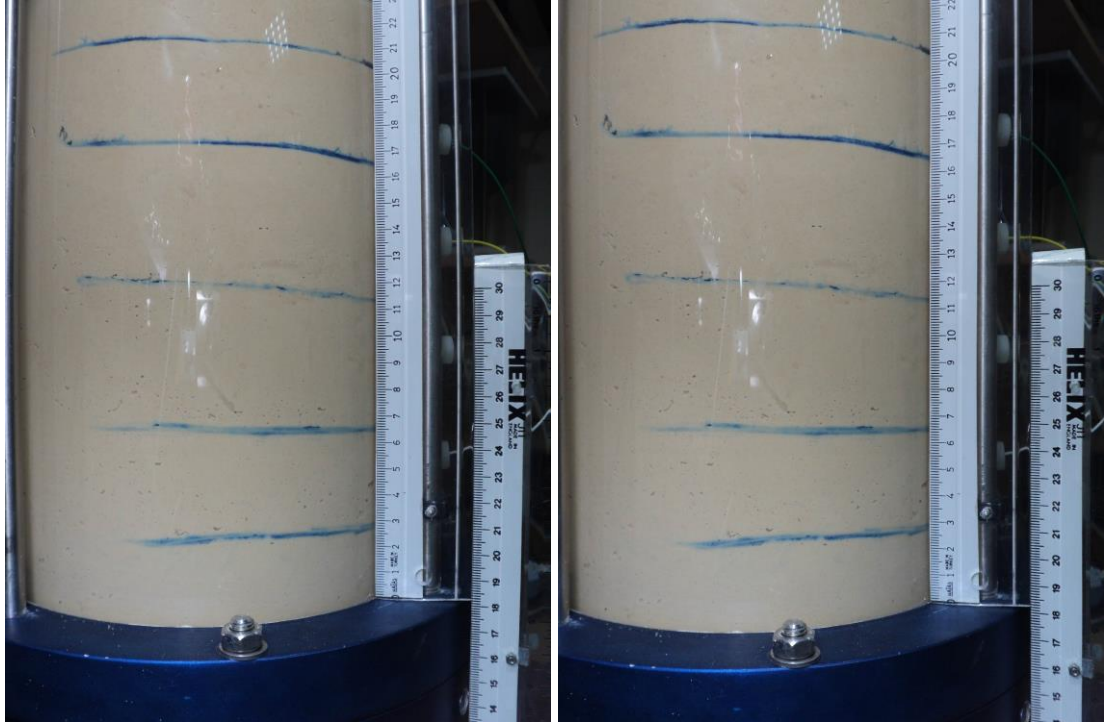
Deney süresince 30 saniye aralıklarla 5 saniye süresince yatay yönde 4 farklı nokta ve düşey yönde eksen boyunca olmak üzere 5 doğrultuda elektrik iletkenliği ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu yükleme için direnç değerinin zamana bağlı değişimi her bir doğrultu için elde edilmiş ve Şekil 4.35’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, konsolidasyon sürecinde elektrik direnci azalmaktadır. Temel olarak elektrik akımının boşluk suyunda çözünmüş iyonlar sayesinde ilerlediği bilinmektedir. Zeminlerin elektrik direncini etkileyen en önemli etkenlerden biri elektrik akımının ilerleyeceği yoldur. Zira akımın dolambaçlı ya da düz bir yol izlemesi durumunda ölçülen direnç farklı olacaktır. Bu deney için kil numunesi likit limit kıvamında mekanik olarak karıştırılarak hazırlanmıştır. Böylelikle numune bir miktar flokül yapı kazanmıştır. Bunun neticesinde numunede flokül topaklardan oluşan izotropik bir yapı oluşmaktadır. Böylelikle numune içindeki boşluk suyu yolları dolambaçlı olmaktadır. Bu numunenin elektriksel direncini arttırıcı bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte konsolidasyon sürecinde kil topaklarında parçalanma oluşarak daha küçük topakların ve partiküllerin içinde bulundukları düzlemlerin normali konsolidasyon yüklemesine paralel olacak şekilde tercihli yönlenmektedir ve böylece numunenin anizotropik yapı kazandığı bilinmektedir. Bu durumda boşluklar sürekli ve düzgün hale gelmektedir. Elektrik akımı

da bu sürekli ve düzgün haldeki boşluklarda bulunan suda çözünmüş iyonlarda daha kısa yoldan ilerlediğinden ölçülen elektriksel direnç azalmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi her bir elektrik iletkenliği ölçüm probundan alınan veriler konsolidasyon süreciyle elektriksel direncin azaldığını göstermektedir. Ayrıca şekildeki 1,2, 3 ve 4 nolu problemler pleksi hücreye yatay yönde ve drenaj yüzünden uzaklaştıkça etiket numaraları artacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna göre 1 numaralı probun bulunduğu bölgede konsolidasyon diğerlerinden daha önce gelişmektedir. Bunun sonucu olarak da elektriksel direncinin diğer problemlerde ölçülenlerden daha düşük olması beklenmektedir. Ancak her ne kadar çok özen gösterilerek de olsa, likit limit kıvamındaki numune pleksi hücre içine katman katman yerleştirildiğinden yerleştirme işlemi esnasında numune bir miktar konsolide olmuştur. Yerleştirme sıralaması prob numaralarının tersi yönde ilerlediğinden, bahsedilen bu konsolidasyon, 1 nolu probun bulunduğu bölgede en az düzeyde gerçekleşmiştir. Bunun neticesinde, 1 nolu probun ölçüm yaptığı bölgenin başlangıç elektriksel direnci diğer diğer problemlerin bulunduğu bölgelerinkinden daha yüksek ölçülmüştür.



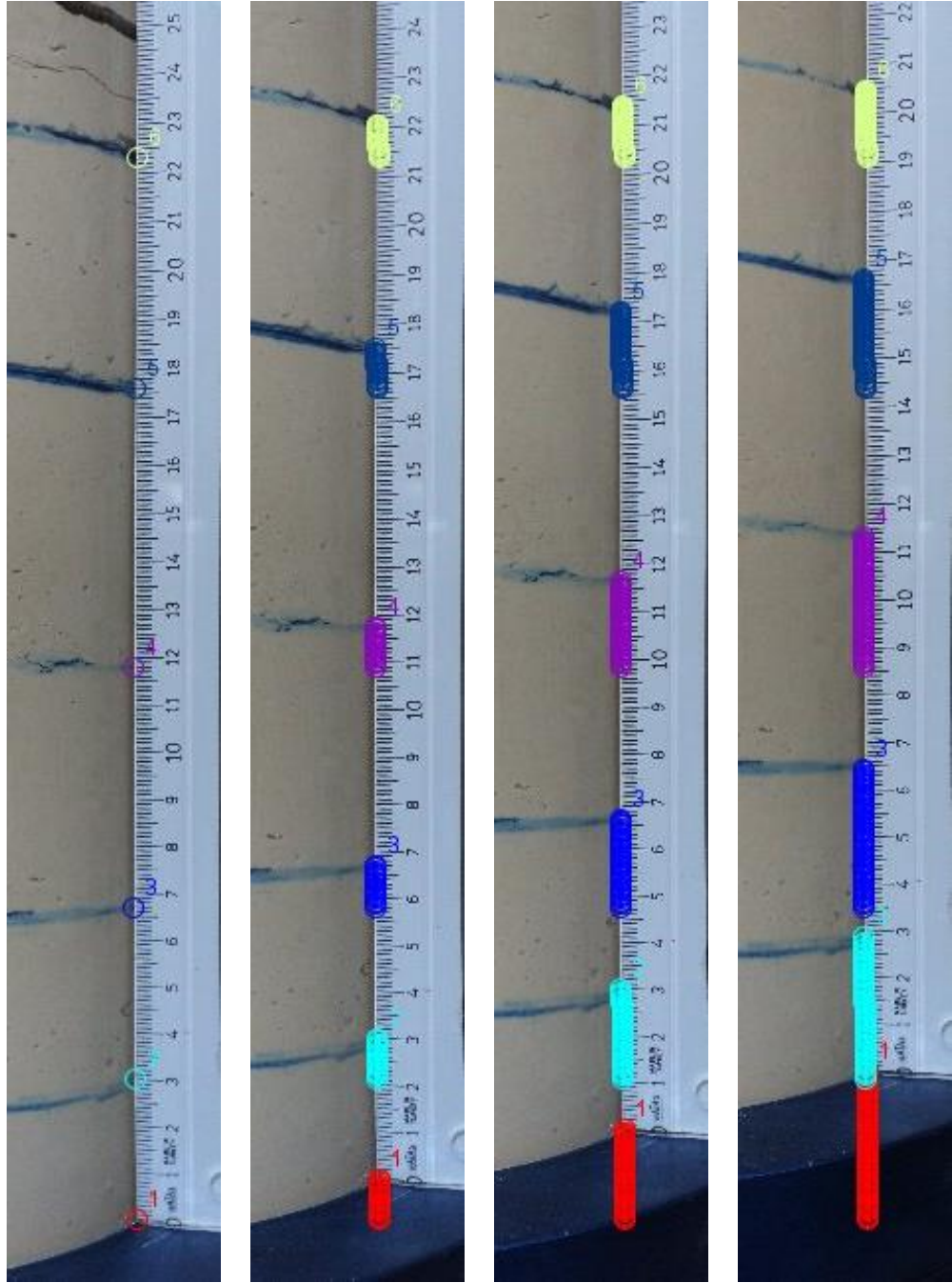
Şekil 4.35: Büyük numunede CRS deneyi boyunca ölçülen elektriksel direnç-zaman grafiği.

Hücreye numune yerleştirme aşamasında, iki kat filtre kağıdı yan tarafları suda çözünmeyen boya ile mavi renge boyanarak, boşluk suyu basıncı ölçerler ile elektrik iletkenliği problemlerini merkezleyecek şekilde katmanlar oluşturmak suretiyle numune yerleştirilmiştir (Şekil 4.36). Deney süresince otomatik olarak dakikada 1 fotoğraf çekilmek suretiyle deformasyon takibi yapılmıştır. Bu fotoğraflarda oluşan fıçı şeklindeki mercekle düzeltilmesi GIMP programı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.36).



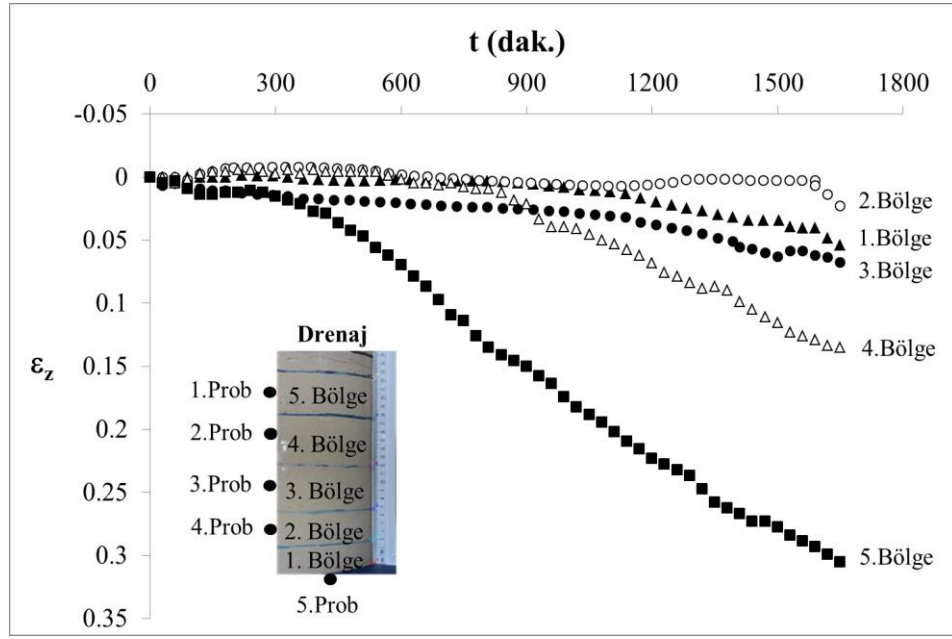
Şekil 4.36: Mercek düzeltilmesi ile fotoğraftaki fıçı görünümünün giderilmesi.

Mercek düzeltilmesi yapılan fotoğraf yığını, Image J açık erişimli görüntü işleme programında, Meijering vd. (2012) tarafından geliştirilen MTrackJ eklentisi kullanılarak, fotoğraflarda seçilen noktaların zamana bağlı hareketlerinin takibi gerçekleştirilmiştir. Deney süresince çekilen dakikada 1 olmak üzere 1660 dakikada çekilen toplam 1660 fotoğrafta seçilen 6 noktanın bu yöntemle zamana bağlı olarak yer değiştirmeleri ölçülmüştür (Şekil 4.37).



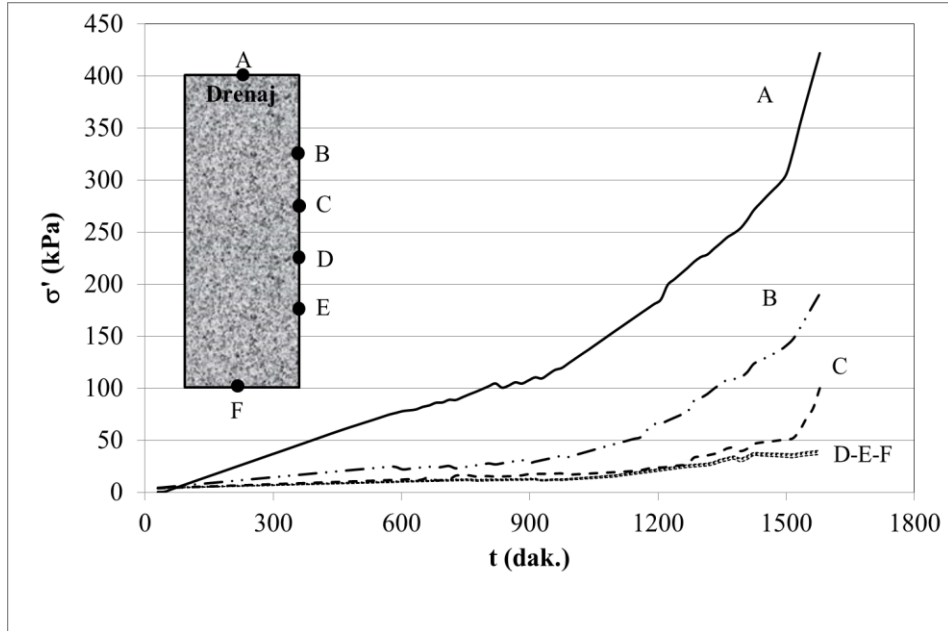
Şekil 4.37: Deney süresince filtre kağıtlarının ve hücrenin yer değiştirmelerinin takibi.

Fotoğrafların görüntü analizi sonrası, hücre içerisindeki mavi renkli filtre kağıtlarının zamana bağlı yer değiştirmeleri elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler kullanılarak filtre kağıtları arasındaki bölgelerin deformasyonları hesaplanmıştır (Şekil 4.38).



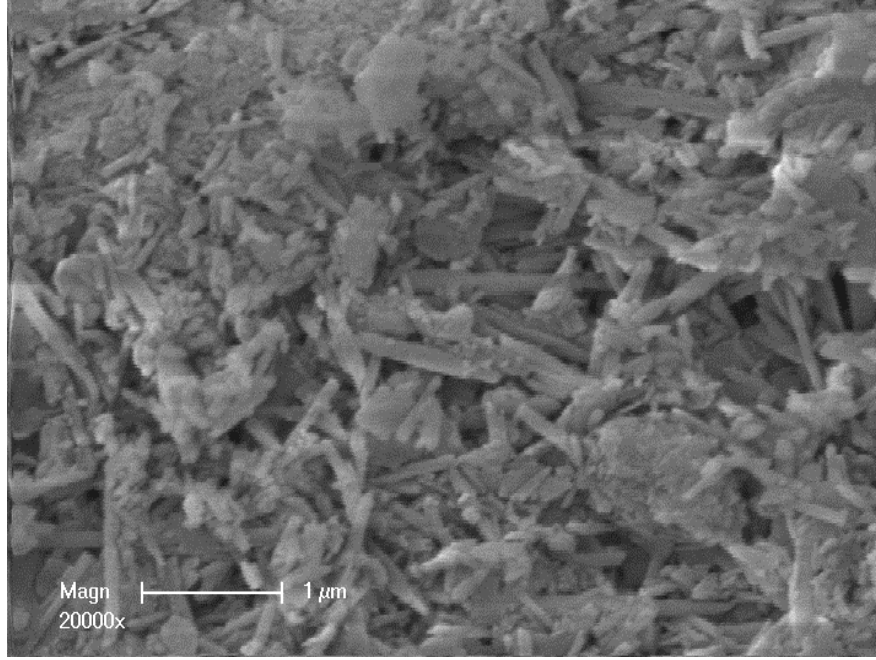
Şekil 4.38: Fotoğraflardaki yer değiştirmeler kullanılarak, filtre kağıtları arasındaki bölgelerde oluşan deformasyon-zaman grafiği.

Pleksi hücrede elektrik iletkenliği problemleri ile aynı düzlem içinde yer alan boşluk suyu basıncı transducerları kullanılarak bu noktalarda ve drenaj yüzünde efektif gerilmeler hesaplanmıştır (Şekil 4.39).

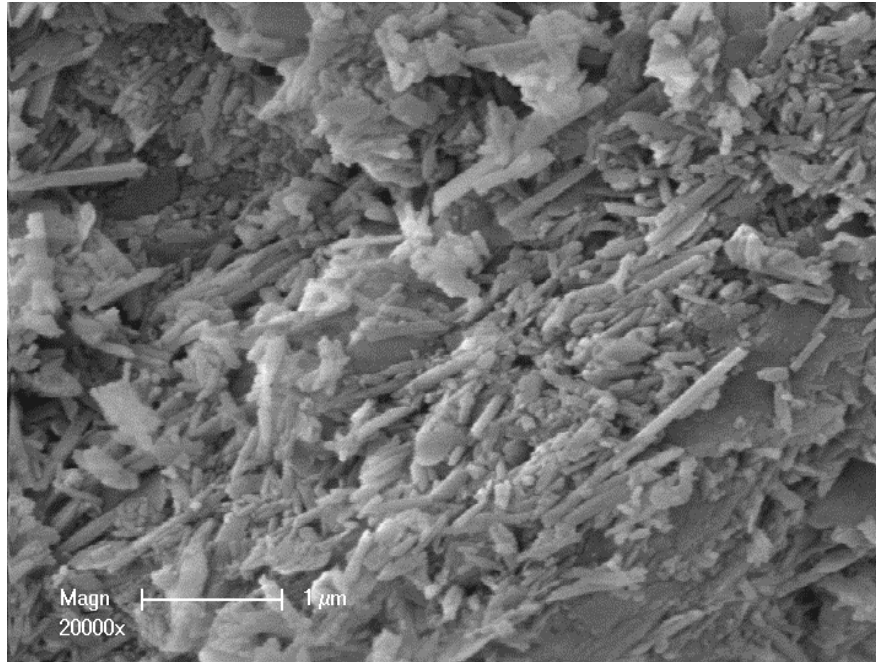


Şekil 4.39: Büyük numunede CRS deneyinde farklı noktalarda ölçülen boşluk suyu basıncı değerleri kullanılarak hesaplanan efektif gerilme-zaman grafiği.

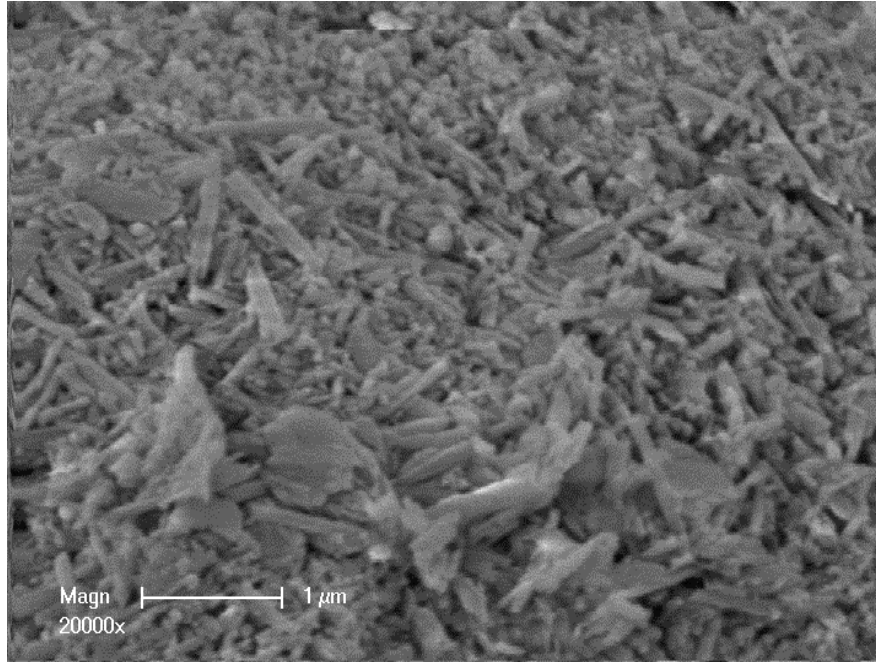
Büyük boyutlu numunede CRS deneyi sonunda, drenaj yüzeyinden itibaren 6 bölgenin merkezlerinden alınan numunelerin ESEM görüntüleri Şekil 4.40-45’de verilmiştir.



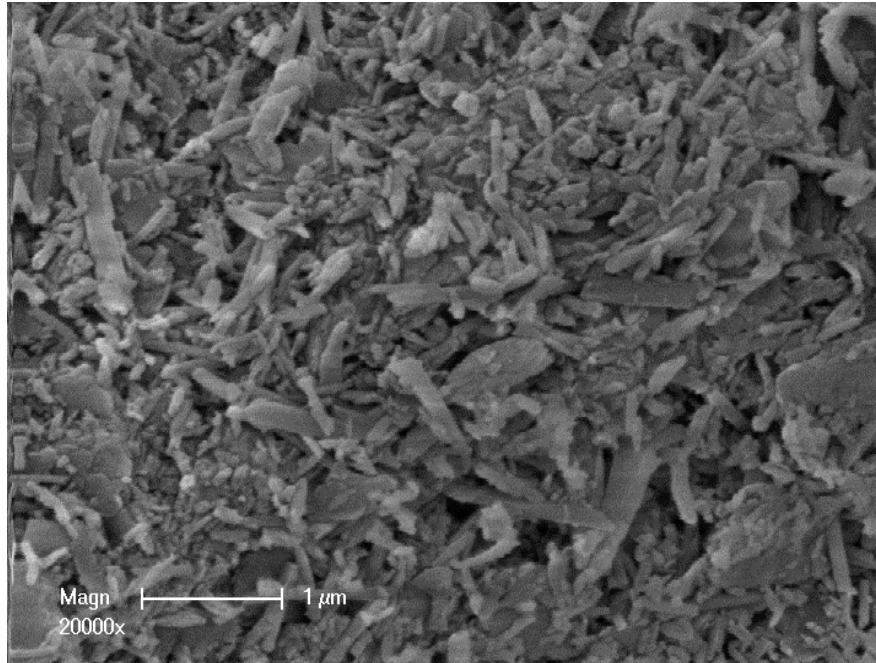
Şekil 4.40: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (Drenaj yüzünden alınan numune).



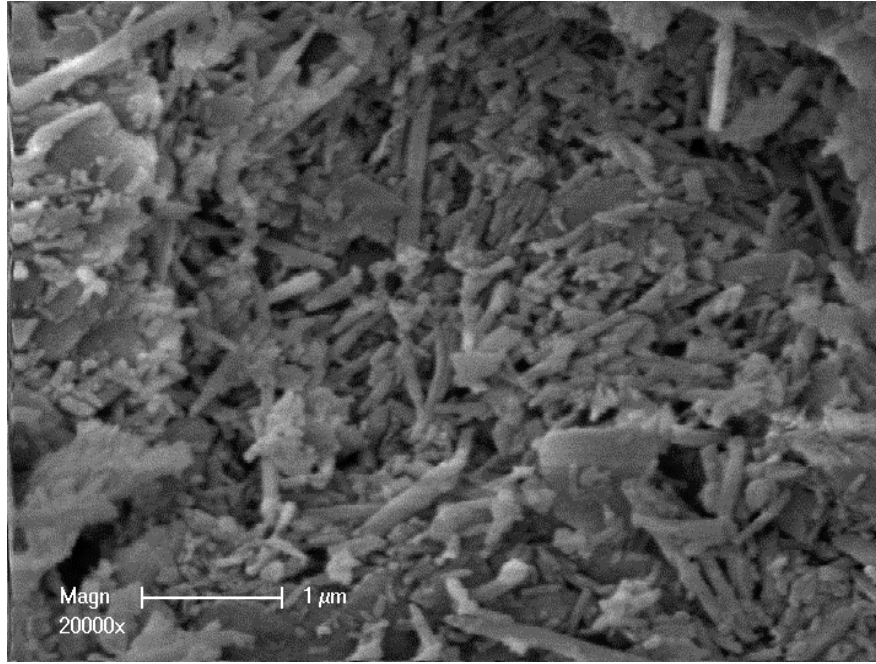
Şekil 4.41: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (5.Bölgeden alınan numune).



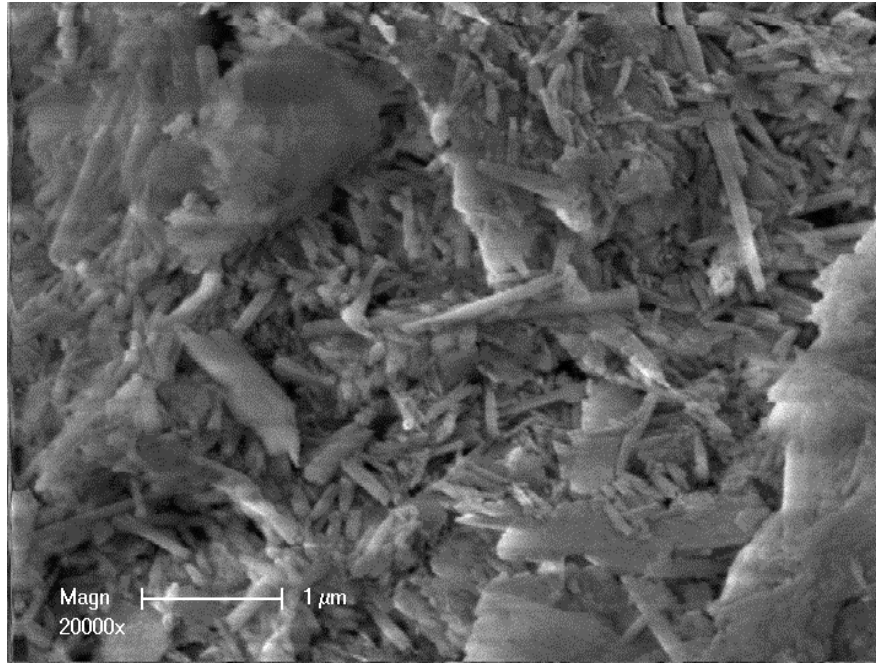
Şekil 4.42: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (4.Bölgeden alınan numune).



Şekil 4.43: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (3.Bölgeden alınan numune).



Şekil 4.44: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (2.Bölgeden alınan numune).



Şekil 4.45: Büyük numunede CRS deneyinde sonunda çekilen ESEM görüntüsü (1.Bölgeden alınan numune).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Ödometre konsolidasyon deneyi sürecinde yüke ve zamana bağlı olarak dokudaki değişimi takip edebilmek amacıyla, kil topaklarının büyüklüklerine göre dağılımına bağlı bir sınıflandırma yapılabilmesi için alan oranı, AF olarak adlandırılan yeni bir tanımlama yapılarak, topaklanmış yapının büyüklüğünün dağılımını temsil etmekte kullanılmıştır.

Düşük gerilme düzeyinde, konsolidasyon başladıktan hemen sonra AF değerinde bir artış görülmektedir. Bu duruma, kil topakları arasındaki boşlukların drenaj nedeni ile azalması ve aynı zamanda kil topaklarının birbiri ile temas noktalarının veya temas yüzeylerinin artmasıyla daha büyük kil topaklarının meydana gelmesinin sebep olduğu düşünülmektedir.

Maksimum basınç değerinin 50 kPa olduğu, 20 kPa olduğu yüklemeye göre, AF'deki artışın daha az olduğu görülmektedir. Davranışın birbirini izlemesi nedeni ile AF'nin değişimi 100 kPa gerilme düzeyinde yön değiştirmiştir.

Konsolidasyon süresi 15 dakikaya ulaştığında AF daha küçük değer almaktadır. 200 ve 400 kPa'lık yüksek gerilme düzeylerinde AF değeri dikkate değer bir şekilde azalmaktadır. Bu durum yüksek gerilme düzeyinin aniden uygulandığı, ilk dakika içinde değişimin gerçekleştiği, kil topakları paketinin göçmesi ile açıklanabilir. Konsolidasyon sürecinin ilerleyen aşamalarında, viskoz etkilerin hakim olduğu süreçte de benzer eğilim görülmektedir.

Genel olarak davranış, kil topakları, makro-boşluklar ve mikro-boşluklara uygulanan dış etkiden dolayı bunlar arasında sürekli bir etkileşimin oluşması ve çok uzun süren dengeye ulaşma çabası olarak özetlenebilir.

Doku yönlenmesi, her bir konsolidasyon kademesi için doku yönlenme indeksi olarak hesaplanmıştır. Doku yönlenme indeksinin dar bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu nedenle, kullanılan kaolin kilinde, çift yönlü drenaj şartlarında gerçekleştirilen standart

ödometre deneylerinde, bu çalışmada seçilen gerilme düzeylerinde doku yönlenmesinin etkilenmediği sonucuna varılabilir.

ESEM görüntülerinin sayısallaştırılması ile kil topaklarının alanlarının büyüklükleri de elde edilmiştir. Kil topaklarının alanları kullanılarak gradasyon eğrileri, elek analizi sonuçlarının oluşturulmasında kullanılan yöntemle benzer şekilde fakat sayısallaştırılmış mikrograflar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gradasyon eğrilerinde kil topaklarının incelik derecesinin değişim miktarını belirlemek için, eğriler arasındaki açıklığın genelde en büyük değer aldığı $5\mu\text{m}^2$ alan değeri eşik değer olarak seçilmiş ve bu eşik değere karşılık gelen “% geçen” değeri incelik yüzdesi (İY) olarak adlandırılmıştır. İY değerleri kullanılarak aynı gerilme altında farklı yükleme sürelerinde gradasyon eğrilerindeki değişim yorumlanmıştır. Buna göre, 20 kPa yükleme durumunda ilk 15 dakika sonunda kil topakları alanlarında artış olduğu, 1440 ve 4320 gibi daha uzun süreli yükleme durumlarında kil topakları alanlarının gittikçe azaldığı görülmektedir. Bu durumun sırasıyla düşük gerilme uygulamalarında erken yükleme evrelerinde topaklanma ve uzun süreli yüklemelerde ise topaklarda ayrışmanın bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. 400 kPa yükleme durumunda ise erken yükleme evrelerinde kil topaklarında ayrışma gözlenirken, 4320 gibi uzun süreli yükleme durumunda topaklanma görülmüştür.

Ödometre deneyinden elde edilen boşluk oranı (e) ve bunun makro ve mikro bileşenlerinin (e_M and e_m) toplamına eşittir. Burada e_m kümeler ve partiküller içindeki mikro boşluk oranı, e_M ise serbest su ve hava ile ilişkili makro boşluk oranıdır. Makro boşluk oranını mikrograflardan elde etmek mümkün olduğu halde mikro boşlukların elde edilmesi mümkün değildir. Bu çalışmada boşluk oranı (e) konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilirken, makro boşluk oranları (e_M), aynı süreye karşılık gelen mikrograflardan elde edilmiştir. Makro boşluk oranı, görüntü analizi sonucunda elde edilen makro boşlukların alanının yine aynı analizden elde edilen kil bölgelerini temsil eden alanlara oranı olarak tanımlanmıştır. Boşluk oranı ve makro boşluk oranının bilinmesi durumunda mikro boşluk oranı elde edilebilmektedir.

Konsolidasyon deneyinin doğası gereği boşluk oranı değerleri deney boyunca azalır. Ancak e değerlerindeki azalmaya karşılık, e_M veya e_m değerlerinde artış veya azalma meydana gelebilmektedir. Bunun durum, davranışın kümelerin veya topakların,

birikimini ve ayrışmasını içeren tekrarlı bir süreç olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, gözlenen bu davranışın açıklığa kavuşturulması için bir hipotez geliştirilmiştir. Öne sürülen hipoteze göre, deneyin erken evrelerinde boşluk oranındaki azalma, makro boşluklardaki suyun drenajından kaynaklanmaktadır. Makro boşluklardaki azalmayla uyumlu olarak, topraklar bir birine yaklaşıp kayma gerilmesi iletmeye başlamaktadır. Bu süreçte zamanla kümelerde ayrışma meydana gelmektedir. Kil topaklarının ayrışması ile topraklar arasındaki mikro boşluklar makro boşluklara eklenmekte ve böylece mikro boşluklar azalmaktadır. Eş zamanlı olarak konsolidasyon nedeniyle makro boşluklardaki suyun ortamdan drene olması nedeniyle makro boşluklar azalmaktadır. Bu çalışmada normalleştirilmiş makro ve mikro boşluk oranlarının değişimi izlenerek toprakların oluşması ve ayrışması incelenmiştir. Toprakların birikimi ve ayrışması olayı uygulanan gerilme ve yükleme süresine göre farklılık gösterebilmektedir.

Buna göre 20 kPa gibi düşük gerilme durumunda, erken yükleme evrelerinde mikro boşluklarda artış gözlenmiş uzun süreli yüklemelerde ise mikro boşluklarda azalma gözlenmiştir. Bu durum sırasıyla topaklanma ve topraklarda ayrışma olarak yorumlanmıştır.

400 kPa gibi yüksek gerilme durumunda yükleme süresindeki artışla mikro boşluklarda artış-azalma-artış şeklinde bir dalgalanma gözlenmektedir. Bu durum sırasıyla topaklanma-ayrışma-topaklanma olarak yorumlanmıştır.

Uygulanan diğer gerilme durumlarında sıralama farklı olabileceği gibi, yapılanma derecesi ve uygulanan konsolidasyon basıncına göre farklılık gösterebilir. Bu çalışmada öne sürülen hipotezdeki davranışın göstergeleri, kümelerin farklı zaman ve gerilme düzeylerindeki gradasyonlarının değişimleri ve normalleştirilmiş mikro boşluk oranı değişimleri izlenerek de incelenmiştir.

Düşük konsolidasyon basınçlarında, erken yükleme evrelerinde, topraklar arası boşluklarda yani e_m 'de azalma ve yeni toprakların oluştuğu görülmüştür. Yüksek konsolidasyon basınçlarında, erken yükleme evrelerinde, tersine bir sonuç elde edilmiştir. Aynı şekilde düşük ve yüksek konsolidasyon basınçlarındaki davranışlar neredeyse bir birinin tam tersidir. Benzer davranış mikro boşlukların değişiminin

incelenmesinde de elde edilmiştir. Büyük mikro boşluk (e_m) değerleri küme oluşumlarını, düşük değerleri ayrışmayı göstermektedir. Bütün konsolidasyon basıncı ve yükleme süreleri göz önüne alındığında ayrışma ve topaklanma süreci bir birini takip etmektedir. Bu çalışmada öne sürülen hipotez kapsamında mikro mekanik konsolidasyon davranışı genel olarak açıklanmıştır.

Davranış incelik yüzdesi değerleri açısından takip edildiğinde, 20 ve 50 kPa gibi düşük konsolidasyon basınçlarında, erken yükleme evrelerinde, kümelerin olduğu görülürken, uzun süreli yükleme durumlarında ise davranış kümelerde ayrışmanın gözlenmesi şeklinde tam tersi yönde gerçekleşmektedir. Göreceli olarak yüksek, 100, 200 ve 400 kPa yüklemelerde ise davranış genelde düşük yüklemelerde gözlenenin tam tersidir.

Davranış e_m değerleri açısından incelendiğinde, 20 kPa konsolidasyon basıncında, erken yükleme evrelerinde, e_m değerlerinin arttığı, uzun süre yükleme durumlarında ise azaldığı gözlenmektedir. Bu durum sırası ile, kümelerin oluşması ve ayrışması anlamına gelmektedir. 50 kPa yükleme durumunda ise, ilk 15 dakikada e_m değerinin azaldığı, uzun süreli yükleme durumunda ise arttığı görülmektedir. Bu nedenle, 50 kPa yükleme sonunda mikro boşluk oranı, 20 kPa yükleme sonunda elde edilenden daha büyüktür. 100 ve 200 kPa yükleme durumlarında ise e_m değerleri erken yükleme evrelerinde azalıp, zamanla artış ve daha sonra azalma göstermektedir ki bu davranış 400 kPa durumunun tam tersidir.

Beklendiği gibi, incelik yüzdesi değişimindeki genel eğilimin, e_m 'deki değişimin tam tersi yönde oluşmuştur. Çünkü incelik yüzdesinin küçük değerleri iri taneli gradasyonu işaret etmektedir. İncelik yüzdesinin küçük değerleri ile e_m 'nin büyük değerleri, aynı anlama gelmekte ve büyük kümeleri göstermektedir. Bu sonuç, öne sürülen hipotezi desteklemek açısından çok değerlidir. Zira incelik yüzdesi sadece sayısallaştırılmış mikrograflardan elde edilmişken, e_m ödometre ölçümleri ve mikrografların birlikte kullanılması ile elde edilmiştir. Bu nedenle, makro davranış ve mikro ölçümler arasında bir bağlantı kurulabilir. Kil topakları içindeki mikro boşluk oranının kil topaklarının dağılması ile azaldığı, yeniden topaklanmasıyla arttığı hipotezi ile incelik yüzdesinin, mikro boşluk oranı değişimini yansıttığı gösterilmiştir.

Ödometre deneyinde kilin ikincil konsolidasyon davranışı sürecinde mikro boyuttaki mekanizmanın araştırılması, için literatürdeki iki farklı malzeme modeli kullanılmıştır. Bunlardan ilki Navarro ve Alonso (2001), ikincil konsolidasyon davranışı için kil-su etkileşimi temel teorilerini esas alan, ve bunları, makroskopik ödometre deney sonuçları ile ilişkilendirerek, kil topraklarından makro boşluklara, mikro boşluk suyu transferini öngören bir dehidratasyon modelidir. Kullanılan ikinci model ise Yin (1999) tarafından öne sürülen limit değere sahip doğrusal olmayan analitik krip fonksiyonudur.

Navarro ve Alonso (2001) modeli tarafımızca elde edilen mikro boyuttaki incelik yüzdesi parametresi ile birlikte değerlendirilmiştir. Böylece, daha önceki çalışmalarda (Yigit 2010, Yiğit ve Çinicioğlu 2011) ortaya atılan konsolidasyon sürecinde kil topraklarının dağılması ve yeniden toplanması hipotezi, sayısallaştırılmış mikrograflar yardımıyla bir boyutlu ikincil konsolidasyon modeline yerleştirilmiştir.

Navarro ve Alonso (2001), Alonso ve Navarro (2005) tarafından önerilen, modelde, kil topraklarının permeabilitesi, boyutu ve rijitliğinin ölçüsü olan bir malzeme parametresi tanımlanarak (C parametresi); bu parametre ikincil konsolidasyonda mikro boşluktan makro boşluğa kütleli su transferi davranışını kontrol eden parametre olarak önerilmiştir. Ancak, bu malzeme parametresinin mikro boyuttaki su transferini kontrol ettiği savunulmakla birlikte, bu parametre mikro boyutu yansıtan hiçbir deney veya gözlemden elde edilmemiştir. Sadece makro boyutta ölçülen konsolidasyon davranışına ve bu davranışın ana mekanizması olduğu iddia edilen klasik konsolidasyon teorisi prensiplerine dayandırılmış kuramsal bir modellemeye bağlı olarak mikro boyut parametresi olarak önerilmiştir.

Bu doktora çalışmasının ana hedeflerinde biri ise mikro boyuttaki davranış ile makro boyuttaki konsolidasyon deneyleri ile ölçülen davranış arasında gerçek bir bağ kurabilmektir. Bunun için konsolidasyon deneylerinin farklı yükleme ve ikincil konsolidasyon sürelerine ait evrelerini yansıtacak şekilde alınan mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen bulgularla Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005)'de aktarılan modelin geçerliliği araştırılmıştır. Bunun için, mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen incelik yüzdesi, İY ile Navarro ve Alonso tarafından önerilen malzeme parametresi ilişkilendirilmiştir.

Navarro ve Alonso (2001) tarafından önerilen modeldeki malzeme parametresi C ile ikincil konsolidasyon sürecinin çeşitli evrelerine ait mikrografların sayısallaştırılması ile elde edilen ve kil topaklarının boyutlarındaki değişime işaret eden incelik yüzdesi $\dot{I}Y$ değerleri arasında bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmış ve ikisi arasında bir ilişki elde edilmiştir. Bu sonuç mikro konsolidasyonu açıklamak için sadece mikro boşluktan makro boşluğa su transferi önermesinin yeterli olmadığını ifade etmektedir. Ayrıca, bu doktora tezi kapsamında mikro boyutta elde edilen incelik yüzdesi parametresi makro boyuttaki davranış modelinin içine katılmış olup, bu da benzer çalışmalar içinde bir ilk olma niteliğindedir.

Sayısal analiz sonuçları farklı yük aşamaları veya farklı ikincil konsolidasyon süreleri içinde, kil topakları boyutlarının parçalanma veya farklı kil topaklarının birbirine tutunması ile topaklaşma şeklinde değiştiğini göstermektedir. Bu sonuç ayrıca yapılan sayısallaştırma analizleri ile İncelik Yüzdesi olarak tanımlanan bir parametre ile sayısal olarak da tanımlanmıştır. Halbuki Navarro ve Alonso (2001) ve Alonso ve Navarro (2005) topakların parçalanması veya birleşerek büyümesi gibi bir mekanizma tanımlanmamıştır. Sadece topakların mikro boşluklarından makro boşluklara su transferi veya genel ortam efektif gerilme değerinin topak içindeki şişme basıncından büyük olması durumunda ise makro boşluktan mikro boşluğa su transferi mekanizması tanımlanmıştır.

Bu doktora çalışmasında, Yin (1999) tarafından öne sürülen, limit değere sahip doğrusal olmayan analitik krip fonksiyonu, ESEM görüntülerinden elde edilen incelik yüzdesi parametresi ile birlikte kullanılmıştır.

ψ/v parametresi, artan yükleme süresi ile azalmaktadır. Yükleme süresi ile gradasyon eğrilerinin farklı yönde değişebildiği elde edilmiştir. Sonuçta gradasyon eğrilerinin ve krip hızının yükleme süresi ile değiştiği ortadadır. Bu nedenle, $\dot{I}Y$ ile ψ/v parametreleri arasında bir ilişkinin varolabileceği düşünülmüştür.

Birincil konsolidasyon bitiş süresi, yükleme süresi ve krip deformasyonları kullanılarak, 20, 50, 100 ve 400 kPa'lık yüklemelerin herbiri için 15, 1440 ve 4320 dakikalık yükleme sürelerine bağlı olarak ψ/v , krip hızları elde edilmiştir. Bu krip hızları, gradasyon eğrileri kısmında hesaplanan, $\dot{I}Y$, incelik yüzdesi değerleri ile birlikte, ait

oldukları, gerilme ve yükleme süresine bağlı olarak ele alınmıştır. 20 ve 50 kPa'lık nispeten düşük gerilmelerde, incelik yüzdesinin yükleme süresindeki artış ile arttığı görülmektedir. İncelik yüzdesi artışının toprakların ayrışması olarak yorumlanmaktadır. 100, 200 ve 400 kPa'lık nispeten yüksek gerilmelerde ise, incelik yüzdesi değeri artan yükleme süreleri ile azalmaktadır. Bu durum ise toprakların artması olarak yorumlanmıştır. ψ/v parametresi her gerilme durumunda, yükleme süresi ile azalmaktadır. 20 ve 50 kPa'lık gerilmelerde, ψ/v parametresi ile İY, ters yönde değişmekle birlikte, aralarında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. 100, 200 ve 400 kPa'lık gerilmelerde, İY ve ψ/v aynı yönde değişmektedir. Bu parametrelerin her ikisi de yükleme süresindeki artış ile azalmaktadır. Bunlara ek olarak, yüksek gerilme düzeylerinde, aynı yükleme sürelerinde, düşük gerilme düzeylerine göre daha yüksek ψ/v değeri elde edilmiştir. 100 kPa gerilme değeri bir eşik değer gibi görülmektedir. Bu gerilmeden daha düşük ve yüksek gerilme durumlarında İY değerlerinin zamanla değişimi ve buna bağlı olarak ψ/v parametresi ile ilişkisi değişiklik göstermektedir. Bu bulgu McConnachie (1974)'de belirtildiği üzere, yükleme etkisindeki kil topraklarının, 10-100 kPa arasında, konsolidasyon mekanizmasında temel değişiklikler olduğu sonucu ile uyumludur.

KAYNAKLAR

- Abu-Hassanein, Z.S, Benson, C.H and Blotz, L.R., 1996, Electrical resistivity of compacted clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (5), 397-406
- Adamcewicz, A.S., Muhunthan, B. and Masad, E., 1997, Soil fabric changes during consolidation, *Geotechnical Testing Journal* 20(3), 347-356
- Alberro, J. and Santoyo, E., 1973, Long term behavior of mexico city clay, *Proc. Of the 8th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mockba, Vol. 1, 1-9
- Alonso, E.E. and Navarro, V. 2005, Microstructural model for delayed deformation of clay: loading history effect, *Canadian Geotechnical Journal*. 42(2), 381-392
- Alshibli, K. A., Sture, S., Costes, N. C., Frank, M. L., Lankton, M. R., Batiste, S. N., and Swanson, R. A., 2000, Assessment of Localized Deformations in Sand Using X-Ray Computed Tomography, *Geotechnical Testing Journal*, 23(3), 274-299
- Al-Tabbaa, A.A. and Wood, D.M., 1989, An experimentally based bubble model for clay, *In Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Models in Geomechanics. NUMOG III, Edited by S. Pietruszuzak and G.N. Pande*. A.A. Balkema. Rotterdam, 91-99
- Anandarajah, A, Kuganenthira N, Zhao, D., 1996, Variation of fabric anisotropy of kaolinite in triaxial loading. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(8), 633-640
- Anandarajah, A, Kuganenthira, N., 1995, Some aspects of fabric anisotropy of soils. *Geotechnique*, 45(1), 69-81.
- Barden, L. and Sides, G., 1971, Some disturbance in the investigation of clay structure, *Geotechnique*, London, England, 12(3), 211-222
- Bazant, Z.P. and Kim, J.K., 1986, Creep of anizotropic clay: Microplane model, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(4), 458-475
- Berre, T. and Bjerrum, L., 1973, Shear strength of normally consolidated clays, *Proc. Of the 8th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 39-49
- Bishop, A.W. and Lovenbury, H.T., 1969, Creep characteristics of two undisturbed clays, *Proc. Of the 7th Int. Conf. Of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, Vol. 1, 29-37

- Bjerrum, L., 1967, Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to the settlements of buildings, *Geotechnique*, 17(2), 83-118
- Bjerrum, L., 1973, Problems of soils mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (colleapsible, expansive and others). *Proc. Of the eight Int. Conf. On soil mechanics and foundation Engineering*, Mockba, Vol. 2, 109-159
- Bock, H., Blumling, P. and Konietzky, H., 2006, Study of the micro-mechanical behaviour of the Opalinus Clay: an example of co-operation across the ground Engineering disciplines, *Bull. Eng. Geol. Env.* 65, 195-207
- Borja, R.I. and Kavazanjian, E., 1985, A constitutive model for the stress-strain-time behaviour of wet clays, *Geotechnique*, 35(3), 283-298
- Buisman, A.S.K., 1936, Results of long duration settlement tests, *Proc. of 1st Int. Conf. on Soil Mechanics*, Cambridge, MA, 103-106
- Chen, J., Anandarajah, A. and Inyang, H., 2000, Pore fluid properties and compressibility of kaolinite, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 126(9), 798-807
- Crawford, C.B., 1964, Interpretation on the consolidation test, *J. of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 90 (SM5), 87-102
- Crawford, C.B., 1965, The resistance on soil structure to consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*., 2(2), 90-97
- Dafalias, Y.F., 1987, Anisotropic critical state clay plasticity model, *In proceedings of the 2nd International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials*, Tucson, Ariz. Elsevier. N.Y. Vol.1, 513-521
- Dafalias, Y.F. and Arulandan, K., 1979, Electrical characterization of transversely isotropic sands, *Arch. Mech.* (Warsaw), 31(5), 723-739
- Dafalias, Y.F. and Hermann, L.F., 1982, Bounding surface formulations of soil plasticity, *In Soil mechanics: Transient and cyclic loads. Edited by G.N. Pande and O.C. Zienkiewicz*. John Wiley & Sons, N.Y., 253-282
- Davies, M.C.R. and Newson, T.A., 1993, A critical state constitutive model for anisotropic soils, *In Predictive soil mechanics. Edited by G.T. Houlsby and A.N. Schofield*. Thomas Telford. London, 219-229
- Delage, P. and Lefebvre, G., 1984, Study of the structure of a sensitive Champlain clay and its evolution during consolidation, *Canadian Geotechnical Journal*, 21(1), 21-35
- Dollimore, D. and Horridge, T.A., 1972, The dependence of the flocculation behavior of china clay polyacrylamide suspension on the suspension pH, *Journal of Colloid and Interface Science*, 42(3), 581-588

- Duncan, J.M. and Buchignani, A.L., 1973, Failure of underwater slope in San Fransisco, *J. Of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.99, No.SM9, Proc. Paper 1009, 687-703
- Finn, W.D.L. and Shead, D., 1973, Creep and creep rupture of sensitive clay, *Proc. of the 8th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscou, Vol.1.1
- Flavigny, E. and Nova, R., 1990, Viscous properties of geomaterials, *Geomaterials: Constitutive Equations and Modelling*, Ed. By F. Darve, Elsevier Appl. Scie., London and New York, 27-54
- Gachet, P., Geiser, F., Laloui, L. and Vulliet, L., 2006, Automated Digital Image Processing for Volume Change Measurement in Triaxial Cells, *Geotechnical Testing Journal*, 30(2), 1-6
- Gillott, J.E., 1976, Importance of specimen preparation in microscopy, *Soil Specimen Preparation for laboratory testing*, ASTM STP 599, 289-307
- Graham, J. and Houlsby, G.T., 1983, Anisotropic elasticity in a natural plastic clay, *Geotechnique*, 33(2), 165-180
- Graham, J., Crooks, J.H.A. and Bell, A.L., 1983, Time effects on the stres-strain behavior of natural soft clays, *Geotechnique*, 33(3), 327-340
- Griffiths, F.J. and Joshi, R.C., 1989, Change in pore size distribution due to consolidation of clays, *Geotechnique*, 39(1), 159-167
- Griffiths, F.J. and Joshi, R.C., 1991, Change in pore size distribution owing to secondary consolidation of clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 20-24
- Hamilton, J.J. and Crawford, C. B., 1959, "Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a sensitive Clay", *ASTM STP 254*, sf. 254-271
- Hicher, P.Y., 1988, The viscoplastic behavior of Bentonite, *Proc. of Int. Conf. On Rheology and soil mechanics*, edited by M.J. Keedwell, Coventry, 89-107
- Higo, Y., Oka, F., Kodaka, T. and Kimoto, S., 2004, A three-dimensional elasto-viscoplastic strain localization analysis of water-saturated clay, *Numerical Models in Geomechanics, Proceedings of the Ninth International Symposium on 'Numerical Models in Geomechanics - NUMOG IX'*, Ottawa, Canada, 25-27 August, 2004, Edited by S . Pietruszczak and G . N . Pande, Taylor & Francis 2004, 107-114
- Holzer, T.L, Hoeg, K. and Arulanandan, K., 1973, Excess pore pressureS during undrained clay creep, *Canadian Geotechnical Journal*, 10(1), 12-24 yada 67-80
- Kavazanjian, E. and Mitchell, J.K., 1985, Time-Dependence of Lateral Earth Pressure, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 110(4), 530-533

- Kavazanjian, E. and Mitchell, J.K., 1980, Time-dependent Deformation Behavior of Clays, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 106(GT6), 611-630
- Korhonen, K.H. and Lojander, M., 1987, Yielding of Perno clay, *In Proc. Of the Int. Conf. On Constitutive Laws for Eng. Materials-Theory and Applications*, Tucson, Arizona, Elsevier, N.Y. Vol.2, 1249-1255
- Krizek, R., EDIL, T.B. and Ozaydin, I.K., 1975, Preparation and identification of clay samples with controlled fabric, *Engineering Geology*, 9, 13-38
- Kuganenthira, N., Zhao, D. and Anandarajah, N., 1996, Measurement of fabric anisotropy in triaxial shearing, *Geotechnique*, 46(4), 657-670
- Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W., 1990, Manual on estimating soil properties for foundation design, Research Project 1493-6, Final Report, *Geotechnical Engineering Group*, Cornell University, Ithaca
- Lacerda, W.A. and Houston, W.N., 1973, Stress Relaxation in Soils, *Proc. Of the Eight Int., Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, Mexico, 221-227
- Ladd, C.C., 1991, Stability evaluation during staged construction, *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(4), 540-615
- Ladd, C.C. and Foott, R., 1974, New design procedure for stability of soft clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 100(7), 763-786
- Laloui, L., Péron, H., Geiser, F. and Rifai, A., 2006, Advances in volume measurement in unsaturated soil triaxial tests, *Soils and Foundations*, 46(3), 341-349
- Lefebvre, G. and Leboeuf, D., 1987, Rate effects and cyclic loading of sensitive clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(5), 467-489
- Leroueil, S., 1988, Tenth Canadian Geotechnical Colloquium: recent developments in consolidation of natural clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 25, 85-107
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R., 1985, Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Geotechnique*, 35, 159-180
- Leroueil, S., Marques, M.E.S., 1996, Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical Engineering, *Measuring and Modelling Time Dependent Soil Behaviour*, Edited by T.C. Sheahan and V.N. Kaliakin, New York, 1-59
- Leroueil, S., Samson, L. and Bozozuk, M., 1983, Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at Gloucester, *Canadian Geotechnical Journal*, 20, 477-490
- Leroueil, S., Vaughan, P.R., 1990, The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks, *Geotechnique*, 40(3), 467-488

- Luo, D., Macleod, J.E.S., Leng, X., Smart, P., 1992, Automatic orientation analysis of particles of soil microstructures, *Geotechnique*, 42(1), 97-107
- Macari, E. J., Parker, J. K., and Costes, N. C., 1997, Measurement of Volume Changes in Triaxial Tests Using Digital Imaging Techniques, *Geotechnical Testing Journal*, 20(1), 103-109
- Martin, R.T., and Ladd, C.C., 1978, Fabric of consolidated kaolinite, *Clays and Clay Minerals Journal*, 23, 17-25.
- Martinez-Nistal, A., Veniale, F., Setti, M. and Cotecchia, F., 1999, A scanning electron microscopy image processing method for quantifying fabric orientation of clay geomaterials, *Applied Clay Science*, 14, 235-243
- McConnachie, I., 1974, Fabric changes in consolidated kaolin, *Geotechnique*, 24(2), 207-222
- Mitchell, J.K. and Soga K., 2005, *Fundamentals of Soil Behavior*, Third Edition, John Wiley & Sons
- Montoto, L., 1982, Digital multi-image analysis: application to the quantification of rock microfractography, *IBM J. Res. Dev.* 26, 735-745
- Mousseau, R.J. and Trump, R.P., 1967, Measurement of electrical anisotropy of clay-like materials, *J. Appl. Phys.*, 38(11), 4375-4379
- Nicholson, P.G., Russell, P.W. and Fuji, C.F., 1996, Soil creep and creep of highly weathered tropical soils, *Measuring and modeling time dependent soil behavior*, Edited by T.C. Sheahan and V.N. Kaliakin, New York, 195-312
- Navarro, V. and Alonso, E.E., 2001, Secondary compression of clays as a local dehydration process. *Geotechnique*, 51, 859-869
- Nova, R., 1982, A viscoplastic constitutive model for normally consolidated clay, *IUTAM, Conference on Deformation and failure of Granular Materials*, Delft, 287-295
- Quigley, R.M. and Thompson, C.D., 1966, The fabrics of anisotropically consolidated sensitive marine clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 3(2), 61-73
- Rasband, W.S., 1997-2009, *ImageJ*, US National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA
- Richardson, A.M. and Whitman, R.V., 1963, Effect of strain rate upon undrained shear resistance of saturated remoulded fat clay, *Geotechnique*, 13, 310-324
- Russ, J.C., 1990, Direction information from the Sobel Operator, *J. Computer-Assisted Microscopy*, 2, 239-247
- Santamarina, J.C., Klein, K.A. and Fam, M.A., 2001, *Soils and Waves*, John Wiley & Sons Ltd., New York

- Sekiguchi, H., 1977, Rheological characteristics of clays, Constitutive equations of soils Proc. Of speciality session, *9th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Edited by S. Murayama and A.N. Schofield, Tokyo, 289-292
- Sheahan, T.C., Ladd, C.C. and Germanie, J.T., 1994, Time-dependent triaxial relaxation behavior of resedimented clay, *Geotechnical Testing Journal*, 17(4), 444-452
- Sheahan, T.C., Ladd, C.C. and Germanie, J.T., 1996, Rate-dependent undrained shear behavior of saturated clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(2), 99-108
- Silva, A.J. and Brandes, H.G., 1996, Drained creep behaviour of marine clays, *Measuring and modeling time dependent soil behavior*, Edited by T.C. Sheahan and V.N. Kaliakin, New York, 228-242
- Silvestri, V., Rong, R.N., Soulie, M. and Gabriel, F., 1985, Controlled-strain, controlled-gradient and Standard consolidation testing of sensitive clays, *ASTM Symposium on Consolidation Behavior of Soils, Fort Lauderdale, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 892*, 433-450
- Singh, A. and Mitchell, J.K., 1968, General stress-strain-time function for soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 94(SM1), 21-46
- Soga, K., 1994, *Mechanical behavior and constitutive modelling of natural structured soils*, Thesis (Ph.D), University of California, Berkeley
- Sridharan, A. and Venkatappa Rao, G., 1979, Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept, *Geotechnique*, 29(2), 177-193
- Tavenas, F. and Leroueil, S., 1977, Effects of stresses and time on yielding of clay, *9th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Edited by S. Murayama and A.N. Schofield, Tokyo, Vol.1, 319-326
- Tavenas, F., Leroueil, S., Rochelle, P.La and Roy, M., 1978, Creep behavior of an undisturbed lightly overconsolidated clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 402-423
- Taylor, D.W., 1943, Cylindrical compression research program on stress-deformation and strength characteristics of soils, *Proc. Of 9th Progress Report to U.S. Army Corps of Engineering Waterways Experiment Station*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Tian, W.M., Siva, A.J., Veyera, G.E. and Sadd, M.H., 1994, Drained creep of undisturbed cohesive marine sediments, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 841-855
- Ting, W.H., 1968, *Some effects of history on the stress-strain behavior of kaolin*, Thesis (PhD), University of Cambridge, Cambridge, England
- Tovey, N.K., 1971, A selection of scanning electron micrographs of clays, *Rep. CUED/C-SOILS/TR5a, Dept. of Engrg., Univ. of Cambridge*, Cambridge, England

- Tovey, N.K., 1980, A digital computer technique for orientation analysis of micrographs of soil fabric, *J. Microscopy* 120, 303–315
- Tovey, N.K. and Sokolov, V.N., 1980, Quantitative methods for measurement of scanning electron micrographs of soil fabric. *Int. Soc. Photogrammetry, XIVth Congr.*, Hamburg, Germany, 23, 154–163
- Tovey, N.K., Smart, P., Hounslow, M.W. and Leng, X.L., 1992, Automatic orientation mapping of some types of soil fabric, *Geoderma*, 53, 179–200.
- Unitt, B.M., 1975, A digital computer method for revealing directional information in images, *J. Phy. E: Sci. Instrum.*, 8, 423–425
- Vaid, Y.P. and Campanella, R.G., 1977, Time-Dependent Behavior of Undisturbed Clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(7), 693–709
- Vaid, Y.P., Robertson, P.K. and Campanella, R.G., 1979, Strain rate behavior of Saint-Jean-Vianney clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 16, 34–42
- Van Olphen H., 1977, *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, New York: John Wiley & Sons
- Xin, Y. C., 1988, Experimental study on the elasto-plastic model of loess. *Proc., 3rd National Conf. on Numerical Analysis Method in Geomechanics*, Vol. 1, 193–199.
- Wang, Y.H. and SIU, W.K., 2006, Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations, *Canadian Geotechnical Journal*, 43, 587–600
- Wheeler, S.J., Naatanen, A., Karstunen, M. and Lojander, M., 2003, An anisotropic elastoplastic model for soft clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 403–418
- Wissa, A.E.Z, Christian, J.T., Davis, E.H. and Heiberg, S.H., 1971, Consolidation at Constant Rate of Strain, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 97(10), 1393–1413
- Yigit, I., (2010), *Influence of duration of anisotropic loading in terms of clay fabric*, 20th European Young Geotechnical Engineers Conference, 30 May–01 June 2010 Brno, Czech Republic, 42–47
- Yigit, I., and Cinicioglu, S.F., 2011. *Interpretation of Micromechanical Behaviour of Reconstituted Kaolin Soils under 1-D Consolidation*. 5th Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Seoul, 471–478
- Yiğit, İ. ve Çinicioglu, S.F., 2011, Kilde Mikro Konsolidasyonun Yorumlanmasında Yeni Bir Yaklaşım, *4. Geoteknik Sempozyumu*, Adana, 412–418
- Yiğit, İ., ve Çinicioglu, S.F., 2012, İkincil Konsolidasyon Modelinde Mikrografların Kullanılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi*, 4–5 Ekim 2012, Isparta, 315–326

- Yigit, I. and Cinicioglu, S.F., (2013), "A look into time dependent behavior of clays at macro and micro scale", *18th ICSMGE*, Vol 5, pp. 3507-3510, Paris, September 2-6, 2013
- Yin, J.H., 1990, *Constitutive Modelling of Time-dependent Stres-strain Behaviour of Soils*, Thesis (PhD), University of Manitoba
- Yin, J.H., 1999, Non-linear creep of soils in oedometer tests. *Géotechnique*, 49(5), 699-707.
- Yin, J.H. and Graham, J., 1989, Viscous-elastic-plastic modelling of one dimensional time-dependent behavior of clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 26, 199-209
- Yin, J.H. and Graham, J., 1994, Equivalent times and one dimensional elastic viscoplastic modelling of time dependent stress strain behavior of clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 31 42-52
- Yin, J.H. and Graham, J., 1999, Elastic visco-plastic modelling of the time-dependent stress-strain behavior of soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 736-745
- Yoshikuni, H., Kusakabe, O., Okada, M. and Tajima, S., 1995, Mechanism of one-dimensional consolidation, *Int. Symposium on Compression and Consolidation on Clayey Soils-IS-Hiroshima's 95*, Hiroshima, 1, 497-504
- Yoshikuni, H., Nishiumi, H., Ikegami, S. and Seto, K., 1994, The creep and effective stress-relaxation behaviour on one-dimensional consolidation, *Proc. Of the 29th Japan National Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.29, 269-270
- Yüksel, B., 2007, Konsolidasyon Sürecinde Kil Yapısındaki Değişimin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Zhou, C., Yin, J.H., Zhu, J.G. and Cheng, C.M., 2005, Elastic anizotropik viskoplastik modelling of the strain-rate-dependent stress-strain behavior of Ko-Consolidated natural marine clays in triaxial shear tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 5(3), 218-232
- Zhu, J.G., 1999, *Experimental Study and Elastic Visco-Plastic Modelling of The Time-Dependent Stress-Strain Behaviour of Hong Kong Marine Deposits*, Thesis (PhD), The Hong Kong Polytechnic University
- Zhu, J.G., Yin, J.H. and Luk, S.T., Time dependent stress-strain behavior of oft Hong Kong marine deposits, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, GTJODJ, 22(2), 112-120

EKLER

EK 1. Mathematica paket programında yazılan ImageJ programı işlenen ESEM görüntülerinin gronölometrik dağılımı programı.

```

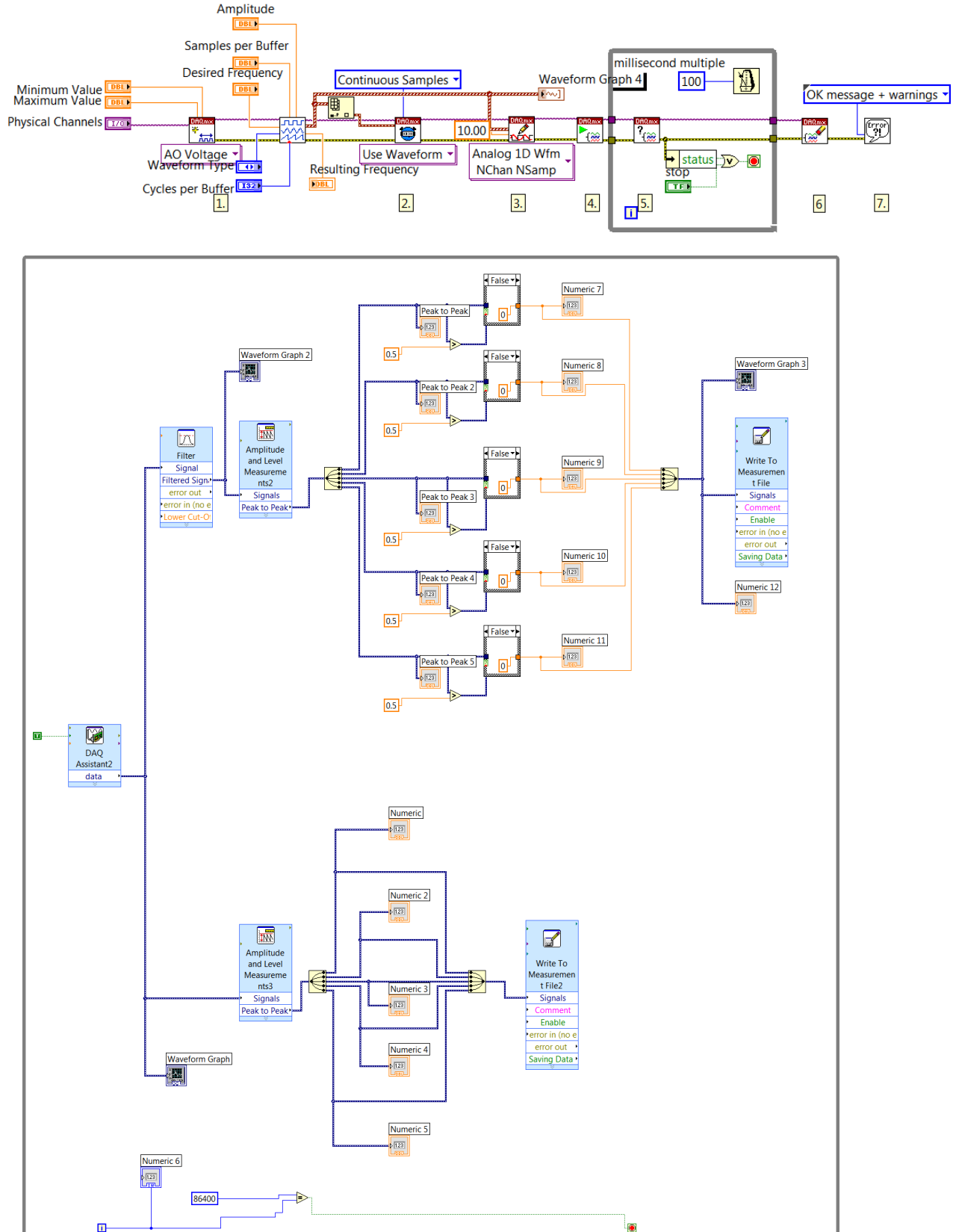
Clear[DMY1, DMY2, DMY3, DMY4, DMY5, DMY6, DMY7, DMY8, DMY9,
DMY10, DMY11, DMY12, DMY13, DMY14, DMY15, i, j, k, m];
DMY10 = Import["sonuclar050kpa.xls"];
DMY11 = Dimensions[DMY10][[2]];
DMY12 = Dimensions[DMY10][[3]];
DMY13 = Transpose[Flatten[DMY10, 1]];
DMY14 = {}; DMY9 = {}; DMY3 = {};

For[k = 1, k <= DMY12, k++,
  AppendTo[DMY14, Drop[DMY13[[k]], (-1)*( DMY11 - Count[DMY13[[k]],
_Real])]]
];

For[m = 1, m <= DMY12, m++,
  DMY2 = {
    BinLists[DMY14[[m]], {0, 1, 0.1}],
    BinLists[DMY14[[m]], {1, 10, 1}],
    BinLists[DMY14[[m]], {10, 100, 10}]
  };
  Clear[i, j];
  For[j = 1, j <= 3, j++,
    If[j == 1,
      For[i = 1; DMY4 = 0, i <= 10, i++,
        DMY4 = Total[DMY2[[j, i]]];
        AppendTo[DMY3, DMY4];
        Clear[DMY4]
      ],
      For[i = 1; DMY4 = 0, i <= 9, i++,
        DMY4 = Total[DMY2[[j, i]]];
        AppendTo[DMY3, DMY 4];
        Clear[DMY4]
      ]
    ];
  ];
  DMY5 = Total[DMY3]; DMY6 = DMY3/ DMY5;
  DMY7 = Accumulate[DMY6];AppendTo[DMY9, DMY7];
  Clear[DMY2, DMY3, DMY4, DMY5, DMY6, DMY7]
];
DMY20 = 100*Transpose[DMY9]; Export["datalar.txt", DMY20, "Table"];

```

EK 2: Elektrik direnci ölçümü için LabView programında yazılan kod.



ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	İbrahim YİĞİT
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	1977, Eskişehir
Telefon	05057413274
E-mail	ibrahimyigit@outlook.com
Web adres	-

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ İnşaat Mühendisliği / Geoteknik	2014
Yüksek Lisans	Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü/ İnşaat Mühendisliği / Geoteknik	2004
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi	2001
Lise	Burdur Anadolu Lisesi	1995

Makaleler / Bildiriler

- Yigit, I. and Cinicioglu, S.F., (2013), "A look into time dependent behavior of clays at macro and micro scale", 18th ICSMGE, Vol 5, pp. 3507-3510, Paris, September 2-6, 2013
- Yiğit, İ., ve Çinicioglu, S.F., (2012), "İkincil Konsolidasyon Modelinde Mikrografların Kullanılması", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, 4-5 Ekim 2012, Isparta, 315-326
- Yiğit, İ., ve Çinicioglu, S.F., (2011), "Kilde Mikrokonsolidasyonun Yorumlanmasında Yeni Bir Yaklaşım", 4.Geoteknik Sempozyumu, 1-2 Aralık 2011, Adana, 412-418

- Yigit,I. and Cinicioglu, S.F., (2011), "Interpretation of Micromechanical Behavior of Reconstituted Kaolin Soils under 1-D Consolidation", 5th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, pp. 471-477, Seoul, 31 August-3 September Korea, 2011
- Yigit, İ. ve Çinicioğlu, S.F., (2010), "Konsolidasyon Sürecinde Mikro-Dokuda Zamana ve Yüke Bağlı Değişim", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi,30 Eylül-01 Ekim 2010, İstanbul, 463-470
- Yigit,I., (2010), "Influence of duration of anisotropic loading in terms of clay fabric", 20th European Young Geotechnical Engineers Conference,30 May-01 June 2010 Brno, Czech Republic, 42-47
- Çapar, Ö.F. ve Yiğit, İ., (2005), "Doygun ve yarı doygün granüler zeminlerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin parametrik olarak incelenmesi", Geoteknik Sempozyumu, 26-27 Ekim 2005, Adana, 213-228